

Камчатский государственный педагогический университет
Кафедра географии, геологии и геофизики

Викулин Александр Васильевич

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ЗЕМЛИ
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВУЗОВ

Петропавловск-Камчатский, 2004

Викулин Александр Васильевич



Викулин Александр Васильевич (1947 г. р.), выпускник физического факультета Московского государственного университета (1971 г.), доктор физико-математических наук (2002 г.), профессор.

Основные научные интересы лежат в области сейсмологии, тектоники, геодинамики и прогноза землетрясений. Автор более 170 научных работ, в том числе соавтор двух научно-популярных книг, редактор двух тематических научных сборников.

ВВЕДЕНИЕ

Несколько лет тому назад при Камчатском государственном педагогическом университете (КГПУ) была открыта новая кафедра «Географии, геологии и геофизики». Встал вопрос о преподавании предметов геофизических специальностей.

Настоящее учебное пособие составлено в полном соответствии с программой дисциплины «Физика Земли» для специальности 011200 «Геофизика», утвержденной Министерством образования Российской Федерации в 2000 г. В качестве основы курса были взяты материалы, изложенные в ставших теперь классическими монографиях Г. Джефриса (1960), Б. Гутенберга (1963), В.А. Магницкого (1965), Ф. Стейси (1972), М. Бота (1974), К.Е. Буллена (1978) и других. В этих монографиях авторы старались подать материал так, чтобы он, по возможности, освещал физику всех составляющих предмета, тем самым создавая единую картину о сложных геофизических явлениях, протекающих в пределах всех слоев Земли. Следует сказать, что этими авторами под разными углами зрения и с разной детальностью такая общая картина жизни Земли была создана.

Однако, многочисленные данные, постоянно появляющиеся в геофизических узкоспециализированных научных журналах, постоянно «высвечивают» те недоработки и «натяжки», которые с неизбежностью всегда возникали и теперь возникают у авторов, пытающихся построить на достаточно высоком физическом уровне единую картину «жизни» Земли, других планет солнечной системы, звезд, галактик и всей Вселенной. Более того, в самые последние годы появились монографии, авторы которых предприняли попытки построения достаточно общей картины геофизических процессов, протекающих на Земле и других планетах солнечной системы, исходя из нетрадиционных представлений, основанных на новых данных. К числу таких работ, в первую очередь, следует отнести монографии К.Ф. Тяпкина (1998), В.В. Орленка (2000), В.В. Кузнецова (2000) и К.Г. Леви с соавторами (2002, 2003), авторы которых на протяжении уже многих лет читают курсы «Физика Земли», «Геофизика» и «Современная геодинамика и гелиогеодинамика» в высших учебных заведениях в разных городах бывшего СССР. В этом ряду следует выделить оригинальные монографии (Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993) и (Потапов, Фоминский, Потапов, 2000). Интересно отметить, что новыми, нетрадиционными моментами всех этих новых книг являются идеи, связанные с важностью для геофизических явлений, в первую очередь, ротационных движений.

В предлагаемой читателям книге автор предпринял попытку совместить в рамках одного курса и «классические» и «нестандартные» (по крайней мере, в настоящее время) представления. В свою очередь, новым моментом книги является также идея важности вращательного момента блоков земной коры, на основе которой построен новый для такого курса раздел «Сейсмический процесс». Насколько это автору удалось, судить читателю. Во всяком случае, хочется думать, что одновременно удалось и заинтересовать читателя предметом и заронить у него сомнения в отношении завершенности построения общей и полной картины жизни нашей планеты, тем самым дав толчок для поиска как новых геофизических идей, так и их конструктивных решений.

Автор признателен всем студентам и аспирантам, прослушавшим курс, сотрудникам ИВиС ДВО РАН, прочитавшим рукопись и сделавшим замечания. Работа над макетом рукописи была начата М.В. Лемзиковым и закончена С.А. Викулиной, которым автор выражает особую признательность.

I. МАТЕРИЯ. ДВИЖЕНИЕ. ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ.

Единство природы (Иванов, 1986). 1. *Иерархия объектов в природе.* Слово «иерархия» в применении к рассматриваемому случаю отображает лестницу объектов, качественно отличающихся или характеризующихся степенью сложности. В окружающем нас мире можно подметить (а это стало возможным в результате многовекового изучения природы человеком) следующую иерархию объектов: элементарные частицы – ядра – атомы – молекулы – макротела (кристаллы, жидкости, газы, плазма) – планеты – звезды – галактики – Вселенная.

Человек обычно имеет дело с макротелами (приставка «макро» означает большой) и сам таковым является. Как исследователь, человек всегда, во все времена стремился познать природу в ее двух крайних проявлениях: в очень малом (микромир) и в очень большом (мегамир). Каждое звено цепи «макротела – молекулы – атомы – ядра – элементарные частицы» отражает исторические вехи в исследованиях, этапы познания. Заметим, что если попытаться проследить за этой цепочкой в обратном направлении от частиц к макротелам (считая свойства частиц известными, и определять по ним свойства совокупностей частиц, т. е. самих макротел), то задача окажется не из легких. Так, например, в физике до сих пор отсутствует последовательная макроскопическая теория жидкого состояния вещества, в геофизике и астрофизике – теория образования и жизни планет, звездных систем (галактик) и Вселенной в целом.

Итак, рассмотрим всю иерархию основных объектов природы и дадим краткую характеристику.

1.1. *Элементарные частицы.* На сегодня эти образования являются исходными, простейшими в смысле структуры. Однако это не означает, что их свойства просты. Для описания поведения элементарных частиц используются наиболее глубокие физические теории, представляющие собой синтез теории относительности и квантовой теории.

В настоящее время все взаимодействия элементарных частиц представляются как своеобразная «игра в мячики».

Мир короткоживущих элементарных частиц может быть искусственно создан человеком в экспериментах на ускорителях – приборах, представляющих собой грандиозные инженерно-физические сооружения.

В самой природе короткоживущие элементарные образования могут играть роль при самых экстремальных условиях существования вещества и поля, например: в «начальных» стадиях эволюции Вселенной, при образовании таких астрофизических объектов, как «черные дыры», в формировании сердцевин нейтронных звезд.

Объединение релятивистских и квантовых представлений, осуществленное в значительной степени еще в 30-е годы прошлого столетия, привело к одному из наиболее выдающихся предсказаний в физике – открытию мира *античастиц*. Частица и соответствующая античастица имеют одинаковые времена жизни, одинаковые массы, их электрические заряды равны, но противоположны по знаку. Самым характерным свойством пары частица – античастица является способность *аннигилировать* (самоуничтожаться) при встрече с превращением в частицы другого рода.

Несмотря на микроскопическую симметрию между частицами и античастицами, во Вселенной до сих пор не обнаружены области со сколько-нибудь заметным содержанием антивещества.

Заметим, что частицы и соответствующие им античастицы одинаково взаимодействуют с полем тяготения; это указывает на отсутствие «антигравитации».

1.2. *Ядра.* Атомные ядра представляют собой связанные системы протонов и нейтронов. Плотность числа частиц в многонуклонных ядрах порядка 10^{44} нуклонов/м³, а плотность массы 10^{17} кг/м³. «Радиусы ядер» изменяются от $2 \cdot 10^{-15}$ м (ядро гелия) до $7 \cdot 10^{-15}$ м (ядро урана). Ядро имеет «форму» вытянутого или сплюснутого эллипсоида (или еще более сложную).

1.3. *Атомы и молекулы.* Ядра имеют положительный электрический заряд и окружены роем отрицательно заряженных электронов. Такое электрически нейтральное образование называют *атомом*. Атом есть наименьшая структурная единица химических элементов.

Не всякие атомы способны соединяться друг с другом. Связь возможна в том случае, если совместный «верхний этаж» целиком заполнен электронами. Такое образование называют *молекулой*. Молекула есть наименьшая структурная единица сложного химического соединения. Число возможных комбинаций атомов, определяющих число химических соединений, составляет около 10^6 .

Некоторые атомы (например, углерода и водорода) способны образовывать сложные молекулярные цепи, являющиеся основой для образования еще более сложных структур (макромолекул), которые проявляют уже биологические свойства.

1.4. *Макротела.* При определенных условиях однотипные атомы или молекулы могут собираться в огромные совокупности – *макроскопические тела (вещество)*. Простое вещество является атомарным, сложное – молекулярным.

При достаточно низких температурах все тела являются *кристаллическими*. В кристаллах взаимное расположение атомов тела является правильным.

Тела могут сильно отличаться в отношении механических, тепловых, электрических, магнитных и оптических свойств. Зная атомную природу тел и зависимость указанных свойств от нее, можно целенаправленно создавать новые материалы.

Перейдем от кристаллического состояния вещества к *жидкому*. При значительном повышении температуры происходит *фазовый переход* кристалл – жидкость (*плавление*). В жидком состоянии атомы уже не являются строго локализованными, т. е. связанными с какими-то определенными положениями в теле. Тепловое движение в жидкости носит довольно сложный характер.

При переходе жидкости в пар (при атмосферном давлении) вещество практически полностью теряет свою индивидуальность. Это связано с малой плотностью газообразного вещества.

Дальнейшее весьма значительное повышение температуры (до $10^4 - 10^5$ К) среды ведет к *ионизации* атомов, т. е. распаду их на ионы и свободные электроны. Такое состояние вещества называют *плазменным*.

Поскольку ионы и электроны в отличие от атомов несут не скомпенсированные электрические заряды, их взаимное влияние становится существенным. Плазма в противовес газам может проявлять коллективные свойства, что сближает ее с *конденсированным состоянием*, т. е. с твердыми телами и жидкостями. В плазме легко возбуждается всякого рода упруго-электрические колебания.

Приведем в качестве справки значения плотностей макротел в обычных условиях: в твердых телах и жидкостях она имеет порядок $10^{28} - 10^{29}$ атомов/м³, в газах $\sim 10^{25}$ молекул/м³, в искусственно создаваемой плазме плотность частиц $\sim 10^{19}$ м⁻³.

1.5. *Планеты.* Следующей ступенью в иерархии объектов природы являются макротела астрономического масштаба – *планеты*. Изучение планет солнечной системы по существу только начинается. Что показали эти исследования? Во-первых, условия, в которых находится вещество планет, отличается от земных условий. Во-вторых, в составе вещества планет не обнаружено никаких новых химических элементов по сравнению с элементами на земле.

Внутреннее строение планет изучать особенно сложно. Даже о своем «собственном доме» – планете Земля – человек знает недостаточно. По оценкам, при среднем радиусе Земли $R_3 = 6374$ км, массе $M_3 = 5,977 \cdot 10^{27}$ г, средней плотности $\bar{\rho} = 5,517$ г/см³ внутреннее давление в центральных областях земного шара имеет порядок 10^7 атм. (10^{12} Па). Какие изменения испытывает вещество при таких давлениях?

Если при невысоких давлениях вещество отличается крайним разнообразием своих свойств и обнаруживает чрезвычайно резкую и немонотонную зависимость от химического состава, то при сжатии вещества проявляется ярко выраженная тенденция «сглаживания» его свойств. Это последнее обстоятельство легко понять. В самом деле, наружные электронные оболочки вещества, ответственные за отмеченную не монотонность, при давлениях порядка $10^7 - 10^8$ атм. перестают существовать, ибо входящие в их состав электроны отрываются от атомов и становятся коллективными. Внутренние же электронные оболочки уплотняются, и распределение плотности электронов меняется сравнительно медленно при переходе от одного вещества к другому.

Давления порядка 10^7 атм. физики научились создавать в экспериментах по ударному сжатию тел. Исследования по физике высоких давлений привели к созданию целой группы новых материалов, среди них искусственные алмазы. Есть надежда на получение при давлениях порядка 10^7 атм. металлического водорода. Его свойства должны резко отличаться от обычных диэлектрических кристаллов молекулярного водорода, существующих при низких температурах и нормальном давлении. По оценкам физиков-теоретиков, кристаллы металлического водорода должны быть сверхпроводниками при комнатной температуре. Если это так, то мы станем свидетелями новой революции в электротехнике.

Одной из планет-гигантов солнечной системы является Юпитер, масса которого составляет $M_{\text{Ю}} = 318 \cdot M_{\text{З}}$. Он почти в 10 раз превосходит Землю по размерам и находится, по-видимому, в жидком состоянии. Его вещество богато водородом, и наверняка центральные области планеты состоят из металлического водорода.

1.6. Звезды. Галактики. Вселенная. Как ни странно, но физики гораздо лучше представляют себе состояние вещества внутренних областей звезд, чем планет. Центральные области Солнца, при его радиусе $R_{\text{С}} = 7 \cdot 10^8$ м, массе около $M_{\text{С}} \approx 3 \cdot 10^{33}$ г, характеризуются температурой порядка 10^7 К и давлением около 10^{11} атм. В этих условиях вещество является полностью ионизованной плазмой: голые ядра и свободные электроны. При этом становятся возможными термоядерные реакции, окончательным итогом которых является слияние ядер водорода и превращение их в ядра гелия. Эта ядерная реакция служит источником энергии звезд. Следует отметить, что существует и другая точка зрения (Потапов, Фоминский, Потапов, 2000), отличная от общепринятой.

По мере потери энергии звезды уплотняются. Свободные электроны начинают как бы вдавливаться в ядра. Происходит захват электронов протонами с превращением последних в нейтроны, при этом одновременно испускается нейтрино. В результате такой реакции уменьшается заряд ядра (при неизменной его массе), что, вообще говоря, приводит к уменьшению энергии связи ядра. В конце концов, ядра, содержащие слишком много нейтронов, станут неустойчивыми и распадутся. Вещество звезды будет представлять собой сверхплотный нейтронный газ.

Нейтронные звезды имеют массу, сравнимую с массой Солнца, а размеры - в 10^5 раз меньше. Плотность нейтронной звезды сравнима с плотностью ядерного вещества, т. е. 10^{17} кг/м³. Масса 1 см³ вещества такой звезды составляет сотни миллионов тонн!

Галактики – это звездные системы. Число звезд в них порядка $10^9 - 10^{12}$. Если масса звезды порядка 10^{30} кг (как у нашего Солнца), то масса Галактики порядка 10^{41} кг.

Известная нам часть *Вселенной* содержит число таких галактик порядка 10^{11} . Общее число протонов и нейтронов в известной нам части Вселенной порядка 10^{80} .

Астрономические данные показывают, что галактики во Вселенной стремительно «разбегаются» друг от друга. Расширение Вселенной позволяет предположить, что когда-то в прошлом она занимала весьма малый объем. Это, в свою очередь, означает, что «дозвездное вещество» было сверхплотным и чрезвычайно горячим (температура порядка 10^{13} К). При таких температурах вещество может состоять в основном из излучения – фотонов и нейтрино.

Общепринятая «горячая» модель Вселенной приводит к целому ряду следствий, которые могут быть проверены наблюдениями. Обнаружение так называемых *реликтовых фотонов*, являющихся остатками «дозвездного» состояния вещества, является неплохим доказательством справедливости наших представлений о самых ранних стадиях развития мира.

2. *Четыре вида фундаментальных взаимодействий. 2.1. Связанные системы объектов. Взаимодействия.* Как мы убедились выше, в природе существуют качественно различные системы объектов. Так, ядра есть связанные системы протонов и нейтронов; атомы – связанные ядра и электроны; макротела – совокупность атомов или молекул; солнечная система – «связка» планет и массивной звезды и т. д.

Наличие связанных систем объектов говорит о том, что должно существовать нечто такое, что скрепляет части системы в целое. Чтобы «разрушить» систему частично или полностью, нужно затратить энергию. Взаимное влияние частей системы характеризуется *энергией взаимодействия*, или просто *взаимодействием*.

В настоящее время принято считать, что любые взаимодействия каких угодно объектов могут быть сведены к ограниченному классу основных фундаментальных взаимодействий: сильному, электромагнитному, слабому и гравитационному.

2.2. *Гравитационные взаимодействия (тяготение).* Притяжение тел к земле, существование солнечной системы, звездных систем (галактик) обусловлено действием *сил тяготения* или, иначе, гравитационными взаимодействиями.

2.3. *Электромагнитные взаимодействия.* Ими обусловлены связи в атомах, молекулах и обычных макротелах.

2.4. *Сильные (ядерные) взаимодействия.* Наличие в ядрах одинаковых заряженных протонов и нейтральных частиц говорит о том, что должны существовать взаимодействия, которые гораздо интенсивнее электромагнитных, ибо иначе ядро не могло бы образоваться. Эти взаимодействия, их называют сильными, проявляются лишь в пределах ядра.

2.5. *Слабые взаимодействия.* Под влиянием «внутренних причин», нестабильные свободные частицы за те или иные характерные времена превращаются в другие частицы (распадаются). Существуют медленные распады с характерным временем $10^{-10} - 10^{-6}$ сек; они происходят за счет так называемого *слабого взаимодействия*.

2.6. *Сравнительная оценка интенсивностей всех видов взаимодействий.* Если рассматривать только элементарные частицы, то интенсивность различных взаимодействий по отношению к сильным распределяется следующим образом: сильное ~ 1 ; электромагнитное $\sim 10^{-3}$; слабое $\sim 10^{-14}$; гравитационное $\sim 10^{-40}$.

В вопросах строения и развития мира, как целого, роль гравитации становится определяющей. Исследование же конкретных астрофизических объектов (звезд, пульсаров, квазаров и др.) невозможно без привлечения всех фундаментальных взаимодействий.

2.7. *Поля и вещество.* Вся совокупность элементарных частиц с их взаимодействиями проявляет себя макроскопически в форме вещества и поля.

Поле в отличие от вещества обладает особыми свойствами. Физическая реальность электромагнитного поля видна хотя бы из того, что существуют радиоволны. Они имеют конечную скорость распространения; так, при локации Луны с помощью радиоволн время запаздывания радиосигнала составило около 2,5 сек.

Источником электромагнитного поля являются движущиеся заряженные частицы. Взаимодействие зарядов происходит по схеме: частица – поле – частица. Поле является переносчиком взаимодействия. В некоторых условиях поле может «оторваться» от своих источников и свободно распространяться в пространстве. Такое поле носит волновой характер.

3. *Пространство и время. 3.1. Пространственная и временная шкалы в природе.* Явления и процессы, происходящие с взаимодействующими объектами, протекают в

пространстве и во времени. Пространство и время являются той своеобразной «ареной», на которой разыгрываются события. Если событие характеризовать местоположением и моментом времени, то существование пространственно-временных связей накладывает определенные ограничения на возможный ход событий.

Рассмотренной выше иерархии объектов и взаимодействий могут быть сопоставлены пространственные и временные характеристики. Так, верхняя грань для пространственной области, в которой действуют сильные и слабые взаимодействия, имеет размер порядка 10^{-15} м; радиус действия электромагнитных и гравитационных взаимодействий неограничен, в связи с чем становится ясным, почему эти последние взаимодействия могут проявлять себя макроскопически.

Между взаимодействиями имеются существенные различия во временных характеристиках. Процессы, которые происходят под влиянием сильных взаимодействий, характеризуются временами порядка 10^{-23} сек. Для процессов, связанных с электромагнитным взаимодействием частиц, характерны времена порядка 10^{-15} сек. Наконец, для процессов, ход которых регулируют слабые взаимодействия, характерны времена $\geq 10^{-8}$ сек.

Связанные системы протонов и нейтронов (ядра) характеризуются пространственной областью порядка 10^{-15} м. Для электронов в атоме характерна пространственная область движения с размерами порядка 10^{-10} м.

Еще раз приведем сравнительные данные о пространственно-временной шкале астрофизических объектов. Средний радиус Земли равен $6,4 \cdot 10^6$ м, время ее существования $4,6 \cdot 10^9$ лет. У Солнца радиус $7 \cdot 10^8$ м, его возраст $(5-10) \cdot 10^9$ лет. Для галактик характерны размеры $\sim 10^{21}$ м, возраст вещества звезд составляет $(5-10) \cdot 10^9$ лет. Что касается известной части Вселенной, то ее радиус $\sim 10^{26}$ м, а возраст $\sim 10^{10}$ лет.

3.2. Однородность пространства и времени. Пространство и время обладают определенными свойствами, что, несомненно, влияет на ход физических явлений. Важнейшим из этих свойств является так называемая *однородность*. *Однородность пространства* означает, что любая его точка физически равноценна, т. е. *перенос любого объекта в пространстве никак не влияет на процессы, происходящие с этим объектом*. Так, мы совершенно уверены, что свойства атомов у нас на Земле, в условиях Луны и на Солнце одни и те же.

Однородность времени нужно понимать как физическую неразличимость всех моментов времени для свободных объектов. Другими словами, *если объекты не взаимодействуют с окружением, то для них любой момент времени может быть принят за начальный*. Мы считаем, что изученные сегодня закономерности в поведении атомов были теми же самыми и многие миллионы лет тому назад.

Приведем еще ряд иллюстраций. Один и тот же физический эксперимент, поставленный в Москве и Нью-Йорке, дает одинаковые результаты – это есть ни что иное, как отражение эквивалентности различных точек пространства в условиях Земли. В свое время Архимед открыл законы плавания тел; в настоящее время каждый из нас их может легко воспроизвести, создав соответствующие условия наблюдения, т. е. все моменты времени в рассмотренной ситуации физически равнозначны.

Если бы кажущиеся столь очевидными свойства однородности пространства и времени отсутствовали, то было бы почти бессмысленно заниматься наукой. В самом деле, представьте себе, к чему бы вело отсутствие однородности пространства: законы физики в Москве были бы одни, в Туле – другие, в Воронеже – третьи. Отсутствие однородности времени вело бы к тому, что люди не могли бы прогрессировать в познании. Открытый вчера закон плавания тел – сегодня был бы уже несправедлив, и нужно было бы вновь вести исследование; завтра он, в свою очередь, будет снова несправедлив.

3.3. Свободные тела и движение по инерции. Наше пространство является «плоским» в том смысле, что оно удовлетворяет всем аксиомам геометрии Эвклида; это

является экспериментальным фактом. Как будут вести себя свободные тела в таком пространстве?

Прежде всего, *под свободным телом мы будем понимать тело, настолько удаленное от всех окружающих тел, что можно пренебречь его взаимодействием с ними.* Для такого свободного тела вследствие однородности пространства любые его местоположения никак не будут влиять на его состояние. Телу «безразлично», в какой точке пространства находиться, ибо «внешние условия» не меняются. Если учесть еще и однородность времени, т. е. физическую эквивалентность всех моментов времени для свободного тела, то мы приходим к любопытному обстоятельству: тело будет *двигаться*, т. е. *последовательно менять свои местоположения с течением времени.* Причем вследствие однородности пространства и времени движение будет *равномерным*, т. е. *за равные промежутки времени тело должно проходить равные расстояния*, оно будет к тому же и *прямолинейным*, ибо пространство «плоское». Такое движение свободных тел называют *движением по инерции*.

Следует иметь в виду, что свойства пространства-времени в масштабах всей Вселенной или вблизи тел огромных астрономических масс отклоняются от свойств обычной геометрии Эвклида; здесь пространство обладает своеобразной «кривизной». Движение по инерции в таком пространстве уже не прямолинейно и неравномерно.

Движение тел по инерции есть проявление своеобразной симметрии пространства и времени, их однородности.

3.4. Инерциальные системы отсчета. Принцип относительности. Для количественного изучения движения любых объектов необходимо иметь *систему отсчета*. Под системой отсчета разумеют систему координат и *часы*, связанные с телом отсчета.

В качестве системы координат мы будем обычно пользоваться *прямоугольной декартовой системой*. Говоря же о часах, мы имеем в виду не только изобретенный человеком механизм, но и любой периодический процесс, который осуществляется в природе. Так, в роли часов могут выступить: вращение Земли вокруг собственной оси, движение Земли по околосолнечной орбите, периодическое движение атомных электронов (атомные часы) и т. д.

Если связывать систему координат и часы с произвольно движущимся телом, то относительно такой системы отсчета изучаемые физические явления даже в простейших случаях могут выглядеть весьма сложно. Особенная простота при количественном описании явлений выступает, если в качестве тела отсчета брать свободно движущиеся тела. Такие системы отсчета называют *инерциальными*.

В инерциальных системах отсчета всякие свободно движущиеся объекты движутся равномерно и прямолинейно. Инерциальных систем отсчета можно выбрать сколько угодно, и все они будут относительно друг друга двигаться по инерции.

Нет критерия, благодаря которому мы могли бы предпочесть одну инерциальную систему отсчета другой, также инерциальной. Все инерциальные системы отсчета являются физически эквивалентными, и опыт это подтверждает.

Какое бы физическое явление ни рассматривалось, с точки зрения любых инерциальных систем отсчета оно выглядит совершенно одинаковым. Это означает, что *математическая формулировка законов природы должна быть таковой, чтобы она не менялась при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.* Это положение в физике именуют **принципом относительности**.

Из-за существования принципа относительности физические законы обладают особым совершенством, связанным с их симметрией по отношению к выбору инерциальных систем отсчета. Требования указанной симметрии играют немаловажную эвристическую роль при поисках количественных соотношений, описывающих явления в новой области исследований.

Вселенная, Галактика, Солнечная система, планеты – основные гипотезы происхождения и эволюции. Чтобы надлежащим образом осветить происхождение Земли, рассмотрим место, которое занимает Земля в истории Вселенной. Среднее расстояние Земли от Солнца равно $149,6 \cdot 10^6$ км, а средняя скорость ее движения по орбите – 29,8 км/сек.

Солнце с его планетной системой находится во внешней части Галактики – дискообразного скопления звезд и межзвездных пыли и газа, видимых нами как Млечный путь. Солнце удалено от центра Галактики на 27 тыс. световых лет (1 световой год = 10^{13} км) и вращается вокруг него со скоростью 230 – 250 км/сек. Полный оборот длится 220 млн. лет (см. рис. 1.3, с. 22). Наша Галактика образует только малую часть Вселенной. Существует множество других галактик, которые, как показывают наблюдения, удалены от нас на расстояния до 12 млрд. световых лет. Дошедший до нас свет от самых удаленных галактик начал свой путь раньше, чем начала образовываться солнечная система!

Линии в спектрах далеких галактик смещены к красному концу спектра. Это явление интерпретируется как доплеровское смещение, возникшее при движении источника света от наблюдателя со скоростью, пропорциональной расстоянию. Отсюда возникла гипотеза о расширении Вселенной. Экстраполяция во времени назад позволяет установить, что расширение Вселенной началось свыше 10 млрд. лет назад (согласно гипотезе Дикке, в ней могут сменяться циклы расширения и сжатия). Дальнейшим подтверждением гипотезы происшедшего 10 млрд. лет назад «большого взрыва» является открытие радиоастрономов, обнаруживших микроволновое «реликтовое» радиоизлучение – «потомок» того излучения, которое возникло сразу после этого события.

Распространенность изотопов урана, тория и продуктов их распада в космосе, установленная по результатам химического анализа метеоритов, дает основание предполагать, что Галактика образовалась, по крайней мере, за 5 млрд. лет до формирования солнечной системы. Согласно одной из гипотез, Галактика образовалась в результате гравитационного коллапса турбулентного газового облака, возможно, вскоре после начального «большого взрыва».

Астрономы полагают, что звезды, подобные Солнцу, образуются в Галактике и в настоящее время. Они формируются из газо-пылевых межзвездных облаков, когда плотность последних становится достаточной для того, чтобы облака оказались гравитационно-неустойчивыми. Межзвездное вещество состоит частично из водорода и гелия, существующих со времени образования Галактики, и частично из гелия и более тяжелых элементов, синтезированных в ходе ядерных процессов внутри звезд или же при более интенсивных процессах типа взрывов сверхновых. Сжатие под действием сил взаимного притяжения сначала создает скопление протозвезд, которые позднее сами уплотняются и становятся молодыми звездами. Освобождающаяся при этом гравитационная энергия нагревает звезду, и звезда начинает излучать и светиться. В конечном счете, внутренняя температура становится достаточно высокой для начала ядерных реакций, звезда перестает сжиматься и занимает свое место на «главной последовательности». Солнце является довольно типичной звездой главной последовательности; она прошла стадию сжатия из межзвездного вещества свыше 4500 млн. лет назад.

Если современные представления справедливы, то планеты и их спутники образовались одновременно с Солнцем при конденсации газо-пылевого солнечного облака. По существу эта теория – модернизированный вариант взглядов Декарта и Канта, которые не привлекали внимания в первой половине XX столетия. Соперничающая с ними группа гипотез связывает образование планет с катастрофическим явлением, например, с приближением к Солнцу другой звезды или со взрывом близкой сверхновой. Предполагается, что эти события привели к вытягиванию из Солнца газовой струи, впоследствии сконденсировавшейся в планеты.

Каждая из существующих гипотез имеет свои нерешенные вопросы. Но гипотезы катастрофического происхождения солнечной системы оказываются перед лицом совершенно непреодолимых трудностей. Одна из них заключается в том, что газовая струя, достаточно протяженная и горячая, чтобы из нее могли образоваться планеты, рассеялась бы в пространстве приблизительно в течение часа, еще задолго до того, как охладилась бы настолько, чтобы могла начаться конденсация. Все, что могут сделать «катастрофические» гипотезы, - это признать существование солнечного облака, а такое облако в любом случае является начальной стадией гипотезы конденсации, или небулярной гипотезы. Поэтому небулярная гипотеза вновь привлекла внимание. Она хорошо согласуется с современными взглядами на образование звезд и может объяснить многие закономерности строения солнечной системы. Однако остаются еще неясности, связанные с распределением момента количества движения, с химическим несоответствием между планетами-гигантами и планетами земной группы, а также с механизмом конденсации. Но, по крайней мере, мы видим возможные пути решения этих проблем.

Достаточно распространенной в настоящее время является «холодная» модель образования планет солнечной системы О.Ю. Шмидта, в основе которой заложены представления о слипании под действием сил гравитации холодных частиц – планетезималей – планетных зародышей (Шмидт, 1957). В последние два десятилетия была разработана в известном смысле «противоположная» горячая модель образования Земли (Кузнецов, 2000), в основе которой заложены представления о первоначально разогретой до $3 \cdot 10^4$ К материи.

Обратимся к некоторым явлениям в солнечной системе, требующим объяснения. Прежде всего, сюда относится единообразное вращение и распределение момента количества движения. Все планеты, за исключением Плутона, обращаются по почти круговым орбитам, плоскости их орбит почти совпадают, и планеты обращаются вокруг Солнца в том же направлении, в каком вращается само Солнце (табл. 1.1, рис. 1.1).

Большая часть спутников движется по орбитам в экваториальных плоскостях своих планет и в направлении вращения планет. Правда, известны исключения, происхождение которых можно объяснить либо захватом, либо приливным трением. Средние расстояния планет от Солнца приблизительно подчиняются модифицированному закону Тициуса – Боде (см. рис. 1.9, с. 34; (1.1), с. 36). Физическая сущность этого закона еще не выяснена.

Распределение момента количества движения в солнечной системе представляет трудности для всех теорий. Планеты обладают 98% общего момента количества движения системы; само Солнце медленно вращается с периодом 24,65 суток. (Солнце вращается не как твердое тело; указанный период относится к экваториальным областям Солнца.) С другой стороны, основная масса (99,9%) системы сосредоточена в Солнце. Задача заключается в том, чтобы объяснить, каким образом передается момент количества движения от центрального тела к внешним частям системы.

Возникшие здесь трудности и послужили причиной того, что в начале XX века была отвергнута небулярная гипотеза Канта, поскольку момент количества движения сжимающегося диска, состоящего из вращающихся частиц пыли и газа, должен оставаться прочно «привязанным» к основной массе, из которой сконденсировалось само Солнце. «Катастрофические» гипотезы пытались обойти это затруднение, но в действительности им не удалось сделать это сколько-нибудь удовлетворительно. Сейчас, когда возродилась небулярная гипотеза, установлено, что взаимодействие между магнитным полем Солнца и ионизованным облаком или же эффекты турбулентности в облаке могли бы привести к передаче момента во внешние части сжимающегося газо-пылевого облака.

По мнению В.В.Орленка (Орленок, 2000) наблюдаемое распределение момента количества движения в солнечной системе можно объяснить в рамках вихревой модели Н.А.Шило (Шило, 1982; Латкин, 2004).

Таблица 1.1 Орбиты и плотности планет (Стейси, 1972)

Планеты	Отношение радиуса орбиты планеты R_n к радиусу орбиты Земли	$\frac{R_n}{R_{n-1}}$	Отношение массы планеты к массе Земли	Отношение радиуса планеты к радиусу Земли	Плотность, г/см ³	Рассчитанная плотность при нулевом давлении
1. Меркурий	0,387	-	0,055(3)	0,3820	5,47	5,3
2. Венера	0,723	1,86	0,815(5)	0,9506	5,24	3,9
3. Земля	1,000	1,38	1,000	1,000	5,517	4,04
Луна			0,0123	0,273	3,33	3,3
Земля+Луна			1,0123		5,44	3,96
4. Марс	1,524	1,52	0,107	0,530	4,0	3,8
5. Астероиды	~2,7	1,77	-	-	3,9	3,9 ^{*)}
6. Юпитер	5,203	1,92	317,9	10,97	1,35	В основном газобразны
7. Сатурн	9,539	1,83	95,1	9,03	0,71	
8. Уран	19,18	2,00	14,6	3,72	1,56	
9. Нептун	30,06	1,56	16(1)	3,8(3)	1,58	
10. Плутон	40	-	0,09?	0,5	4?	

*Примечание: Цифры в скобках неуверенные. *) Среднее значение для всей массы выпавших метеоритов.*

В теориях происхождения солнечной системы химические данные обычно игнорировались (Орленок, 2000). Различные тела солнечной системы образованы, в основном, тремя группами химических элементов:

Группа I: H, He (около 90% массы Солнца),

Группа II: C, N, O, (около 1,5% массы Солнца),

Группа III: Mg, Fe, Si (около 0,25% массы Солнца).

Планеты земной группы: Меркурий, Венера, Земля, Марс и астероиды – обладают значительной плотностью и состоят преимущественно из Mg, Fe и Si. Юпитер и Сатурн крупнее планет земной группы, их плотность существенно меньше, и поэтому они должны состоять главным образом из H и He. Возможно, их общий состав мало отличается от состава Солнца или первичной окосолнечной туманности. Состав Урана и Нептуна, плотности которых имеют промежуточные значения, в основном определяется твердыми соединениями II группы элементов: метаном, аммиаком и льдом. Во время формирования планет внутри солнечного облака должна была происходить сильная химическая дифференциация. Менее летучие элементы III группы должны были выделяться из облака в окрестностях планет земной группы, когда облако вытягивалось под действием магнитных или иных сил. Тогда же водород и гелий, составляющие свыше 90% всей первоначальной массы облака, интенсивно улетучивались в окружающее пространство в окрестностях Урана и Нептуна. Механизм этого «выдувания» не ясен.

Анализ содержания некоторых изотопов в метеоритах позволил оценить возраст Галактики. Верхний предел величины интервала времени от завершения синтеза тяжелых

элементов (или взрыва сверхновой?) до образования родительских метеоритных тел оценивается в 200 млн. лет. Отсюда можно заключить, что взрыв сверхновой мог произойти вблизи будущего солнечного облака менее чем за 200 млн. лет до образования солнечной системы. Взрыв мог также сыграть роль спускового механизма для начала конденсации в облаке.

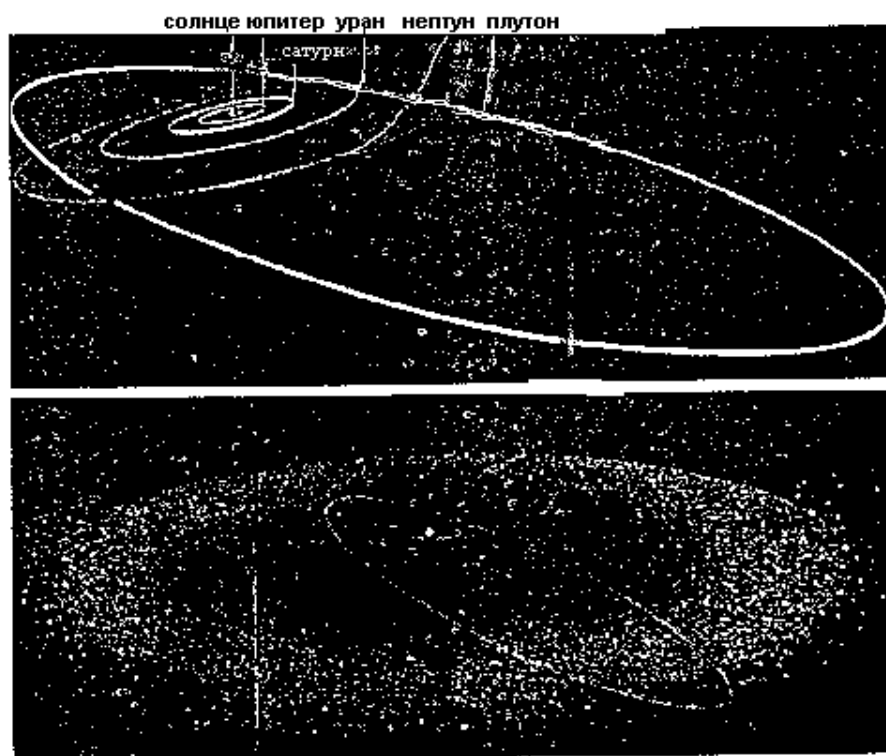


Рис.1.1. Схема взаимного расположения окружающих Солнце планетной системы (планеты земной группы, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) и кометного облака Кейпера (нижний рисунок). Видно особое положение Плутона, периодически вторгающегося в планетную систему из кометного облака (Маракушев, Моисеенко, Тарарин, 2000).

В заключение подытожим те стадии, через которые, возможно, прошла солнечная система. Первые пять стадий могли совпадать во времени.

1. Вращающееся Солнце сжималось, и поэтому его угловая скорость постепенно увеличивалась. При этом вращающийся газопылевой диск вытягивался в экваториальной плоскости. Возможно, окосолнечное облако образовалось после того, как вещество было выброшено с солнечного экватора, когда центробежная сила превысила силы тяготения (как впервые предположил Лаплас), или же облако могло образоваться в результате иных процессов.

2. Момент количества движения был передан от Солнца к облаку; вращение Солнца замедлилось, и облако расширилось, охватив местоположение будущих планет. Этот процесс мог произойти в результате взаимодействия магнитного поля Солнца (порядка 1 Гс) с ионизованной частью облака или же вследствие турбулентной конвекции в облаке.

3. С переносом наружу момента количества движения связана потеря энергии вращения, что могло произойти вследствие излучения облаком частиц высокой энергии при внезапных возмущениях магнитного поля. При этом могли образоваться легкие элементы, например, литий, и некоторые короткоживущие, радиоактивные изотопы, скажем Al^{26} .

4. При интенсивном истечении первичных водорода и гелия в окружающее пространство в районе расположения внешних планет в газо-пылевом облаке началась

химическая дифференциация; при конденсации в области образования будущих планет земной группы выделились кремний, железо и магний.

5. По мере охлаждения околосолнечное облако конденсировалось в пылинки и более крупные частицы, двигавшиеся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца в его поле тяготения.

6. Частицы с близкими орбитами сталкивались и слипались, постепенно вырастая до размеров достаточно крупных тел. Однако механизм, заставивший частицы объединяться на ранней стадии аккреции, остается неясным. Когда тела достигли размеров 1 км и больше, процесс столкновений и слипания усилился за счет тяготения. В конечном счете, образовались тела с размерами планет, их спутников и астероидов. Большая часть составлявших первичное облако газа и пыли заключена в этих телах или же рассеялась в пространстве.

7. В процессе аккреции момент количества движения передавался от облака к новообразованным планетам и их спутникам. Механизм передачи остается пока невыясненным.

8. На начальных стадиях аккреции малые тела, возможно, сильно разогревались из-за распада короткоживущих изотопов, в частности Al^{26} . Эти изотопы могли появиться в результате облучения газо-пылевого облака частицами высокой энергии. Разогрев мог вызвать разделение железо-никелевой и силикатной фаз и другие тепловые процессы в родительских телах метеоритов. Позднее некоторые из этих тел разрушились и образовали метеориты.

9. Процесс образования солнечной системы в основном закончился около 4500 млн. лет назад, и с тех пор общая структура системы не претерпела существенных изменений. За это время могли произойти захваты планетами спутников (например, Луна могла быть захвачена Землей), а скорость вращения планет, особенно Меркурия, Венеры и Земли, могла замедлиться под воздействием приливного трения.

Основы «холодной» модели происхождения солнечной системы (Сафронов, Витязев, 1983). С давних времен в космогонии солнечной системы происходило противоборство идей по двум главным направлениям. Во-первых, образовались ли Солнце и планеты в едином процессе или независимо. Во-вторых, образовались ли планеты из газовых сгустков или из твердого вещества («небулярные» и «метеоритные» гипотезы). Классические гипотезы Канта и Лапласа о совместном образовании Солнца и планет из рассеянного вещества единой туманности господствовали полтора столетия, затем были надолго оставлены. В 40-х годах идея совместного образования послужила основой для небулярных моделей Берлаге, Вейцеккера, Кейпера, Фесенкова, но всерьез возродилась лишь в 60-х годах Хойлом, Камероном, Шацманом. Гипотезы о раздельном образовании Солнца и планет можно подразделить на две основные группы — гипотезы об образовании планет из вещества, тем или иным образом выделившегося из уже существовавшего Солнца (Бюффон, Мультион и Чемберлин, Джинс, Станюкович и др.), и гипотезы захвата Солнцем диффузной межзвездной среды (Альвен, Шмидт, Литтлтон и др.).

Образование планет из газовых сгустков (протяженных массивных протопланет) предполагается в гипотезах Лапласа, Джинса, Кейпера, Фесенкова, Камерона, а образование из твердого вещества — в гипотезах Лигондеса, Мультиона-Чемберлина, Шмидта, Альвена-Аррениуса, Эджворта и др.

Впервые систематическая разработка теории образования планет из твердых частиц околосолнечного допланетного облака была начата О. Ю. Шмидтом в 1944 году (Шмидт, 1957). О.Ю. Шмидт определил планетную космогонию как комплексную астрономо-геолого-геофизическую проблему, опирающуюся не только на астрономические данные, но и на многочисленные данные наук о Земле. Он подчеркивал, что процесс формирования планет в допланетном облаке относительно независим от процесса

образования самого облака вокруг Солнца. Основные этапы процесса аккумуляции планет были подробно исследованы его коллегами и учениками (Гуревичем и Лебединским, Левиным, Сафроновым, Витязевым и др.). В 70—80-е годы теория аккумуляции планет из твердых тел и частиц получила дальнейшее развитие. Она разрабатывается учеными ряда стран и пользуется широким признанием.

Классическая космогония ставила перед собой задачу объяснить следующие группы фактов:

А - Орбиты планет почти круговые, лежат в одной плоскости и их обращение (у большинства из них и вращение) происходит в одном направлении с вращением Солнца (рис. 1.1).

В - Планеты распределены явно не случайным образом, в их расстояниях от Солнца есть закономерность, описываемая известным правилом Тициуса-Бодде (см. далее: рис. 1.9; соотношение (1.1)).

С - Разделение планет на две резко различающиеся группы: внутренние планеты - Меркурий, Венера, Земля и Марс - сравнительно небольшие, но с большей плотностью, более медленным вращением, с малым числом спутников (или без них) и внешние планеты - Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун - большие по размерам, меньшей плотности, с большей скоростью вращения и многочисленными спутниками (табл. 1.1).

Д - Распределение момента количества движения: в то время как в Солнце сосредоточено более 99% всей массы солнечной системы, на него приходится менее 2% момента количества движения, остальные 98% принадлежат планетам (см. далее: табл. 1.2; 1.3).

Важным методологическим шагом было предложенное О.Ю. Шмидтом деление проблемы происхождения солнечной системы на три части, разработка которых могла производиться в некоторой степени независимо. С незначительными изменениями эти три задачи можно сформулировать следующим образом: первая - объяснение происхождения Солнца и способа формирования допланетного облака, вторая (центральная задача планетной космогонии) - разработка теории образования планет в ходе эволюции допланетного облака и третья - установление геофизических, геохимических и геологических следствий теории образования планет. Такое деление позволило О.Ю. Шмидту и его последователям приступить к решению центральной задачи и к объяснению круга проблем *А*, *В* и *С*. Позднее, в рамках этого же подхода, был совершен переход к следующей по сложности группе задач определения начального состояния планет, состава и структуры их недр к моменту завершения процесса аккумуляции.

В настоящее время объяснение групп фактов *А*, *В*, *С* и *Д* является необходимым, но далеко не достаточным критерием правильности той или иной динамической модели. Требуется дополнительно объяснить обширную группу космохимических фактов:

Е - Вариации химического состава планет и спутников, существование разных типов метеоритов и астероидов, комет, изотопные данные.

Объяснение совокупности данных по астероидам и метеоритам, кометам и межпланетной пыли, составу поверхностей и атмосфер планет является столь же важным для предлагаемых моделей, как и объяснение групп *А*, *В*, *С* и *Д*. В качестве конкретного примера укажем на необходимость сопоставления и согласования временных шкал и последовательности отдельных стадий по изотопным данным и динамическим оценкам. Так, данные по возрастам метеоритов говорят о длительной (10^7 — 10^8 лет) столкновительной эволюции планетезималей в ходе их аккумуляции в планеты и являются веским подтверждением динамической оценки шкалы времени образования планет $\sim 10^8$ лет.

Грандиозный прогресс в технических возможностях астрономии, достигнутый на рубеже XX-XXI веков, позволил с 1995 г. начать серию открытий планет у ближайших звезд. К началу XXI века были открыты уже около 50 планетных систем. Кроме того, обнаружены газо-пылевые диски возле молодых звезд (например, у звезды β -Живовисца),

характеристики которых неплохо согласуются с построенной О.Ю.Шмидтом и его последователями теории образования планетных систем. Тем самым, находит подтверждение на практике и теория образования солнечной системы (Леви и др., 2002).

Модель горячей Земли. В течение последних двух десятилетий была разработана совершенно новая, во многом отличающаяся от общепринятых в настоящее время модель «горячего» происхождения Земли и всей Солнечной системы. Эта модель не является бесспорной, но она является обобщением большого экспериментального материала, а потому будоражит воображение и вызывает к дискуссии. Вне всякого сомнения, модель горячей Земли имеет право на существование. К некоторым моментам этой модели, изложенной в книге (Кузнецов, 2000), мы будем обращаться по ходу нашей книги. Здесь же приведем из этой книги Введение (почти без сокращений), в котором перечислены многие из основных трудностей, в настоящий момент стоящих перед «Физикой Земли».

«Науки о “Земле” и “Космосе”, об их устройстве и взаимосвязи относятся к разряду самых древних. Однако и в наши дни физика Земли, астрономия и астрофизика не дают однозначного ответа на многие вопросы, касающиеся образования, эволюции и внутреннего строения звезд, планет и спутников... Благодаря успехам астрономии в настоящее время с достаточно высокой точностью определены размеры, масса, моменты и средняя плотность планет и спутников, скорость их вращения вокруг Солнца и собственной оси. Однако даже такая деталь, как различие в средней плотности между планетами, не находит правдоподобного объяснения. Более 200 лет тому назад обнаружено, что орбиты планет, а точнее, большие полуоси орбит, подчиняются закону (правилу) Тициуса-Боде. Позже выяснилось, что этому же правилу подчиняется расположение орбит спутников Юпитера, Сатурна и Урана. Этот факт, казалось бы, свидетельствует, что Солнце, планеты и их спутники образовались в результате действия какого-то одного механизма. Однако и здесь, несмотря на широкую известность этого факта, он так и остался необъясненным.

Известно, что в течение всей истории Земли на ней происходили тектонические процессы: вулканизм, землетрясения, образование гор и впадин, движение материков и т.д. Однако до сих пор нет ясного представления о внутреннем источнике энергии Земли. Известно, что поверхность Земли пронизывает идущий изнутри тепловой поток, величина которого примерно постоянна по всей поверхности и приближенно одинакова на материках и океанах. Считается, что тепловой поток обязан своим происхождением радиогенному источнику, однако последние исследования по радиоактивности глубинных пород ставят под сомнение и эту гипотезу.

Земля обладает магнитным полем, причем выяснилось, что самые древние породы, обнаруженные на Земле и содержащие магнетит, показывают, что магнитное поле уже присутствовало на Земле, по крайней мере, 4 млрд. лет назад. Дипольное магнитное поле обнаружено почти на всех планетах Солнечной системы. Там же, где нет поля дипольного, т.е. генерируемого в момент наблюдения, обнаружены его следы в т.н. “каменной летописи”. Поразительным фактом, обнаруженным в самое последнее время благодаря успехам в освоении космического пространства, оказывается то, что дипольное магнитное поле было раньше не только на Марсе, не только на Луне, но и на спутниках Юпитера: Ио, Ганимеде, Калисто. Эта загадка не имеет решения в рамках существующих представлений о Земле и планетах.

Развитие изотопных методов позволило оценить время образования Земли, Луны и Солнца. Оказалось, что Солнце, Земля, другие планеты и их спутники образовались одновременно, или - 4.5 млрд. лет назад.

Модель холодной Земли (Шмидт, 1957) общепринята и не подвергается сомнению. Остановимся на сути этой модели: Земля образовывалась путем «склеивания» холодных частиц (планетезималей) в течение 100 млн. лет, иначе тепло, выделяемое при этом процессе, не будет успевать отводиться за счет радиационного охлаждения, и мы

приходим к горячей модели. Рассматривается два сценария образования Земли: согласно первому, сначала образовалось железное ядро, а затем на него стали «падать» силикаты, формируя мантию. Согласно второму, - Земля была «склеена» из силикатов и железа, потом произошла дифференциация и выделилось жидкое ядро, центральная часть которого кристаллизовалась (?). В каждом из сценариев, внешнее ядро Земли железное, расплавленное. В нем возникает конвекция, причем такого вида, что хорошо проводящая жидкость (железо) захватывает (вмораживает) силовую линию магнитного поля из окружающего Землю космоса и за счет эффекта гидромагнитного динамо происходит усиление и преобразование этого «затравочного» поля в геомагнитное. Дрейф материков обязан крупномасштабной конвекции, причина которой так и не выяснена, нет ни одного доказательства наличия такой конвекции на Земле. Тепловой поток, по модели, обязан наличию радиоактивных элементов и т.п.

подавляющее большинство геологов, интересующихся проблемами внутреннего устройства Земли, не сомневаются в том, что ядро Земли железное, а внутреннее тепло обязано радиоактивному распаду, иначе говоря, не сомневаются в том, что она «холодная». Тем не менее, анализируя геологический материал, реконструируя земной ландшафт по «остаткам» гор и вулканов, изучая палеомагнитные «записи» и химический состав пузырьков газа и воды, сохранившихся с давних времен в твердых породах, многие приходят к выводу, что Земля на ранних этапах своей эволюции была совсем не такой как сейчас.

Обратимся к статье известного русского геолога академика А. Л. Яншина, посвященной эволюции геофизических полей в истории Земли, и процитируем некоторые его высказывания, приведенные на страницах 82-87 книги (Яншин, 1993):

1. «... на протяжении первых трех миллиардов лет истории Земли высокие горы на её поверхности не существовали»;
2. «... 2.2 млрд. лет, температура морской воды была определена в интервале от 50 до 60 °С»;
3. «... в раннем докембрии существовало более близкое к поверхности Земли положение более горячей, чем сейчас, астеносферы»;
4. «... приливные волны в литосфере, ... были, вероятно, основным динамическим фактором тектонических процессов на протяжении всего раннего архея, т.е. во времена, отстоящие от наших дней более чем на 3 млрд. лет»;
5. «... 1.8 млрд. лет тому назад скорость вращения Земли была в 2 раза больше современной ...»;
6. «... изучение напряженности магнитного поля Земли по палеомагнитным данным показывает, что оно не оставалось в истории Земли постоянным, в целом поле в более давние времена значительно возрастало».

Предположим, что все сказанное о раннем периоде эволюции Земли, верно. Вообще-то, у нас нет оснований сомневаться в том, о чем пишет Яншин, так как он приводит геологические аргументы (опущенные нами здесь), подтверждающие каждую из приведенных здесь цитат. В таком случае, каким образом все перечисленные нами факты (с первого по шестой) можно «загнать» в «прокрустово ложе» общепринятой научным сообществом модели «холодной» Земли? Ведь согласно этой модели, на Земле практически «всегда было так, как сейчас».

«Переведем» сказанное Яншиным на язык физики Земли и представим, какие же геофизические параметры и каким образом могли изменяться в течение времени её эволюции:

- 1) уменьшалась величина силы тяжести (например, за счет возрастания радиуса Земли);
- 2) земная поверхность остывала (Земля раньше была «горячее»);
- 3) температурный градиент раньше был выше (Земля горячее, а радиус меньше);

4) отсутствовала причина, вызывающая активную тектонику (если причина активной тектоники связана с расширением Земли, а Земля 3 млрд. лет назад еще не начала интенсивно расширяться);

5) одна из причин - радиус Земли был меньше;

6) одна из возможных причин - меньшая величина земного радиуса.

Возможно, наша интерпретация и комментарии относительно высказываний академика А.Л. Яншина несколько предвзяты и не совсем объективны. Причина такого отношения станет очевидной после прочтения этой книги и ознакомления с сутью модели горячей Земли. Ведь, по сути, наша модель - модель расширяющейся Земли. Когда я много лет тому назад спросил А. Л. Яншина, как он относится к модели расширяющейся Земли, он ответил, что это абсолютно бредовая идея. Своё отношение к идее расширения Земли Яншин аргументировал тем, что “мы же видим, что Земля не расширяется сейчас, значит, она не расширялась и раньше”. Я не нашел сразу, что ответить академику, но, подумав, нашел такой, как мне сейчас кажется, убедительный ответ: Если в течение последних 30 - 40 лет регулярно измерять мой рост (но не вес!), то можно прийти к выводу, что я таким и родился. (Справедливости ради отметим, что 100 лет инструментального наблюдения за радиусом Земли эквивалентно примерно одной минуте жизни человека). Так же и с Землей: то, что она сейчас скорее сжимается (чем расширяется), вовсе не означает, что за миллиарды лет Земля преимущественно не расширялась. Кроме этого, научным сообществом не делалось даже попыток инструментально оценить, изменяется ли во времени радиус Земли, или он постоянен. Надо заметить, что все современные геодинамические проекты, связанные с перемещением материков и плит, исходят из постулата о неизменности величины земного радиуса. Правда, это нигде специально не оговаривается и считается само собой разумеющимся.

Приведенный нами выше пример демонстрирует, что у геологов, убежденных в правомерности модели холодной Земли, возникают и со временем накапливаются факты, которые, в принципе, находятся с ней в противоречии. Как правило, эти факты замалчиваются при написании монографий по физике Земли. Трудно назвать книги по физике Земли, издаваемые за рубежом и в России, в которых излагались бы идеи, противоречащие принятым догмам холодной модели. Одной из таких книг, оказавших на меня очень сильное впечатление, была книга австралийского геолога С. Кери (Carey, 1976) о геологии расширяющейся Земли. Конечно, её нельзя считать книгой по физике Земли, но это, вероятно, одна из лучших книг, в которой автор убедительно показывает, что наша планета расширялась! Буквально все монографии по физике Земли “переписывают” друг у друга: планетезимали, как строительный материал для планеты, выделение железного ядра при дифференциации, генерацию магнитного поля за счет динамо-эффекта, конвекцию в мантии как движитель плит, радиогенный разогрев как источник теплового потока и т.п. Если внимательно не “присматриваться” к этой модели, то можно посчитать, что она самосогласованна и не имеет внутренних противоречий.

Если допустить, что планеты и спутники, как и Солнце, создавались по другому, “горячему сценарию”, то оказывается, что практически ничего не удастся использовать из прежних “наработок” физики холодной Земли. Всю физику горячей Земли приходится создавать “заново”. Холодная модель интенсивно создавалась усилиями многих физиков многих стран не менее 50 лет. Модель горячей Земли в этом плане естественно уступает по глубине и тщательности проработки многих вопросов.

Сформулируем основные моменты концепции горячей Земли. Будем руководствоваться основными требованиями к новой теории, претендующей на то, что она более адекватна Природе, чем существующая. И, хотя нашу модель еще рано рассматривать как теорию Земли и Солнечной системы, тем не менее, постараемся учесть требования, характерные для любой теории, претендующей на признание научного сообщества:

Во-первых, теория не должна приводить к резко противоречащим друг другу выводам, то есть, теория должна быть самосогласованной.

Во-вторых, теория должна объяснять бесспорные результаты экспериментов и наблюдений.

В-третьих, фундамент, заложенный в теорию, должен давать ей возможность оценивать любые конкретные ситуации и анализировать результаты любого нового эксперимента.

В-четвертых, теория должна быть согласована со всеми физическими законами.

В-пятых, теория должна давать возможность предсказывать события и результаты планируемых экспериментов и наблюдений.

Основная, базовая идея, заложенная в модели горячей Земли, состоит в том, что Солнце, планеты и их спутники образовались в едином достаточно быстром (порядка 1 млн. лет) самоорганизующемся процессе самогравитации протосолнечного «облака», произошедшем 4.5 млрд. лет назад. Этот процесс во времени и пространстве можно условно разделить на две составляющие: 1) формирование в протосолнечном «облаке» сгустков вещества, из которого впоследствии сформировались планеты, и 2) бифуркации, произошедшей в области пояса Астероидов в тот момент, когда Солнце ещё полностью не сформировалось и его радиус был больше современного примерно в 7 раз. Бифуркация разделила вещество протосолнечного «облака» на две части: из одной сформировались планеты гиганты, вторая «пошла» на формирование Солнца и планет земного типа. Особенности внутреннего строения и эволюция планет и спутников определялись одним параметром – величиной их массы M . Температура T вещества планеты в момент их образования была пропорциональна: $T \sim M^{2/3}$.

Планеты и спутники (по величине их массы) можно условно разбить на три класса: 1) $GM/R < U_1$; 2) $U_1 < GM/R < U_2$; 3) $GM/R > U_2$. U_1 , U_2 – удельные теплоты плавления и испарения, соответственно, G – гравитационная постоянная. К первому классу отнесём малые спутники и астероиды, ко второму, – Марс, Меркурий и большие спутники, к третьему, – Землю, Венеру и гигантские планеты. Первые в момент образования не были полностью расплавлены, вторые – полностью расплавлены и часть их вещества находилась в газообразном состоянии, третьи, – прошли фазу полностью газообразного состояния. Процесс сжатия (самогравитации) планеты прекращается, когда внутреннее газокINETическое давление её вещества становится равным гравитационному давлению (критерий Джинса). После этого планета эволюционирует, выделяется газообразное внутреннее ядро, жидкое – внешнее и формируется кристаллическая мантия. Планета при этом расширяется, т.к. начальная плотность вещества в газообразном состоянии была выше плотности вещества в конденсированном состоянии. На границе внутреннего и внешнего ядра реализуется фазовый переход (ФП) «конденсация-испарение», а на границе ядро-мантия фазовый переход «кристаллизация-плавление». Оба ФП экзотермические, что обеспечивает планете источник внутренней энергии, который «расходуется» на тепловой поток, магнитное поле, геодинамику и т.п. Направления ФП могут меняться: от преимущества конденсации над испарением, что приводит к расширению Земли, к преимуществу испарения над конденсацией, что соответствует периоду её сжатия.

В области ФП на границе внутреннего ядра возникают электрические явления, образуется радиальное электрическое поле и двойной электрический слой (ДЭС). Суточное вращение ДЭС вызывает появление слабого магнитного поля, которое усиливается за счет проявления гальвано-магнитных эффектов, подобных эффекту Холла, и является причиной генерации магнитного поля планеты и спутника. Смена режима преимущества ФП того или иного типа автоматически приводит к изменению полярности ДЭС и инверсии магнитного поля. Явления, связанные с деятельностью механизмов поддержания температуры в области ФП, «маркируются» магнитным полем и представляют собой всю гамму явлений геомагнетизма.

Температура и давление вещества Земли в ходе её эволюции уменьшаются, что является основной причиной происходящих в её недрах циклических процессов, находящихся отражение в палеомагнитной шкале и «каменной летописи».

Геодинамические явления, сейсмичность и вулканизм проявляются на Земле (и других планетах и спутниках), открытой самоорганизующейся структуре, как «средства» достижения выполнения условия минимизации её гравитационной энергии, приводящие Землю, другие планеты и большие спутники к шарообразной форме и стремящиеся минимизировать высоту их «геоидов».

Релаксация вещества внутреннего ядра уже произошла на Марсе и больших спутниках, о чем говорит отсутствие дипольного магнитного поля в настоящем времени и наличие его в прошлом. Этот процесс ещё происходит на Меркурии, Земле и других планетах. Отсутствие магнитного поля на Венере, где внутреннее ядро должно ещё сохраниться, может быть объяснено только тем, что она вращается очень медленно и её затравочное магнитное поле слишком мало для развития генерации.

Модель горячей Земли самосогласованна, в ней используются известные законы физики, она находит объяснение всем бесспорным наблюдательным фактам, позволяет прогнозировать явления, которые могут наблюдаться в будущем. Таким образом, модель горячей Земли удовлетворяет требованиям, предъявляемым теории»

Ротации во Вселенной. В наблюдаемой области Вселенной, в Метагалактике, сферическом объеме радиусом $3 \cdot 10^{25}$ м, содержится масса $\sim 10^{50}$ кг. В этой области имеется приблизительно миллион сверхскоплений и десять миллиардов галактик различных типов, среди которых преобладают спиральные, подобные нашей Галактике.

Взгляд физика: вращательное движение как характерное свойство пространства-времени Вселенной (Викулин, 2004).

Вращательное движение в геологии. В справочно-обзорной литературе по геологии, вышедшей в свет как у нас, в России, так и за рубежом (см., например, (Геологический..., 1978; Структурная..., 1990-1991)), такие понятия как вихревые структуры (складки) и/или вихревые движения не определяются, хотя созвучные словосочетания в тексте встречаются. Так, в третьем томе (Структурная, 1991, рис. 5, с. 206), на котором изображены центры диастрофизма, окруженные горными дугами Альпийской системы, показаны две вихревые складки, одна из которых (Генуя) закручена против часовой стрелки, вторая (Дунай) – по часовой стрелке. В специальной литературе примеров вихревых структур приводится достаточно много, однако природа их происхождения и процессы их развития во времени, как правило, не обсуждаются. Чрезвычайно редко в специальной геофизической литературе встречается и фамилия китайского ученого Ли Сы-гуана, который впервые описал такие структуры. Уже эти обстоятельства указывают на ту весьма незначительную роль, которую вихревые структуры «играют» в науках о Земле в настоящее время.

Вихревые движения в физике. История вопроса. Достаточно емкие и образные обзорные данные о вихревых движениях содержатся в работах сборника (Борисов, Мамаев, Соколовский, 2003). В изложении материала этого раздела будем следовать этой работе (курсив – А.В.).

Ранние исследования по теории вихревого движения восходят к Декарту, Гюйгенсу, Иоганну и Даниилу Бернулли (XVII век). В этот период были установлены некоторые закономерности вихревых взаимодействий, но вихревая теория не достигла такого совершенства и полноты, как ньютоновская теория гравитации. Несмотря на ожесточенную полемику картезианцев (приверженцев Декарта) и ньютонианцев, она вскоре была вытеснена ньютоновской картиной мира и почти совсем забыта. Исторически первые труды Эйлера и Лагранжа, создававших ньютоновскую гидродинамику (а также теорию сплошных сред), ограничивались описанием потенциальных (безвихревых) полей.

Возрождение интереса к вихревой динамике относится к середине XIX столетия. Это труды Гельмгольца, Кельвина и Кирхгофа, приведшие не только к существенно новым гидродинамическим результатам, но и к созданию наиболее общей *вихревой теории материи*. Необходимость создания такой теории в значительной степени возникла из потребности объяснить свойства атмосферных циклонов и антициклонов. Особое значение в вихревой теории имеет теорема Гельмгольца, которую А. Пуанкаре считал наиболее значительным вкладом в гидродинамику. Ее сутью является закон вмерзновенности вихревых линий, позволяющий рассматривать *вихревые образования как некоторые материальные объекты, подобные массам в классической механике*. Следуя общей идее XIX века, согласно которой объяснения различных физических феноменов следует искать в подходящих механических интерпретациях, лорд Кельвин (1867 г.) предложил *теорию вихревых атомов*. В этой теории мир понимается как некоторый эфир (аналог идеальной жидкости), в котором *взаимодействуют вихри Гельмгольца, подобные атомам, образующим молекулы*. Идеи Кельвина так и не были реализованы и вскоре были полностью вытеснены атомной и квантовой механикой.

В последние десятилетия, особенно в связи с интенсивным развитием возможностей вычислительной техники, теория вихревых движений получила интенсивное развитие и в глубь и в ширину. В рамках Геофизической гидродинамики – области гидромеханики, сложившейся за последние три десятилетия в качестве ее самостоятельного раздела, – стало возможным решение ряда актуальных гидродинамических проблем *планетарного характера*. Перспективные направления в теории связаны с исследованием *вихревых движений* с крупномасштабными течениями, топографией и береговым рельефом. Исследование топографических вихрей позволило выявить существование в пределах мирового океана определенных структур, связанных, в том числе, и с «захватом» шельфовых волн неоднородностями (см. также (Ефимов, Куликов, Рабинович, Файн, 1985)). Гидрологическое исследование района одной из подводных гор Гавайского хребта в Тихом океане, например, показало наличие столбчатой структуры в распределении гидрологических, гидрохимических и биологических параметров среды, при этом на картах динамической топографии четко выделялась замкнутая антициклоническая циркуляция. Показано, что существенную роль в процессе формирования *вихревых структур* в районах подводных гор играют также приливы и другие явления.

Как видим, успехи, достигнутые геофизической гидромеханикой, впечатляющие. Однако такого рода работы рассматривают явления, происходящие исключительно в гидросфере Земли и атмосферах планет, и совершенно не касаются проблемы вихревых структур в геологии. Нам не известна ни одна такая работа.

Следует отметить, что квантовая механика «ушла» от решения проблемы появления у частиц вихревых (вращательных) движений – спина, путем придания ему смысла квантового числа. Современное положение дел в квантовой механике наиболее точно, пожалуй, характеризует цитата из работы создателя кварковой модели строения материи М. Гелл-Манна (1984): «Квантовая механика – это полная загадок и парадоксов дисциплина, которую мы не понимаем до конца, но умеем применять». Представляется, что если бы идеи лорда Кельвина были реализованы, то роль и значение вихревых (вращательных) движений в современном естествознании и науках о Земле, в том числе и вихревых структур в геологии, возможно, была бы совершенно иной (?). Время покажет.

Вращательное движение как характерное свойство пространства-времени Вселенной. Вращение материи Вселенной как ее характерное (внутреннее) свойство с очевидностью проявляется для двух крайних ее «предельных» состояний – галактик и элементарных частиц.

Галактики. Следуя (Гуревич, Чернин, 1983), можно констатировать, что вращение – очень распространенное свойство галактик. Фактически все они – спиралевидные, эллиптические и неправильные – так или иначе, вращаются. Среди всех известных нам

галактик и по числу, и по сосредоточенной в них массе преобладают (более 70-80%) спиральные галактики, диски которых обладают быстрым, предельно сильным вращением (рис. 1.2).

Центральная часть галактики вращается с постоянной скоростью и периодом (твердотельное вращение), а звезды, расположенные в пределах ее «хвоста», вращаются с переменными периодами, что, фактически, означает их вращение, в соответствии с третьим законом Кеплера, в гравитационном поле, создаваемом, главным образом, массой центральной области галактики, как и планеты в поле тяготения Солнца. Линейная скорость вращения нашей Галактики в районе Солнца (рис. 1.3) составляет 220 – 250 км/сек. Момент количества движения нашей Галактики примерно составляет $I \sim 10^{74}$ эрг·сек. Вращение других спиральных галактик обычно составляет 100 – 300 км/сек.



Рис. 1.2. Спиральная галактика в созвездии Гончих Псов

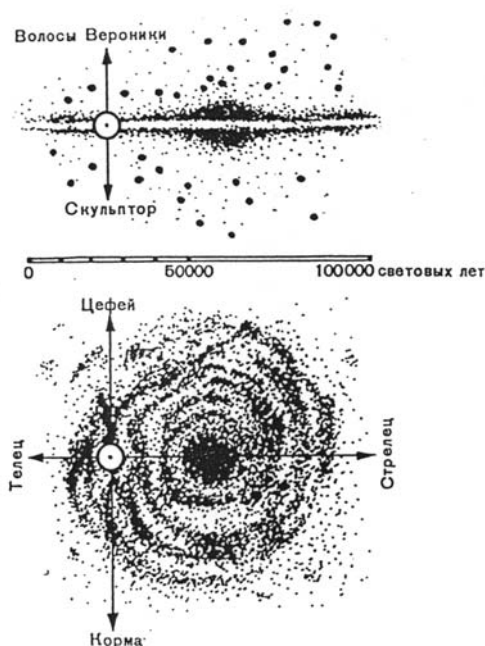


Рис. 1.3. Положение Солнца (кружок с точкой) в нашей Галактике. Видно, что Солнце расположено на окраине Галактики. Мелкие точки – звезды, крупные – звездные скопления.

Гипотезы, с помощью которых пытались объяснить вращательное движение вещества, возникали не однократно. Первым был И. Кеплер, который еще в 1609 г. рисовал Солнце в центре некоего мощного вихря, который разбрасывает планеты по их орбитам и заставляет вращаться вокруг Солнца. Р. Декарт, обобщая эту картину на всю Вселенную, писал в 1644 г., что в процессе формирования космических тел мировое пространство было заполнено огромным числом вихрей разнообразной формы и размеров. Эти идеи не прошли мимо И. Ньютона, хотя он и отнесся к ним критически, высказав подозрение, что космогония Декарта не способна объяснить Кеплеровы законы движения планет. Критика Ньютона содержалась в его знаменитых «Началах» (1687 г.), где он писал, между прочим, что теория вихрей пренебрегает наблюдаемыми астрономическими явлениями, создает больше проблем, чем объясняет, делает вещи более трудными, а не более легкими и т.п. Для вихрей же самих по себе, как писал Ньютон, нет никаких доказательств существования и, следовательно, их нужно отвергнуть. В результате, как мы видели выше, ньютонианцы «победили» картезианцев, и идеи Декарта были на долго, более чем на столетие, забыты.

Глубокий анализ проблем вихревой космогонии дал позднее И. Кант, а П. Лаплас построил на этой основе свою небулярную гипотезу (1796 г.), которая, по существу, и до сих пор находится в центре космогонических дискуссий, развиваясь и обогащаясь новыми теоретическими идеями и наблюдательными данными. Как говорил А. Пуанкаре (в 1911 г.): «Несмотря на многочисленные возражения, выдвигавшиеся против нее, несмотря на все новые поразительные открытия в астрономии, способные удивить ее творцов, вихревая космогония остается все еще с нами».

В XX веке процесс выдвижения гипотез, объяснявших природу вращения галактик, был продолжен. Согласно гипотезе К. Вейцмана, выдвинутой в конце 40-х годов, вращение галактик имеет космологическое происхождение; оно обязано изначальным вращательным, вихревым движениям космической среды, порожденным в том же процессе, в каком родилась сама Вселенная, и возникло ее общее расширение. В те же годы Ф. Хойл предложил гипотезу приливного происхождения вращения. По его идее, никакого вращения во Вселенной не существовало вплоть до эпохи обособления протогалактических облаков, и вот тогда приливное гравитационное взаимодействие этих облаков друг с другом и заставило их вращаться.

В 1952 г. Г.А. Гамов, создатель теории горячей Вселенной, решительно и с энтузиазмом стал на точку зрения вихревой космогонии. Он говорил тогда, что в распределении и движении галактик определенно заметны следы догалактической турбулентности и что на этом пути он видит самые заманчивые перспективы. Что же касается происхождения догалактических вихрей, то Г.А. Гамов высказал предположение, что вихри существуют во Вселенной изначальным и имеют ту же природу, что и само космологическое расширение. Как видим, точки зрения Г.А. Гамова и К. Вейцмана во многом совпадают.

В 1970 г. А.Д. Чернин предложил новую гипотезу о природе вращения галактик, согласно которой вращение галактик обязано мощным вихревым движениям, возникавшим в разрывных сверхзвуковых движениях метагалактической среды.

Сказанное относительно вихревого движения галактик, по всей видимости, может быть отнесено и к более крупным структурам Вселенной. Действительно, согласно последним данным, галактики образуют скопления, сверхскопления, а возможно и наиболее крупные образования Вселенной – клетчатые или ячеистые структуры, которые напоминают пчелиные соты или, быть может, кружева. Размеры ячеек достигают ста мегапарсеков ($\sim 10^{24}$ м) при размере видимой части Вселенной около $\sim 10^{25} - 10^{26}$ м (Гуревич, Чернин, 1983).

Мы не ставим себе целью перечислить здесь все гипотезы, объясняющие природу вращения галактик. Однако из проведенного обзора уже просматривается вполне определенная «закономерность». А именно, и И. Кеплеру, и Р. Декарту, как механикам,

было ясно, что вихревое вращательное движение не может взяться ниоткуда. Оно, в соответствии с законами сохранения, либо существует в природе, либо его нет. Ньютон – один из основателей механики, законы которой в то время, в принципе, объясняли практически все известные физические, механические и астрономические данные, действительно, *мог не видеть необходимости в вихревой гипотезе*, хотя прекрасно понимал, что вращательное движение, в отличие от поступательного равномерного движения, абсолютно. К тому же, в рамках написанных им, по сути, *линейных* дифференциальных уравнений движения, такая гипотеза является не просто «более трудной», а, как теперь ясно, практически неразрешимой. Кроме того, вихревая структура галактик была во времена Ньютона в силу «слабости» телескопов неизвестна, да и само их понятие ученым было пока не ведомо. Нельзя сбрасывать со счетов и упоминавшуюся выше борьбу научных школ Ньютона и Декарта; такая борьба во все времена накладывала значительный отпечаток на развитие всех научных направлений.

Частицы. В первой половине XX века окончательно утверждает свое положение квантовая механика. Одним из основных ее положений является понятие спина элементарной частицы как собственного момента количества движения, квантовый характер которого в долях постоянной Планка $I \approx \hbar \sim 10^{-27}$ эрг·сек постулируется. К этому времени вихревая структура галактик становится общепринятой. И проблема вращательного движения теперь уже становится *и квантовой, и космологической*.

Как известно (Ландау, Лифшиц, 1974; с. 38), «волновое уравнение Шредингера играет в квантовой механике ту же роль, что уравнение Ньютона в классической механике». При этом, в квантовой механике связь момента количества движения со свойствами симметрии по отношению к вращениям «становится в особенности глубокой, делаясь по существу основным содержанием понятия о моменте... Момент приобретает смысл квантового числа... Становится несущественным вопрос о его происхождении, и мы приходим естественным образом к представлению о «собственном» моменте, который должен быть приписан частице вне зависимости от того, является ли она «сложной» или «элементарной»» (Левич, Вдовин, Мямлин, 1971; с. 234-235). По-видимому, по этой причине, согласно обзору (Эстерле, 2003), во многих возникших независимо друг от друга теориях (Гельмгольц, Томсон, Ацюковский, Бауэр и др.) элементарные частицы, ядра атомов, атомы, молекулы и др. образования до галактик и силовых полей включительно рассматриваются как вихревые структуры среды, заполняющей Вселенную. Квантовый характер образований в таких теориях естественным образом вытекает из свойств этой среды, поскольку вихревые структуры могут иметь только такие параметры, которые допускают существование целого числа стоячих волн. Если принять, что пространство имеет свойства жидкости с очень малой вязкостью и плотностью (аналог квантовой жидкости гелия-II), то все структуры Вселенной от элементарных частиц до галактик, их скоплений и физических полей можно представить в виде вихрей (вихревых колец, вихревых нитей) этой жидкости (Madelung, 1926). При таком подходе квантовая механика, фактически, становится разделом гидродинамики, вихревые структуры в такой среде легко образуются, долго существуют, что и приводит к их накоплению.

И в этой связи, на наш взгляд, вовсе не случайно появление гипотезы Гамова-Вейцмана, авторы которой, по сути, на новом качественном уровне наших знаний о Вселенной возвращаются к идее Декарта-Канта-Лапласа и связывают природу вихревого движения во Вселенной, фактически, с процессами, объясняющими ее рождение. Другие (тоже многочисленные) теории и гипотезы вихревых движений, как нам представляется, есть обычный, во многом традиционный результат исследования, проводимый, в основном, в рамках гидродинамики.

Приведенный материал показывает, что вращательные (вихревые) движения действительно являются характерным и неотъемлемым (внутренним) свойством материи галактик $R \sim 10^{20} - 10^{22}$ м, их скоплений $R \sim 10^{23} - 10^{24}$ м и всей видимой части Вселенной $R \sim 10^{26}$ м (Комаров, Пановкин, 1984) со временем жизни около $\tau \sim 10^{10}$ лет $\sim 10^{17}$ сек и

элементарных частиц $R \sim 10^{-15}$ м, наименьшее время жизни которых, так называемых резонансов, составляет $\tau_{\min} \sim 10^{-23}$ сек.

Солнечная система. Имеющиеся данные убедительно показывают, что вращательные (вихревые) движения характерны для вещества и на «промежуточных» пространственно-временных масштабах и не зависят от его состояния. Так, на звездном уровне, например, в нашей солнечной системе планеты вращаются вокруг Солнца, их спутники – вокруг планет, а сами планеты – вокруг собственных осей вот уже в течение нескольких миллиардов лет. На планетарном уровне достаточно интенсивные вращательные движения проявляются в течение продолжительных отрезков времени в виде: 1) Циклонов ($R \sim 10^{6-7}$ м) в атмосферах Земли (рис. 1.4), Сатурна, Юпитера (Большое красное пятно Юпитера непрерывно наблюдается уже в течение более 300 лет (Незлин, 1986)) и, по-видимому, Нептуна (Орленок, 2000); 2) Замкнутых течений в мировом океане Земли, а также 3) Кольцевых (Кац, Козлов, Полетаев и др., 1989; Кулаков, 1986), вихревых (рис. 1.5) (Ли Сы-гуан, 1958; Мелекесцев, 1979; Мясников, 1999; Слезняк, 1972) и других более экзотичных (рис. 1.6) образований ($R \sim 10^2 - 10^6$ м), объединенных в пределах твердой части литосферы в орогенную планетарную систему (Шейдеггер, 1987). Результатом движения блоков твердой среды является образование дислокаций и дисклинаций. Их размеры и характерные времена изменяются в широких пределах: от микротрещин $R \sim 10^{-8}$ м, $\tau \sim 10^{-8}$ сек (Вопросы..., 2002) до очагов сильнейших

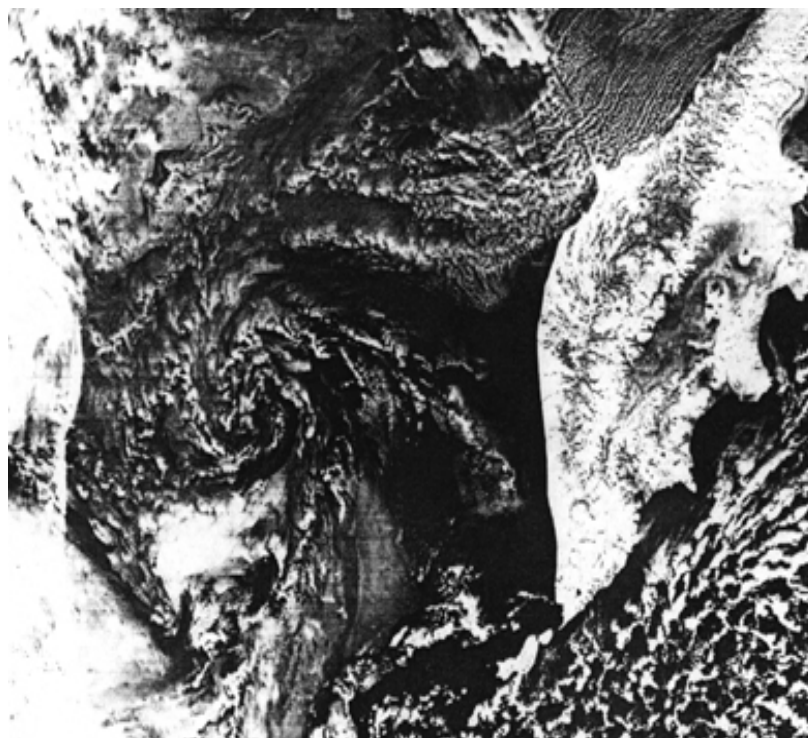


Рис. 1.4. Космический снимок циклона в Охотском море и вихревой структуры с центром в районе Ичинского вулкана на Камчатке.

землетрясений $R \sim 10^6$ м, $\tau \sim 100$ лет $\sim 10^9$ сек (Викулин, 2003) и, возможно, сейсмических поясов $R \sim 10^8$ м, $\tau \sim 10^8$ лет $\sim 10^{15}$ сек (Викулин, 2003; Викулин, Мелекесцев, 1997). Эффекты поворота макрообъемов на углы 10^0 и более (эффекты вращения) установлены и в твердых телах в лабораторных условиях (Владимиров, Романов, 1970). Как показали результаты, полученные в последние десятилетия, такие эффекты связаны с перестройкой структуры «лабораторного» твердого тела, происходящей на «мезоуровне» $R \sim 10^{-7} - 10^{-3}$ м, $\tau \sim 10^{-8}$ сек (Рыбин, 2002).

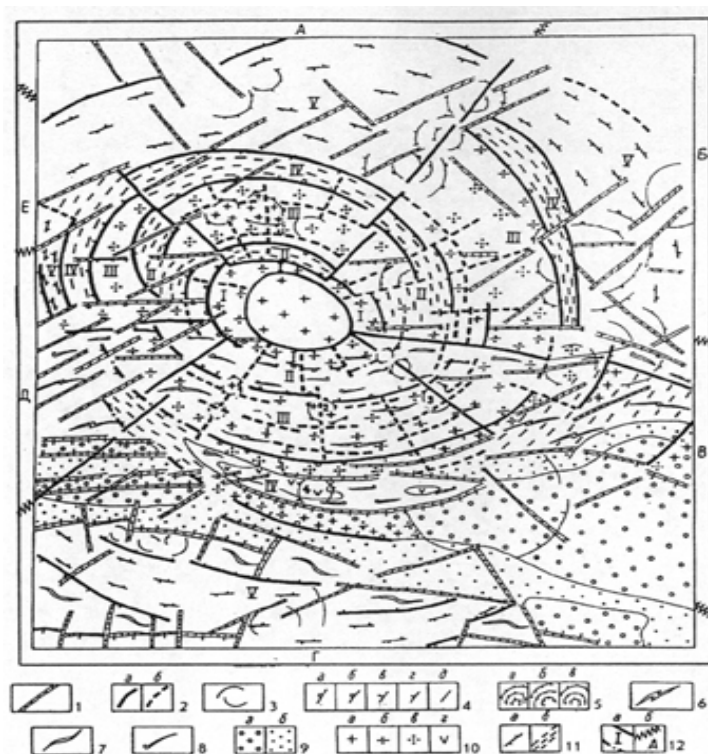


Рис. 1.5. Пример вихревой структуры центрального типа, имеющей размер около 80-100 км в диаметре; территория Соловьевского свода, Верхнее Приамурье (Мясников, 1999).



Рис. 1.6. Структура «Спираль» в районе о. Ольхон (оз. Байкал). Жесткие геологические тела (метагабброиды, ультрабазиты), а также ядра гранито-гнейсовых куполов испытывают вращение и возникают вихревые структуры. Светлое – мраморы, гранитные жилы (нитевидные белые линии), темное – гнейсы и кварциты. Аэрофото масштаба 1:5000 (Розен, Федоровский, 2000).

Одним из результатов семинара «Вихри в геологических процессах», прошедшего в марте 2003 г. в Петропавловске-Камчатском, является вывод (Викулин, 2004): несмотря на большое количество накопленных данных о вихревых структурах как на Земле, так и в солнечной системе на других планетах и их спутниках, проблема вихревых движений в геологических процессах по-прежнему находится на уровне 50^х годов прошлого столетия, когда она впервые и была обозначена Ли Сы-гуаном (1958). С тех пор появилось много данных, прямо или косвенно указывающих на существование вихревых (кольцевых) структур в литосфере, выделенных на геологическом материале всех геологических эпох на самых разных масштабных уровнях: от локального до планетарного (Волков, 2002; Кац, Козлов, Полетаев и др., 1989; Кулаков, 1986; Мелекесцев, 1979; Полетаев, 2002;

Слезняк, 1972). Существование вихревых движений в земной коре подтверждается данными прямых геодезических наблюдений (Геодезические..., 1970; Мелекесцев, 1979; Сато, 1984).

Самой большой по размеру кольцевой «дислокационной» структурой Земли является Тихоокеанское кольцо. Анализ структурных, вещественных, морфологических, геофизических и геодинамических данных позволяет сделать вывод о круговой симметрии Тихоокеанского пояса (Маслов, 1996). Вектор движения Тихоокеанской плиты испытывает периодические повороты по и против часовой стрелки при амплитуде угла вращения около 10 градусов (Берснев, 1964), что приводит к смещениям, достигающим нескольких сотен километров (Маслов, 1996). При этом периодам 30-23, 16-13, 6-0 млн. лет тому назад отвечает субширотное сжатие (вращение по часовой стрелке), периодам 22-17, 12-7 млн. лет – субширотное растяжение (вращение против часовой стрелки) (Jackson, Shaw, Bargar, 1975; Takeuchi, 1986).

В результате получены данные, которые никак не укладываются в рамки существующих представлений о движении вещества. Например, согласно (Волков, 2002) «в океанских рифтовых системах Земли существуют вихревые зоны с размерами 2-3 тыс. км каждая, поворот в которых выполняется трансформными разломами». При этом направление вращения вихрей (правое, если смотреть от центра Земли наружу) всюду одинаковое – и в Северной полярной области, и в Южной, и в четырех экваториальных областях. Удивление (по мнению Ю.В. Волкова (2002) и, на наш взгляд, вполне обоснованное) вызывает то обстоятельство, что такую ориентацию вихрей нельзя объяснить ни действием обычных сил Кариолиса – очевидно, ни с помощью уравнений гидродинамики Навье-Стокса (и Эйлера), так как эти уравнения не содержат выделенного направления.

Структура пространства-времени. В физике законы сохранения и, следовательно, уравнения движения тесно связаны с симметрией пространства-времени. Поэтому вихревые структуры необходимо рассматривать в их тесной взаимосвязи, в первую очередь, с проблемой организации структуры вещества в пространстве и во времени.

Интересный вывод содержится в работе (Берри, 1993). «Основными источниками регулярных и периодических вариаций являются процессы обращения и вращения небесных тел и их систем вокруг центров тяжести. Во время этих движений системы проходят особые области орбит и космического пространства, которые оказывают прямо или косвенно энергетические и управляющие воздействия на земные процессы (см. так же (Леви и др., 2002; 2003)). Отклик на эти воздействия зависит от частотных и энергетических характеристик земных оболочек и Земли в целом. Таким образом, при развитии литосферы в ее структуре и составе записывается не только собственная история Земли, но и история всей Вселенной. Литосфера хранит данные за последние 3,6 млрд. лет, которые могут быть использованы для построения и проверки новых и известных ранее геолого-космологических теорий. Отсутствие крупного научного направления на стыке геологии и астрономии связано с неоправданной специализацией образования в области естественных наук».

Время. После Эйнштейна неоднократно предпринимались попытки понять суть времени. Например, И. Пригожин в своей неравновесной термодинамике (Пригожин, Стенгерс, 1986) сделал шаг в правильном направлении, предсказав, что необратимость не может возникать на химическом уровне материи, а должна существовать уже на самых глубинных уровнях микромира или, с учетом выше сказанного, на самых начальных стадиях жизни Вселенной. Однако наиболее глубокое представление о времени имеют именно геологи, так как они непосредственно работают с материалом, время жизни которого огромно – миллиарды лет. И они знают, что все в этом мире изменяется – независимо от того, покоится нечто или движется – и что время не обязательно течет равномерно, существуют как медленные изменения, так и скачки, бывает и ускоренное развитие (Эстерле, 2003). Неслучайно проблеме времени в геологических процессах

посвящены обстоятельные работы, наиболее полный список которых приведен в (Симаков, 1999). Неразработанность концепции геологического времени вызвана, в первую очередь, отсутствием глубокого философского осмысления его специфической природы, с одной стороны, и кардинального отличия от обыденного (физического) времени – с другой (Симаков, 1999; с. 4). Исследования в этом направлении только-только начинаются.

Пространство. В этом направлении сделано несколько больше. Внимательное изучение поверхности Земли открывает ряд удивительных закономерностей в ее строении (Маслов, 1996). Это, например, антиподальность распределения территорий и акваторий (Каттерфельд, 1962). Специальные исследования показывают, что симметрия в распределении форм рельефа может быть более сложной (Шолпо, 1986; Уфимцев, 1988, 1992). Например, срединноокеанические хребты, островные дуги и другие крупные формы рельефа субмеридионального простирания распределены равномерно, примерно через 90 градусов (Милановский, Никишин, 1988; Шолпо, 1986; Hughes, 1973; Pan, 1985). Такие закономерности форм рельефа являются следствием распределения напряжений земной коры, возникающих под влиянием ротационных сил Земли (Воронов, 1993; Гущенко, 1979). Как частный случай этой закономерности можно рассматривать подобие контуров Срединно-Акеанического хребта и Западно-Тихоокеанской активной зоны, совпадающих при повороте на 180 градусов (Ильичев, Шевалдин, 1986). Обращает на себя внимание характерное S-образное очертание субмеридиональных форм рельефа, причем концы S приходятся на полюса, а его средняя часть проходит примерно по Тетису, «который всегда был ослабленной зоной земной коры» (Фурманье, 1971; с. 86). Об S-образном изгибе берегов Атлантического и Тихого океанов писали (Личков, 1931; Haveman, 1929), связывая с ним относительный левый сдвиг северного и южного полушарий. Относительный сдвиг полушарий вдоль субэкваториальной зоны разломов отмечался и еще раньше (Hochstetter, 1886). Закономерности современного распределения крупных форм рельефа, видимо, не случайны. В работе (Берсенев, 1964) приводятся данные, согласно которым размещение континентов относительно оси вращения было иным в конце Протерозоя, но также отражало вполне определенный порядок. В работе (Kanasewich, Havskov, Evans, 1978) показана высокая степень пространственной организации лика планеты для всего Фанерозоя.

Согласно (Шолпо, 2001), в настоящее время проблема организации структуры вещества применительно к вихревым образованиям в геологических процессах, протекающих на Земле и других космических телах, привлекает внимание все большего числа геологов, геофизиков и ученых других специальностей. Черты закономерной упорядоченности разного порядка и ранга обнаруживаются от глобальных масштабов до локального устройства сравнительно небольших регионов. Симметрии, антисимметрии, подобию обнаруживаются на разных масштабных уровнях. И, пожалуй, наиболее существенно то, что этот феномен глобальной упорядоченности установлен не только для поверхности твердой Земли – рельефа, но с достаточной надежностью прослежен в более глубокие оболочки планеты: литосферу, верхнюю мантию, и с меньшей уверенностью до границы с внешним ядром. Можно считать установленным, что структурная организация Земли наиболее полно отвечает симметрии куба. На сегодняшний день обобщено и сведено в целостную картину достаточно большое количество фактических данных, которые демонстрируют со всей очевидностью упорядоченную структурную организацию Земли. Не менее важно и то, что подобный феномен установлен на всех планетах земной группы. Это свидетельствует о том, что Земля, по крайней мере, по этому признаку – структурному устройству, не является уникальным объектом, а принадлежит к семейству околосолнечных твердотельных планет. Надо бы пытаться, как бы это ни было трудно, найти механизмы и физически обосновать их, чтобы понять, как из первичного, неоднородного и, скорее всего, хаотичного тела возникла сегодняшняя гармонично устроенная Земля и другие космические объекты.

Вихри – так что же это такое? Как видим, проблема вихревых структур в геологических процессах, по сути, является составной и неотъемлемой частью более общей задачи о вихревых движениях материи вообще. При этом каждая из составляющих задачи – будь то проблемы возникновения галактических вихрей, существования спина у элементарных частиц или генезиса вихревых структур в геологических процессах, имеет свои отличительные стороны, которые «пронизаны» для них общим и единым типом движения – вихревым вращением. Отличительной особенностью вихревого движения, по сравнению с поступательным, является его способность преобразовывать тепловую энергию непосредственно в кинетическую энергию движения потока в пространстве, что на практике реализуется в теплогенераторах (Потапов, Фоминский, Потапов, 2000). Данные многочисленных наблюдений показывают, что при вихревом движении при определенных условиях происходят очень интересные и во многом пока не понятные явления: свечение потока, в том числе инфракрасное (Большое Красное Пятно Юпитера!) и микроволновое (белые пятна Сатурна?) излучения; превращение массы в энергию; движение со сверхсветовыми скоростями; изменение веса гироскопа в зависимости от скорости и направления его вращения; уменьшение трения при увеличении скорости потока в канале и отрицательное сопротивление (т.е. засасывание в канал) после превышения некой критической скорости; в некоторых случаях струя стремится прийти во вращение даже без помощи кариолисовых сил и др. (Потапов, Фоминский, Потапов, 2000).

Относительно природы вихревых движений материи в соответствии с приведенными выше данными и обзором можно высказать следующее суждение. Гипотез, пытающихся объяснить вихревые движения, появилось уже достаточно много. Однако обращает на себя внимание вполне определенная закономерность, согласно которой через то или иное время на качественно новом уровне наблюдается возврат к физически очевидной идее об абсолютности вращательного движения. Поэтому, продолжая цепочку гипотез Декарта – Канта-Лапласа, Г.А. Гамов, как нам представляется, с неизбежностью и пришел к выводу о существовании «догалактической турбулентности». Из самых общих соображений очевидно, что в любой области Вселенной должны иметь место вращения всех масштабов: галактических, звездных, планетарных и т. д. до элементарных частиц включительно, что, по-видимому, и позволяет принять гипотезу о «равномерной завихренности» пространства. Такое фундаментальное свойство, как следует из гипотезы Г.А. Гамова, могло быть «придано» материи в момент Большого взрыва.

Резюме. Дать ответы на обозначенные вопросы и решить поставленные проблемы, как показывают приведенные выше данные и обзор, по-видимому, можно только рассматривая их во взаимосвязи и на качественно новом уровне. В рамках такого нового подхода необходимо будет учесть *все* особенности вихревых (вращательных) движений в пределах *всего* наблюдаемого масштаба: $\Delta R \sim 10^{40}$ м, $\Delta t \sim 10^{40}$ сек, $\Delta I \sim 10^{100}$ эрг·сек. Такой путь решения проблемы *с точки зрения физики*, очевидно, будет испытывать наибольшие трудности при описании именно той составляющей этого сложного и многогранного вихревого движения материи, которая должна будет объяснить существование и генезис *вихревых структур в геологических процессах*.

В рамках такого нового подхода обязательно надо будет учесть и «сложившийся» уже опыт борьбы научных школ, который во все времена, начиная с Декарта-Ньютона (см. выше) и до настоящего времени (Потапов, Фоминский, Потапов, 2000), в значительной степени влияет на решение проблемы вихревых движений материи - по сути, тормозит.

В этой связи как не вспомнить противоборство других научных школ.

В 1987 г. научный мир отметил 300-летие механики Ньютона. Трудно перечислить все те достижения, которые были достигнуты человечеством с помощью этой фундаментальной физической теории. Тем не менее, в конце XIX века основы механики Ньютона были Э. Махом совместно с другими исследователями подвергнуты серьезной критике. Э. Мах выдвинул принцип (впоследствии названный его именем), согласно

которому силы инерции в механике появляются при ускоренном движении относительно центра масс Вселенной. Эта критика оказалась столь плодотворной, что именно под ее влиянием возникла сначала бессильная механика Герца, а затем релятивистская механика Лоренца-Эйнштейна и общерелятивистская механика Эйнштейна.

После того, как в начале XX века были сформулированы основные принципы и уравнения квантовой механики, физики-теоретики разделились на две группы: «детерминистскую - Бог не играет в кости!» группу А. Эйнштейна (М. Планк, А. Эйнштейн, Л. де Бройль, Э. Шредингер) и «вероятностную» - Н. Бора (Н. Бор, В. Гайзенберг, Н. Борн, П. Дирак). Сам факт возникновения этих групп характеризует глубокий кризис (не забвение – уже прогресс!) в понимании физической реальности, который длится вот уже более полувека. Согласно (Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993), вероятностный характер описания квантовой теории связан с тем, что материя представляет собой имеющие конечные размеры сгустки поля инерции, которые, по сути, представляют собой *поля кручения*. И так, опять в очередной раз «круг замыкается» и опять возвращаемся к идее об абсолютности вращательного движения: «свободные» вихри Декарта, взаимодействующие вихри Гельмгольца, вихревые атомы Кельвина, квантовая механика – спин, инерционные поля кручения! Таким образом, теория инерционных полей кручения, по мнению (Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993), «решает многолетний спор между А. Эйнштейном и Н. Бором в пользу Э. Эйнштейна, отказываясь от косвенного описания реальности и восстанавливая образное мышление в физике микромира» и, добавим – в вихревой геодинاميке литосферы.

Взгляд геолога: вращательные движения и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли (Мелекесцев, 2004). С разнообразными проявлениями вращательных движений и вихревых структур человек познакомился буквально с момента своего появления как вида. При употреблении в пищу морских и наземных моллюсков древний человек не мог не обратить внимание на спиральное (право- и левозакрученные раковины) внутреннее строение раковин многих из них, которые к тому же использовались им еще и в качестве одних из первых украшений. Столь же рано человек непосредственно испытал воздействие водяных вихрей - водоворотов на реках, которые ему приходилось преодолевать, а позднее по ним и плавать. Сталкивался он и с мощными воздушными вихрями – смерчами, хотя вряд ли предполагал общую вихревую природу смерчей и водоворотов. Причем очень давно человек подсознательно видел в вихрях и нечто мистическое: недаром спиральные вихри часто присутствуют на древних наскальных рисунках и орнаментах.

С античных времен и позже с развитием механики, математики, астрономии вихри и вихревые движения уже использовались для различных технических целей, создания механизмов и приборов, построения космогонических гипотез. Регулярные метеорологические наблюдения позволили открыть, описать и объяснить происхождение гигантских спиральных воздушных вихрей – разнообразных типов циклонов и антициклонов. Как и все названные выше проявления вращательных движений и вихревых структур циклоны и антициклоны тоже обязаны своим возникновением именно ротационному эффекту, обусловленному быстрым вращением Земли. В свою очередь, через посредство глобальной циркуляции атмосферы и деятельность ее наиболее активных компонентов – циклонов и антициклонов – вращательные движения получили возможность влиять на весь комплекс физико-географических условий, динамику всех компонентов природной среды, рельефообразующие процессы и биосферу.

Что касается воздействия ротационного эффекта на собственно геологические процессы, имевшие место на Земле, то здесь существовало негласное табу, основанное на представлении о земной поверхности и верхней оболочке планеты как тверди. Твердь же, по определению, не должна была подвергаться воздействию от вращения Земли. В глобальном масштабе исключение допускалось лишь для работы текучей воды по

известному закону Бэра-Бабинэ. Это правило, согласно которому реки, текущие на равнинах Северного полушария, подмывают преимущественно правые берега, а Южного – левые берега. В основе его лежит закон Кориолиса, утверждающий, что всякое тело, движущееся у поверхности Земли, независимо от направления движения, отклоняется в Северном полушарии вправо, в Южном – влево, вследствие вращения Земли с запада на восток.

Запрет о влиянии ротационного эффекта на другие геологические процессы был нарушен только в первой половине XX века. Этому способствовало несколько благоприятных факторов: 1) создание относительно точных и достоверных географических и геологических карт на обширные территории земного шара, 2) детальные геологические исследования и 3) высокоточные геодезические измерения.

Так, практически одновременно в конце двадцатых-начале тридцатых годов XX века появились две работы.

В первой из них молодой китайский геолог Ли Сы-гуан в своей публикации 1928 г. (Lee J.S., 1928) впервые выделил и описал вихревые структуры в геологических разрезах в Китае. Это были преимущественно вихревые структуры с горизонтальной осью вращения. Изложенные там представления получили дальнейшее развитие в монографиях Ли Сы-гуана "Геология Китая" (1952) и "Вихревые структуры Северо-Западного Китая" (1958). Однако в СССР работы Ли Сы-гуана были встречены неоднозначно, что хорошо видно из "Предисловия" и раздела "От редактора" ко второй из этих книг. В "Предисловии" его автор – Министр геологии и охраны недр СССР П.Антропов писал: "Мы хорошо сознаем, что далеко идущие теоретические выводы, которые делает Ли Сы-гуан, такие, например, как вращение крупных масс земной коры в связи с вращением Земли, не могут быть доказаны только экспериментальным путем. Для этого необходимо проделать еще очень большую исследовательскую работу..." (с.5). Научный редактор монографии профессор В.Павлинов отметил, что: "Вопросам развития структур в геосинклинальных или платформенных условиях, как они понимаются советскими геологами, Ли Сы-гуан отводит ...скромное место..., так как автор...придерживается в основном идей А. Вегенера (в СССР они в то время, по идеологическим соображениям, отвергались, т.к. А. Вегенер симпатизировал фашистской идеологии) о горизонтальном дрефте материков... На современной стадии развития геотектонических знаний пока невозможно безапелляционно решить вопрос о справедливости всех заключений автора в отношении причин и механизма формирования складчатых и разрывных структур, возникших в результате вращательных движений отдельных масс земной коры" (с.7).

В 1933 г. была опубликована работа С.Фузыхара и др. (Fujiwhara et al., 1933), подготовленная на основе данных результатов повторных геодезических работ в 1884-1889 гг. и 1924-1925 гг. в районе залива Сагами на Тихоокеанском побережье о.Хонсю (Япония). На помещенном там рисунке (рис. 1.7) впервые было показано вращение крупного блока земной коры вокруг залива Сагами. При этом весьма интересно, что вторая (1924-1925 гг.) серия измерений была проведена сразу после знаменитого мощнейшего (М 8.2) землетрясения 1923 г. с эпицентром в заливе Сагами, откуда тогда подводным обвалом было удалено около 70 км³ осадков, а дно самого залива углубилось на 400 м.

Следующий крупный вклад в проблему изучения вихревых структур земной коры был сделан в 60-70-ых годах XX в. после составления уточненных батиметрических карт океанов и массового распространения космических изображений земной поверхности. Именно тогда исследователи самых разных специальностей смогли реально "увидеть" из космоса детальную структуру спиральных вихрей - циклонов, включая тропические циклоны – тайфуны, смотрящиеся наиболее эффектно. В то же время были открыты с помощью спутников спиральные вихри в океанах – ринги. Их диаметр составлял 300-500 км, а длительность существования достигала 3-4 лет. По сравнению с воздушными

вихрями (циклонами) эти водяные вихри (ринги) жили примерно на два порядка дольше, что хорошо коррелируется с разницей (тоже на 2 порядка) вязкости воздуха и воды.

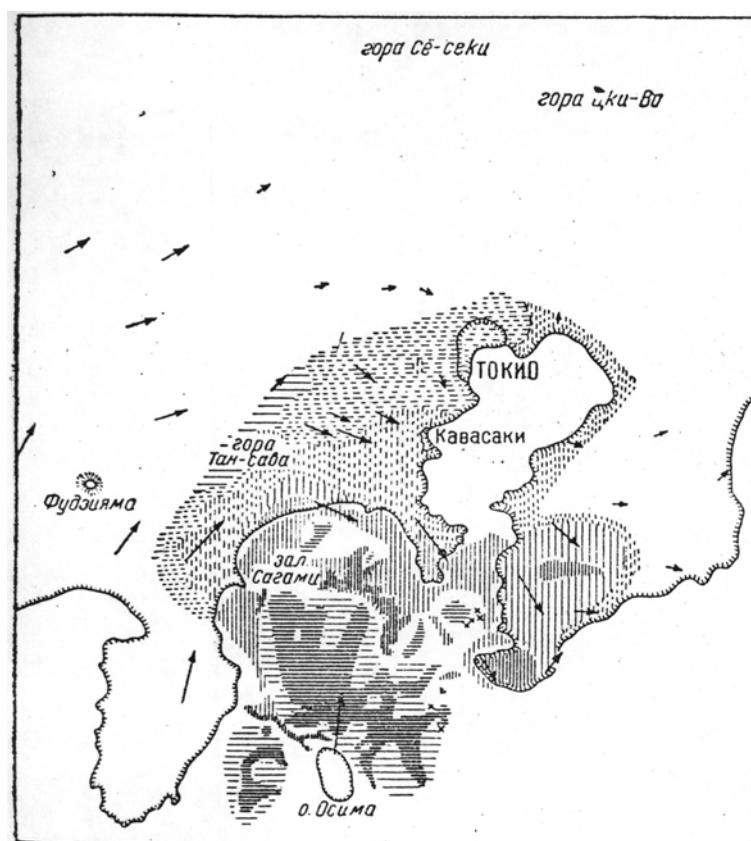


Рис. 1.7. Вращение земной поверхности вокруг залива Сагами (о.Хонсю, Япония) после катастрофического (М 8.2) токийского землетрясения 1923 г. Вертикальные штрихи обозначают районы поднятия, горизонтальные – районы опускания. Направление и величина стрелок в условном масштабе показывают направление и величину перемещения точек. По Fujiwhara et al., 1933 (из работы Ли Сы-гуана, 1958).

Кроме того, ряд исследователей обратил внимание на большое сходство изображений облачных систем циклонов с рисунком наземных геологических структур (Назиров, 1975 и др.). Распределение вулканических образований, созданных за последние 50-100 млн. лет на дне океанов, позволило создать вихревую вулканическую гипотезу (Мелекесцев, 1979; 1980), так как многие вулканы там приурочены к спиральным вихревым структурам, очень напоминающим циклоны. Только вместо паровых облаков у них "облака" как бы выплавлены из камня.

С помощью космических аппаратов была выявлена гигантская вихревая структура на Марсе (рис. 1.8). Она охватывает большую часть северного полушария этой планеты. На Юпитере активной вихревой структурой является Большое Красное пятно диаметром ~40 тыс. км. При этом необходимо отметить, что на медленно вращающихся планетах вихревые структуры отсутствуют. Их нет, например, на Меркурии (период вращения 59 земных сут.), Венере (период вращения 243 сут.). Наша Луна тоже лишена следов вихревых структур по аналогичной причине.

Таким образом, полученные в XX в. данные уже сейчас позволяют сделать вывод о большом воздействии ротационного эффекта помимо физико-географической среды на формирование геологических структур, магматическую деятельность и распределение вулканов на быстро вращающихся планетах, включая Землю. Правда, показать с помощью

точных расчетов, как и с помощью какого механизма все это происходило и происходит, пока еще не удалось.

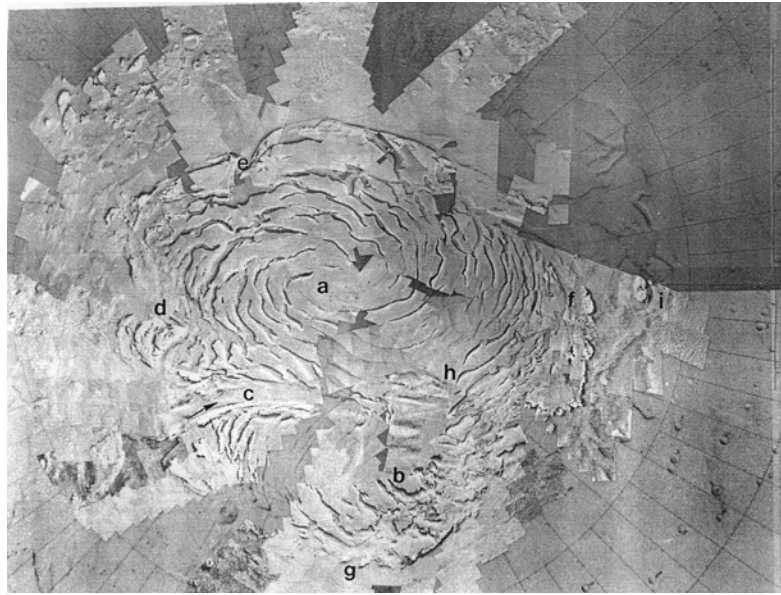


Рис. 1.8. Выраженные в рельефе следы планетарных вихревых структур в Северном полушарии Марса. По (Whitney, 1979).

Новый диалог с Природой. Единство природы прослеживается во всем пространственно-временном масштабе от микромира - элементарные частицы, ядра: $R \sim 10^{-15-18}$ м, $\tau_{\min} \sim 10^{-23}$ сек, до макромира - звездные системы, галактики, наблюдаемая часть Вселенной: $R \sim 10^{26}$ м, $\tau \sim 10^{10}$ лет. Действительно, во всем ряду физических объектов, имеющих характерные размеры R , времена τ , массы M , плотности ρ , температуры T и давления P , изменяющиеся в пределах многих десятков порядков по величине:

- элементарные частицы: $\tau_{\min} \sim 10^{-23}$ сек, $R \sim 10^{-15-18}$ м, $M_{\text{электрон}} \sim 10^{-31}$ кг
- ядра атомов: $\rho \sim 10^{17}$ кг/м³,
- атомы – молекулы,
- макротела, вещество (кристаллы, жидкость, газ, плазма),
- планеты: $R \sim 10^4 - 10^5$ м, $\tau \sim 10^9 - 10^{10}$ лет, $\rho_{\text{средняя}} \sim (0,7 - 5,5) \cdot 10^3$ кг/м³,
- звезды (Солнце): $R \sim 10^9$ м, $\tau \sim 10^{10}$ лет, $M \sim 10^{30}$ кг, $T \sim 10^7$ К, $P \sim 10^{11}$ атм, в том числе нейтронные: $\rho \sim 10^{17}$ кг/м³,
- галактики: число звезд $\sim 10^9 - 10^{12}$, $R \sim 10^4$ пс $\sim 10^{20}$ м, $M \sim 10^{41}$ кг,
- Вселенная: $R \sim 10^{26}$ м, $\tau \sim 10^{10}$ лет, число галактик $\sim 10^{11}$, $M \sim 10^{52}$ кг,

выделено только четыре (!) вида фундаментальных взаимодействия, все остальные сводятся к ним:

- сильное (ядра, $R \sim 10^{-15}$ м, $\tau \rightarrow \infty$) ~ 1 ,
- электромагнитное ($R \rightarrow \infty$) $\sim 10^{-3}$,
- слабое (превращение элементарных частиц, $R \sim 10^{-16}$ м, $\tau \sim 10^{-8}$ сек) $\sim 10^{-14}$,
- гравитационное ($R \rightarrow \infty$) $\sim 10^{-40}$.

При этом если в ядрах действует только сильное взаимодействие, в мире элементарных частиц – только слабое и электромагнитное, в веществе – только электромагнитное и гравитационное, в масштабе видимой части Вселенной – только гравитационное, то внутри нейтронных Звезд – одновременно гравитационное и сильное и, по-видимому, в некоторых их частях слабое и электромагнитное.

Следует отметить, что согласно данным работ (Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Шипов, 2002), все четыре фундаментальных взаимодействия сводятся к одному, свойства которого определяются полями кручения.

Как видим, мир, несмотря на его кажущееся многообразие, управляется небольшим числом физических законов, являющимися следствиями симметрии пространства-времени. Именно действием этих законов и следует объяснять образование и Солнца и Солнечной системы (закон Бодя, данные в табл. 1.1 и на рис. 1.9). Закономерное распределение плотности вещества в системах Земля – Луна и ядро Юпитера – его спутники (рис. 1.10) указывает на то, что и образование планет солнечной системы происходило по вполне определенным закономерностям.

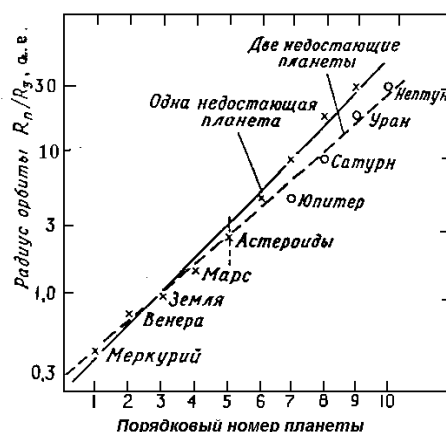


Рис. 1.9. Радиусы орбит планет приближенно описываются законом геометрической прогрессии (закон Бодя).

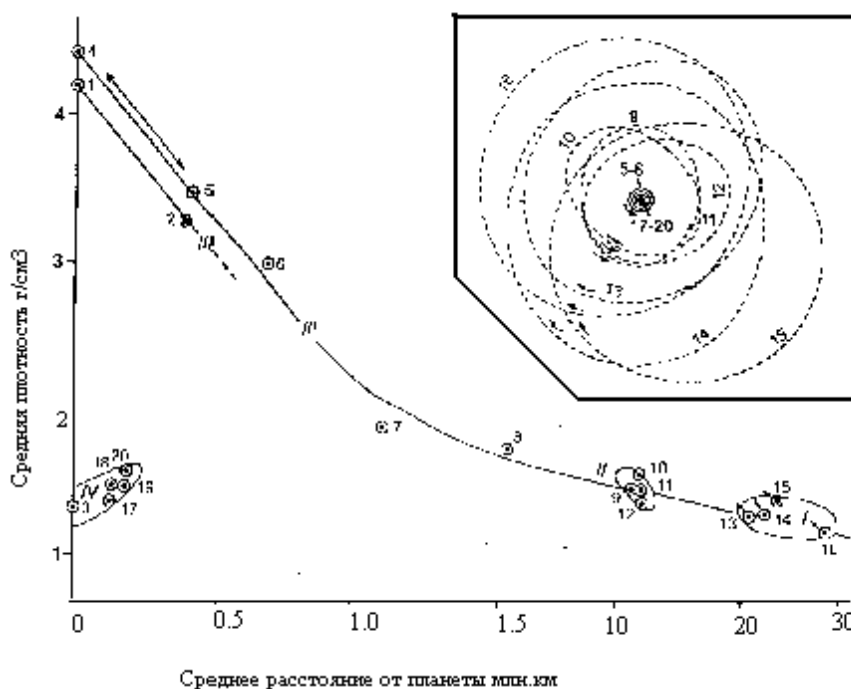


Рис. 1.10. Диаграмма распределения плотности в системах Земля – Луна и ядро Юпитера – его спутники в зависимости от удаленности спутников от материнских планет (средних радиусов орбит) (Маракушев, Моисеенко, Сахно, Тарарин, 2000). 1 – Земля (плотность Земли (1) и ядра Юпитера (4) пересчитаны на нулевое давление); 2-Луна; 3-5 – Юпитер (3), его железо-силикатное расплавленное ядро (4) и ближайший спутник Ио (5); 6-20 – другие спутники Юпитера, рассматриваемые в тексте (табл.3). Направление движения спутников обозначено на схеме их орбит стрелками. I-IV – группа спутников в предполагаемой последовательности их образования; I-II – удаленные спутники с обратным (I) и нормальным (II) движением по орбитам; III-IV – околопланетные массивные плотные спутники (III) и спутники низкой плотности, обрамляющие кольцевую систему планеты (IV).

Изучение таких физических закономерностей на примере планеты Земля и является предметом «Физики Земли».

При этом не нашли пока своего научного объяснения следующие важные экспериментально установленные факты, имеющие непосредственное отношение к процессам образования как Солнечной системы, так и, возможно, Вселенной в целом:

- Масса Солнца составляет 99,9% всей массы солнечной системы, в то время как планеты обладают 98% ее общего момента количества движения, при этом большая часть момента «принадлежит» планетам-гигантам. Не ясно, каким образом момент передается (или передался в момент образования системы) от центрального тела к внешним частям системы.

- Во время формирования планет внутри солнечного облака слагающее его вещество должно было сильно дифференцироваться по химическому составу, в результате чего Нептун и Уран оказались состоящими из элементов II группы, Сатурн и Юпитер – из элементов I группы, а планеты земной группы – из элементов III группы. Механизм такой химической дифференциации не ясен.

- Понимание природы вихревых движений во всем масштабе движений от галактик до элементарных частиц может привести к появлению новых физических представлений о свойствах пространства – времени.

Фактически, речь должна идти о формировании языка общения, на котором мы сможем вести *«Новый диалог с Природой»* (определение И. Пригожина и И. Стенгерс (1986)), задавая «рабочие» вопросы и получая адекватные ответы (Тимашев, 2003).

В этой связи весьма интересным представляется новый подход к Солнечно-Земным связям, развиваемый К.Г. Леви с соавторами (Леви и др., 2002; 2003).

Создан принципиально новый курс лекций, не имеющий аналогов, как в нашей стране, так и, по-видимому, за рубежом: «Современная геодинамика и гелиогеодинамика». Этот курс (Леви и др., 2003; с. 3) «...призван ознакомить студентов с современными представлениями о геодинамике планеты, взаимосвязями различных природных и социальных процессов и причинами, порождающими экстремальные ситуации в природе и социуме с оценкой роли влияния Солнца на происходящие в окружающей среде изменения. Гелиогеодинамика – это самостоятельное естественнонаучное направление, изучающее взаимодействие геосфер Земли между собой и внешним миром. Основной целью гелиогеодинамики является, прежде всего, выявление периодичности возникновения экстремальных природных ситуаций и прогноз тех явлений, которые могут иметь место в случае неблагоприятного развития процессов не в одной, а одновременно в нескольких геосферах и в связи с проявлением солнечной активности. При этом авторы полагают, что в природе катастроф не бывает и что под термином «катастрофа» нужно понимать лишь социально-экономическую оценку потерь в результате возникновения той или иной экстремальной природной ситуации. Окружающий нас мир чрезвычайно сложен по своей внутренней структуре, а взаимосвязи между экстремальными событиями и явлениями, происходящими вокруг нас, организованы иерархично и системно».

В результате большой работы коллектива авторов был проведен широкомасштабный сбор хронологических данных об аномальных явлениях в природе и социуме на большой по площади территории Сибири и Монголии в течение времени, превышающем последние 500 лет нашей истории (Леви и др., 2003; с. 374). «Не все закономерности развития процессов выявлены, не все сопоставления осуществлены, но сделано главное – положено начало планомерному сбору сообщений о тех или иных аномальных явлениях. Эта работа продолжает оставаться необходимой, несмотря на развивающиеся исследования в области мониторинга различных природных процессов так же, как и наблюдения за солнечными пятнами и вычисление чисел Вольфа,

отражающих вариации солнечной активности. Наверное, не везде нам удалось убедить читателя в справедливости нашего взгляда на всеобъемлющее влияние Солнца на все, что происходит на нашей матушке – Земле, но начатые исследования мы намерены продолжать в этом направлении. Важным во взаимоотношениях в системе «Солнце-Земля» является постоянное запаздывание реакции земных процессов на солнечное воздействие. Складывается впечатление, что природная среда накапливает в себе это воздействие или объем солнечной энергии до критических значений, после которых она не способна удерживать эту энергию в себе и реагирует возникновением аномальных природных явлений. Это проявление своеобразной «упругости» природной среды по отношению к солнечному воздействию».

Выявление физических механизмов, обеспечивающих такого рода комплексные взаимосвязи между геофизическими и социальными явлениями, по-видимому, дело будущего.

Однако существование взаимосвязей между этими явлениями и активностью Солнца, по-видимому, не вызывает сомнений и наводит на мысль о моментной, вихревой природе таких физических механизмов. Действительно, с одной стороны, согласно (Сидоренков, 2002), все геофизические явления в той или иной степени взаимосвязаны с режимом вращения Земли и его нестабильностями. С другой - согласно (Тимашев, 2003; с. 115-117), «...11-летняя цикличность обусловлена не собственной внутренней динамикой Солнца как звезды (трудно на основе собственных параметров Солнца сконструировать соответствующее «характерное время»), а со сложной динамикой всей солнечной системы. Еще в 1965 г. путем компьютерных расчетов было показано, что центр Солнца движется относительно центра масс солнечной системы (барицентра) по сложной траектории и может удаляться от барицентра на расстояния, превышающие удвоенный солнечный радиус (Долгачев, Доможилова, Хлыстов, 1991). Причина этого состоит в том, что на долю Солнца приходится только около 2% общего момента количества движения солнечной системы, хотя массовая доля составляет 99,9%. Однако такое сложное движение центра масс Солнца (его характерный период составляет 179 лет), обычно, не связывают с иницированием 11-летнего цикла, несмотря на то что период обращения Юпитера, наиболее критичной в данном рассмотрении планеты, составляет около 11 лет. (На долю Юпитера приходится более 60% орбитального углового момента (табл. 1.2, с. 37) и около 80% собственного вращательного момента в солнечной системе (табл. 1.3, с. 38) – А.В.). Согласно (Тимашев, 1991; 1993) соответствующие оценки необходимо проводить, учитывая, что Солнце – деформируемая система. При сложном движении центра масс солнечного шара относительно барицентра вещество Солнца должно проявлять себя как вязкая сжимаемая среда, подверженная приливным воздействиям. Следует ожидать некоторого деформирования формы Солнца с изменением плотности приповерхностных участков, а также генерации противоположно направленных вихревых движений. Интенсивность генерации вихрей зависит как от вектора ускорения центра масс Солнца относительно барицентра, так и от производной этого вектора по времени. Можно полагать, что именно такие вихри иницируют появление солнечных пятен».

Вихревые движения оказывают решающее влияние на жизнь Солнца, включая и его активность, и согласно данным работы (Потапов, Фоминский, Потапов, 2000).

Предмет физики Земли. 1. Земля в Солнечной системе. Планеты земной группы и планеты - гиганты, их отличительные признаки. Для образования солнечной системы не требовалось каких-то особых условий. Тем самым можно принять, что даже в нашей Галактике имеются еще миллионы планетных систем, подобных солнечной. И такие системы в последние годы обнаружены (Леви и др., 2002).

Значения плотностей планет и радиусов их орбит приведены в табл. 1.1 и на рис. 1.9. Последовательность радиусов планетных орбит приближенно описывается геометрической прогрессией - так называемым законом Бодэ или Бодэ-Тициуса:

$$R_n = R_0 m^n, \quad (1.1)$$

где R_0 – примерно равен половине радиуса орбиты Меркурия, R_n - радиус n-ой (считая от Солнца) планеты, $m = 1,89$. Закон Бодя сыграл важную роль в открытии астероидов, или малых планет, которые группируются в районе "недостающей планеты" (между Марсом и Юпитером рис. 1.9, 1.11).

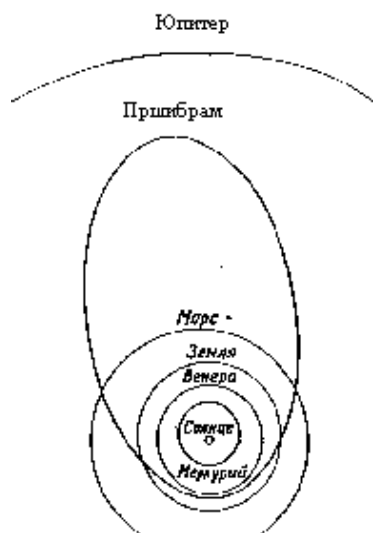


Рис. 1.11. Орбита метеорита, упавшего в 1959 г около Пришбрама (Чехословакия)

На рис. 1.10 представлена диаграмма распределения плотности в системах Земля – Луна и ядро Юпитера – его спутники в зависимости от удаленности спутников от материнских планет (средних радиусов орбит). Данные, приведенные в табл. 1.1 и на рис. 1.9, показывают, что образование и планет солнечной системы и их спутников происходило по вполне определенным законам.

Другая важная особенность орбитальных движений в солнечной системе - это распределение момента количества движения (табл. 1.2; 1.3). Все планеты обращаются

Таблица 1.2. Распределение орбитального углового момента планет в солнечной системе.

Планета	Масса, $M_3 = 1$	Радиус орбиты, $R \cdot 10^6$ км	Период сидерический, τ , сутки	τ , 10^8 сек	$\omega = 2\pi/\tau$, 10^9 сек $^{-1}$	Момент, $\overline{M}$ 10^{50} г·см 2 ·сек $^{-1}$	Момент, $\overline{M}$ [%] (n) (k)
Меркурий	0,053	57,91	87,969	0,07601	826,2	0,000008777	0,00028 (9) (7)
Венера	0,815	108,21	224,701	0,1941	323,5	0,0001845	0,0057 (6) (-)
Земля	1,0	149,60	365,256	0,3156	200,0	0,00002675	0,00085 (8) (6)
Марс	0,107	227,9	686,98	0,5935	105,8	0,00003514	0,0011 (7) (3)
Юпитер	318,0	778,3	4332,6	3,743	16,78	1,932	61,333 (1) (1)
Сатурн	95,22	1428	10759,2	9,296	6,756	0,7841	24,892 (2) (2)
Уран	14,55	2872	30687	26,51	2,369	0,1699	5,394 (4) (-)
Нептун	17,23	4498	60184	52,00	1,208	0,2517	7,990 (3) (3)
Плутон	0,9	5910	90700	78,36	0,8014	0,0151	0,479 (5) (4)
						$\Sigma = 3,15$	100,00%

Примечание: $M_3 = M_{\text{Земли}} = 5,977 \cdot 10^{27}$ г., (n) – номер в порядке убывания значения момента, (k) – номер в порядке убывания значения момента с исключенными данными для Венеры и Урана. $\overline{M} = MR^2\omega$ – орбитальный момент планеты с массой M, орбитальным радиусом R и угловой скоростью вращения $\omega = 2\pi/\tau$ вокруг Солнца.

вокруг Солнца, а их спутники вокруг планет в одном направлении; их орбиты близки к круговым и лежат в одной плоскости. Имеются лишь несколько исключений, по-видимому, связанных между собой. Это Плутон, орбита которого наклонена к плоскости земной орбиты (эклиптике) под углом 17^0 и на столько вытянута, что пересекает орбиту Нептуна (рис. 1.1) и два спутника Нептуна - Тритон, обращающийся вокруг Нептуна в обратную сторону, и Нереида, орбита которой очень сильно вытянута. Имеются спутники с обратным движением у Юпитера и Сатурна.

Таблица 1.3. Распределение собственного вращательного момента планет в солнечной системе.

Планета	Масса, $M_3 = 1$	Экваториальный радиус, r км	Период вращения, T вокруг оси	$\Omega = 2\pi/T$, 10^4 сек^{-1}	Момент, $\bar{M}$ $10^{46} \text{ г см}^2 \text{ сек}^{-1}$	Момент, $\bar{M}$ [%] (n) (k)
Меркурий	0,053	2420	58,7 дня	0,0013	0,00000002	10^{-5} (8) (7)
Венера	0,815	6200	242,98 дня*	0,0003	- 0,000000006	$4 \cdot 10^{-6}$ (9) (-)
Земля	1,0	6378,39	23 ч 56 м 4,1 с	0,729	0,0000018	$0,9 \cdot 10^{-3}$ (6) (5)
Марс	0,107	3400	24 ч 37 м 22,6 с	0,754	0,00000006	$3 \cdot 10^{-5}$ (7) (6)
Юпитер	318,0	71400	9 ч 50 м 30 с	1,774	1,72	78,7 (1) (1)
Сатурн	95,22	60400	10 ч 14 м	1,706	0,35	16,0 (2) (2)
Уран	14,55	23800	0,89 дня*	0,817	- 0,00004	0,002 (5) (-)
Нептун	17,23	22300	0,53 дня	1,365	0,1	4,6 (3) (3)
Плутон	0,9	3000	6,39 дня	0,0011	0,0151	0,7 (4) (4)
					$\Sigma = 2,185$	100,00%

Примечание: $M_3 = M_{\text{Земли}} = 5,977 \cdot 10^{27} \text{ г.}$, (n) – номер в порядке убывания значения момента, (k) – номер в порядке убывания значения момента с исключенными данными для Венеры

и Урана. $\bar{M} = I\Omega$ – момент, $I = 8/15\pi r^5$ – момент инерции планеты, $\rho = \frac{M}{4/3\pi r^3}$ – ее

средняя плотность

Наша собственная планета - Земля - изучена в геофизическом отношении несравненно лучше всех других планет. Не составляет особого труда оценить те параметры для Меркурия, Венеры и Марса, которые изучены для Земли. Тем самым закладываются основы использования геофизических методов к изучению планет земной группы в близком будущем.

Важнейшей задачей физики планет является изучение планет-гигантов: Юпитера, Сатурна, Урана, и Нептуна. В этих планетах сосредоточена основная доля массы планет Солнечной системы и практически весь ее момент количества движения. Тем самым изучение планет-гигантов выдвигается как первоочередная задача. В последние десятилетия, в результате данных, полученных американскими спутниками, запущенными в сторону планет – гигантов, накоплен большой материал и по планетам – гигантам и их спутникам.

2. Предмет и задачи дисциплины, история ее установления как типично пограничной науки. Связь с другими науками. Роль отечественных и зарубежных ученых. В дальнейшем под физикой Земли мы будем понимать тот раздел теоретической геофизики, который занимается изучением физического состояния и физических свойств материала твердой Земли в целом и крупных ее частей, а также рассматривает физические и физико-химические процессы, протекающие в недрах земного шара и обусловившие современную структуру нашей планеты.

Вопросы, изучаемые физикой Земли, давно привлекали внимание исследователей. Не останавливаясь на фантастических взглядах о строении и развитии Земли, господствовавших в древности и средние века, отметим, что весьма интересные мысли по этому вопросу были высказаны на рубеже XV и XVI веков Леонардо да Винчи. В частности, им была предложена гипотеза, сходная с гипотезой изостазии. Вопрос о фигуре Земли, как фигуре равновесия вращающейся жидкой массы, был впервые рассмотрен Ньютоном, но после известной работы Клеро по этому труднейшему вопросу было сделано очень мало до знаменитых исследований известного русского математика А.М. Ляпунова в конце XIX - начале XX веков.

В XVIII в. русский ученый М.В. Ломоносов разработал научные основы геологии и наметил удивительные по глубине подходы к решению вопросов о развитии Земли и о силах, действующих в недрах земного шара, в частности, о природе землетрясений. В начале XIX в. Эли де Бомон, исходя из космогонической гипотезы Канта-Лапласа, выдвинул гипотезу о постепенном остывании и сжатии Земли, гипотезу, не оставленную еще и в наше время. Первые серьезные исследования влияния радиоактивного тепла на термический режим Земли были сделаны В.Г. Хлопиным. Математическая сторона вопроса была рассмотрена А.Н. Тихоновым. Глубокие соображения по этому вопросу были высказаны В.И. Вернадским.

Вопрос о внутреннем строении Земли, об изменении плотности с глубиной рассматривался еще Лежандром, который сделал заслуживающую внимание попытку решить этот вопрос. Существенные успехи в решении этого вопроса геофизики стали возможными лишь после разработки методов научной сейсмологии, основателем которой явился известный русский геофизик и физик Б.Б. Голицын. Он первый дал и научно обоснованную схему внутреннего строения Земли.

Основываясь на данных сейсмологии, К.Е. Буллен произвел расчет изменения плотности и упругих постоянных внутри Земли. Наиболее полное решение этого вопроса с привлечением ряда других данных было дано советским ученым М.С. Молоденским. Интереснейшие результаты по вопросу о внутреннем строении Земли были получены в исследованиях В.И. Вернадского, А.Е. Ферсмана и других советских геохимиков.

В настоящее время физика Земли подошла к той стадии развития, на которой встает вопрос о крупных обобщениях и об интерпретации в свете данных современной физики материала, собранного различными геофизическими исследованиями. Это обобщение должно привести к выработке общей физической и физико-химической теории строения и процессов внутри Земли.

Физика Земли тесно связана с геологией, для которой она должна дать совместно с геохимией физико-химическую основу для выработки правильной концепции геологического развития Земли, на которую могла бы опираться геологическая практика. Следует отметить тесную связь физики Земли и с космогонией, от которой она берет данные об исходном состоянии Земли. Но и само познание закономерностей строения и развития Земли помогает успешному решению космогонических проблем.

Надо ясно понимать, что большинство геофизических процессов являются очень сложными и с трудом поддаются научному анализу (Ботт, 1974). Данные, относящиеся к этим явлениям, нельзя считать ни свободными от посторонних влияний, ни полученными в одинаковых условиях. О точном анализе во многих случаях не может быть и речи. В таких условиях смутные предположения становятся гипотезами, а гипотезы именуются теориями. Неправдоподобные теории встречаются в изобилии, а отвергнуть их с полной убедительностью бывает трудно, так как часто находится новый (возможно, несущественный) фактор, который раньше не учитывался. Геологи знакомы с этим обстоятельством и приспособились к нему. Физик, впервые встречающийся с такой ситуацией, может быть обескуражен. Поэтому его следует предупредить об истинном положении дел. В целом ряде задач строгое исследование дает очень мало, логическая

цепь во многих местах разорвана и связывается лишь при помощи интуитивных суждений.

Такого рода трудности, стоящие перед дисциплиной «Физика Земли», ее место в науке и, в то же время, важность и масштабность решаемых этой наукой задач мы и постарались подчеркнуть настоящим I разделом книги.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бери Б.Л.** Периодичность геофизических процессов и ее влияние на развитие литосферы // Эволюция геологических процессов в истории Земли. М.: Наука. 1993. С.53–62.
2. **Берсенов И.И.** Осевое вращение Земли как одна из причин геотектогенеза // Строение и развитие земной коры. М.: Наука. 1964. С.194–200.
3. **Борисов А.В., Мамаев И.С., Соколовский М.А.** (ред.) Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. М.-Ижевск: ИКИ. 2003. 704 с.
4. **Викулин А.В.** Физика волнового сейсмического процесса // Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН - КГПУ. 2003. 151 с.
5. **Викулин А.В.** (ред.) Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ. 2004. 297 с.
6. **Викулин А.В., Мелекесцев И.В.** Сейсмичность, вулканизм Тихого океана и вращение планеты // Българско геофизично списание. 1997. Т. XXIII. № 1. С.62-68.
7. **Владимиров В.И., Романов А.Е.** Дисклинации в кристаллах. Л.: Наука. 1970. 224 с.
8. **Волков Ю.В.** Вихревые структуры рифтовых зон Земли // Система планета Земля. М. 2002. С.257.
9. **Вопросы материаловедения** № 1 (29). СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей». 2002. 480 с.
10. **Воронов П.С.** Роль ротационных сил Земли в истории становления структуры ее литосферы. // Эволюция геологических процессов в истории Земли. М.: Наука. 1993. С.104–114.
11. **Гелл-Манн М.** Вопросы на будущее // Фундаментальная структура материи. М.: Мир. 1984. С. 266.
12. **Геодезические** и геологические данные о японской островной дуге и ее обрамлении // Окраины континентов и островные дуги. М.: Мир. 1970. С. 216 – 236.
12. **Геологический словарь.** Т. 1, 2. М.: Недра. 1978. 942 с.
13. **Гуревич Л.Э., Чернин А.Д.** Происхождение галактик и звезд. М.: Наука. 1983. 192с.
14. **Гущенко О.И.** Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С.26–51.
15. **Дмитриевский А.Н., Володин, И.А., Шипов Г.И.** Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Нака. 1993. 156 с.
16. **Долгачев В.А., Доможилова Л.М., Хлястов А.И.** Особенности движения центра масс Солнца относительно барицентра // Тр. Гос. астроном. Ин-та им. П.К. Штернберга. 1991. Т. 62. С. 111-115.
17. **Ефимов И.И., Куликов У.А., Рабинович А.Б., Файн И.В.** Волны в пограничных областях. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 280 с.
18. **Иванов Б.Н.** Законы природы. М.: Высшая школа. 1986. 336 с.
19. **Ильичев В.И., Шевалдин Ю.В.** О природе Западно-Тихоокеанской переходной зоны // Докл. АН СССР. 1986. Т.290. № 3. С.570–573.
20. **Каттерфельд Г.Н.** Лик Земли. М.: ГИГЛ. 1962. 152 с.
21. **Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И., Сулиди-Кондратьев Е.Д.** Кольцевые структуры Земли: миф или реальность. М.: Наука. 1989. 190 с.
22. **Комаров В.И., Пановкин Б.Н.** Занимательная астрофизика. М.: Наука. 1984.
23. **Кузнецов В.В.** Физика Земли и Солнечной системы. ИГГ. Новосибирск. 1984.
24. **Кузнецов В.В., Семаков Н.Н., Доровский В.Н., Котляр П.Е.** Физика Земли. Новый взгляд

- на некоторые проблемы. Новосибирск. Наука. 1989.
25. **Кузнецов В.В.** Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГГ. 1990.
 26. **Кузнецов В.В.** Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск. Наука. 1992.
 27. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000.
 28. **Кулаков А.П.** Морфоструктуры Востока Азии. М.: Наука. 1986. 176 с.
 29. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука. 1974. 752 с.
 30. **Ларин В.Н.** Гипотеза изначально гидридной Земли. М. Недра. 1980.
 31. **Латкин А.С.** Вихревая структура звездных планетарных систем Вселенной // Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ. 2004. С. 241-245.
 32. **Леви К.Г., Язев С.А., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Куснер Ю.С.** Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2002. 182 с.
 33. **Леви К.Г., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Язев С.А., Баасанджан Б., Нинжбадгар С., Балжинян Б., Буддо В.Ю.** Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2003. 383 с.
 34. **Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А.** Курс теоретической физики. Том II. М.: Наука. 1971. 936 с.
 35. **Ли Сы-гуан.** Геология Китая. М.: Изд. иностр. литературы. 1952. 146 с.
 36. **Ли Сы-гуан.** Вихревые структуры Северо-Западного Китая. М.-Л.: Госгеолтехиздат. 1958. 130 с.
 37. **Личков Б.Л.** Движение материков и климаты прошлого Земли Л.: АН СССР. 1931. 133 с.
 38. **Маракушев А.А., Моисеенко В.Г., Сахно В.Г., Тарарин И.А.** Петрология и рудоносность Тихого океана // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. №6. С. 3-136.
 39. **Маслов Л.А.** Геодинамика литосферы тихоокеанского подвижного пояса // Хабаровск-Владивосток: Дальнаука. 1996. 200 с.
 40. **Мелекесцев И.В.** Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы глубинного вулканизма. М.: Наука. 1979. С.125-155.
 41. **Мелекесцев И.В.** Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
 42. **Милановский Е.Е., Никишин А.Л.** Западно-Тихоокеанский рифтовый пояс // Бюлл. Моск. о-ва испыт. природы. Отд. Геол. 1988. Т. 63. Вып. 4. С.3-15.
 43. **Мясников Е.А.** Магматические и рудоконтролирующие морфоструктуры центрального типа. На примере Верхнего Приамурья. Владивосток: Дальнаука. 1999. 84 с.
 44. **Назиров М.** Исследование закономерностей формирования крупномасштабных геолого-геоморфологических структур по космическим фотоизображениям // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1975. № 4. С.67-75.
 45. **Незлин М.В.** Солитоны Россби (экспериментальные исследования и лабораторная модель природных вихрей типа Большого Красного Пятна Юпитера) // УФН. 1986. 150. Вып.1. С.3-60.
 46. **Орленок В.В.** Основы геофизики. Калининград: Калининградский гос. университет. 2000. 448 с.
 47. **Полетаев А.И.** Сдвигово-ротационная мотивация структурной эволюции Земли // Тектоника и геофизика литосферы. Материалы совещания. Т. II. М.: 2002. С.104-107.
 48. **Потапов Ю.С., Фоминский Л.П., Потапов С.Ю.** Вихревая энергетика и холодный ядерный синтез с позиции теории движения. Кишинев-Черкассы: Око-Плюс. 2000.
 49. **Пригожин И., Стенгерс И.** Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. М.: Прогресс. 1986. 432 с.
 50. **Розен О.М., Федоровский В.С.** Граниты и гранитошнейсовые ареалы в коллизионных системах. 2000. http://geo.web.ru/~sgt/articles/1/page_3_4.htm
 51. **Рыбин В.В.** Закономерности формирования мезоструктур в ходе развитой

- пластической деформации // Вопросы материаловедения №1 (29). СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей». 2002. С.11–33.
52. **Сато Х.** Повторные геодезические съемки // Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра. 1984. С.108–120.
 53. **Сафронов В.С., Витязев А.В.** Происхождение солнечной системы // Итоги науки и техники. Астрономия. Т. 24. М.: ВИНТИ. 1983. С. 5-93.
 54. **Сидоренков Н.С.** Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Физматлит. 2002. 384 с.
 55. **Симаков К.В.** Введение в теорию геологического времени. Становление. Эволюция. Перспективы. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 1999. 557 с.
 56. **Слезняк О.И.** Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наукова Думка. 1972. 181 с.
 57. **Стейси Ф.** Физика Земли. М.: Мир. 1972. 344 с.
 58. **Структурная геология и тектоника плит.** Т. 1–3. М.: Мир. 1990-1991. 1046 с.
 59. **Тимашев С.Ф.** Роль химических факторов в эволюции природных систем: (Химия и экология) // Успехи химии. 1991. Т. 60. С. 2292-2331.
 60. **Тимашев С.Ф.** Физикохимия глобальных изменений в биосфере // Журнал физической химии. 1993. Т. 67. С. 16—165.
 61. **Тимашев С.Ф.** О базовых принципах «Нового диалога с Природой» // Проблемы геофизики XXI века. Книга первая. М.: Наука. 2003. С. 104-141.
 62. **Шейдеггер А.** Основы геодинамики. М.: Недра. 1987. 384 с.
 63. **Шило Н.А.** О механизме образования Солнечной системы // Тихоокеанская геология. 1982. №6. С. 20-27.
 64. **Шипов Г.И.** Теория физического вакуума. М.: Изд-во ООО «Кириллица-1»ю 2002. 128 с.
 65. **Шмидт О.Ю.** Четыре лекции о происхождении Земли. Изд. 3. Доп. М.: Изд-во АН СССР. 1957.
 66. **Шолпо В.Н.** Структура Земли: упорядоченность или беспорядок? М.: Наука. 1986. 160 с.
 67. **Шолпо В.Н.** Феномен упорядоченности структуры Земли и проблемы самоорганизации // Система планета Земля. М. 2001. С.6–9.
 68. **Уфимцев Г.Ф.** Черты порядка в глобальном рельефе Земли. Тихоокеанская геология. 1988. № 4. С.105–113.
 69. **Уфимцев Г.Ф.** Мегарельеф Земли: общая симметрия, Западно-Тихоокеанская диссимметрия и планетарные процессы // Закономерности строения и динамики планет земной группы. Хабаровск. 1992. С.41–42.
 70. **Фурмарье П.** Проблемы дрейфа континентов. М.: Мир. 1971. 256 с.
 71. **Эстерле О.В.** Новое представление о пространстве и времени в рамках целостной парадигмы // Система планета Земля. М. 2003. С.185–192.
 72. **Яншин А.Л.** Вероятная эволюция геофизических полей в истории Земли, в сб. Эволюция геологических процессов в истории Земли. Под ред. Н.П.Лаверова. М. Наука, 1993, 240с.
 73. **Carey S.W.** The expanding Earth. Amsterdam. Elsevier. 1976.
 74. **Fujiwhara S., Tsujimura T., Kusamitsu S.** On the Earth-vortex, Echelon Faults and allied Phenomena // Gerlands Beiträge zur Geophysik, zweite Supplementband. 1933. P.303-360.
 75. **Haveman H.** Neues Erklärungsmoment zum Mechanismus der Kontinentsverschiebungen // Die Naturwissenschaften. 1929. B.17. H.38. S.748.
 76. **Hochstetter.** Unser Wissen von der Erde // Geologie Th. 11. Kirchoff. 1886.
 77. **Hughes T.** Coriolis perturbation of mantle convection related to a two phase convection model // Tectonophysics. 1973. V.18. P.215–230.
 78. **Kanasewich E.R., Havskov J., Evans M.E.** Plate tectonics in the Phanerozoic // Canadian J. of the Earth Sciences. 1978. V.15. N 6. P.919–955.

79. **Lee J.S.** Some Characteristic Structural Types in Eastern Asia and Their Bearing upon the Problems of Continental Movements // *Geol. Mag.* LXVI. 1928. P.422-430.
80. **Madelung E.** Quantentheorie in hydrodynamischer Form. *Z. fur Phys.* 40. 3. 4. 1926. 327 p.
81. **Jackson E.D., Shaw H.R., Bargar K.E.** Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain // *Earth Planet Sci.Lett.* 1975. V.26. P.145–155.
82. **Pan Ch.** Polar instability, plate motion, and geodynamics of the mantle // *J. Phys. Earth.* 1985. V.33. N 5. P.411–434.
83. **Takeuchi A.** Pacific swing: Cenozoic episodicity of tectonism and volcanism in Northeastern Japan // *Memoir of the Geological Society of China.* 1986. N 7. P.233–248.
84. **Whitney M.I.** Aerodynamic and vorticity erosion of Mars: Part II. Vortex features, related systems, and some possible global patterns of erosion // *Geol. Soc. America Bull., Part I.* V. 90. 1979. P.1128-1143.

II. УЧЕНИЕ О ФИГУРЕ ЗЕМЛИ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ЕЕ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ

О связи фигуры Земли с ее происхождением, эволюцией, строением и процессами внутри планеты. Понятие об истинной фигуре Земли - геоиде, его математическое и геофизическое обоснование, геометрическое представление, место и условия наблюдения. Земля как 2- и 3-осный эллипсоиды вращения, размеры полюсей, геометрическое (полюсное и экваториальное) динамическое сжатия (Стейси, 1972).

Понятие о неустойчивости вращения Земли, периодах Эйлера и Чандлера, периодических и не периодических изменениях скорости ее вращения, нутации и прецессии (Стейси, 1972; Викулин, Кролевец, 2001).

Определение массы, средней плотности и момента инерции Земли, значение последнего для познания строения планеты. Земля как фигура равновесия неоднородной вращающейся жидкой массы (приблизительно) и вытекающий отсюда вывод о ее слоистом внутреннем строении (Ботт, 1974).

Форма Земли и геодинамика (Кузнецов, 2000).

История вопроса. Задача об устойчивости формы (т. е. фигуре) космических тел насчитывает, по крайней мере, более чем 150-летнюю историю. Эта задача пришла из астрофизики - надо было понять: почему небесные тела имеют форму близкую шаровой и, в то же время, никогда не имеют строго шаровую форму.

Такие исследования, по сути, были начаты И. Ньютоном, активно продолжены французской школой математики и другими учеными. Решением этой задачи занимались Маклорен, Томсон, Дарвин, Джинс, Дирихле, Дедекинд, Риман, Кирхгоф, Чаплыгин, Ляпунов, Пуанкаре, Ляв и др. Наиболее полные результаты были получены А.М. Ляпуновым, А. Пуанкаре, П. Дирихле, Б. Риманом и др.

А.М. Ляпунов (Ляпунов, 2000) в конце XIX в. получил общий класс решений задачи устойчивости для фигуры вращающейся жидкости в виде «грушевидных форм». Эти результаты до настоящего времени являются самыми полными. Серьезно этой задачей занимался также А. Пуанкаре (Пуанкаре, 2000).

П. Дирихле поставил задачу об устойчивости вращающегося гравитирующего тела, которое в любой момент имеет форму эллипсоида и координаты частиц являются линейными функциями своих начальных значений. Сам П. Дирихле рассмотрел частный случай сфероида. Ю. Дедекинд, подготовивший работу П. Дирихле к печати, нашел еще один класс решений. Но наиболее полное решение поставленной П. Дирихле задаче дал Б. Риман (Поплавский, Соловьев, 2000). Он показал, что при условии линейной зависимости поля скоростей от координат, движение, при котором сохраняется эллипсоидальная форма равновесия, есть суперпозиция равномерного вращения и внутренних движений с равномерной завихренностью жидкости.

Параллельно ищались решения «плоского» варианта такой задачи, которые могут быть применены к атмосферам, гидросферам (и, по-видимому, некоторым твердотельным частям, которые на геологических отрезках времени ведут себя как жидкости) планет (Ламб, 1947). Здесь классический результат принадлежит Г. Кирхгофу (1816 г.). Он получил стационарное решение в виде вращающегося с постоянной угловой скоростью эллиптического пятна с постоянной завихренностью. Через несколько лет его решение обобщил С.А. Чаплыгин, найдя решение для пульсирующего эллипса. В 1893 г. Ляв доказал, что решение Г. Кирхгофа является устойчивым до тех пор, пока отношение осей эллипса не превышает 3. Если это соотношение превышено, то вихрь распадается на более мелкие вихри.

О связи фигуры Земли с ее происхождением, эволюцией, строением и процессами внутри планеты. При рассмотрении ряда проблем физики Земли форма нашей планеты представляет существенный интерес, так как форма неразрывно связана с содержанием, т. е., в нашем случае, со строением Земли, с процессами в ней протекающими, с историей возникновения и развития земного шара. Таким образом, посредством изучения фигуры Земли можно подойти к выяснению ряда физических свойств материала, слагающего нашу планету, к выяснению хода ряда физических процессов внутри Земли.

Сформулированный вывод общего плана можно, например, пояснить с помощью следующих данных.

При неравномерном распределении масс планет и их плотностей в солнечной системе (табл. 1.1) размеры орбит их траекторий связаны законом Бодэ (1.1). Такая «закономерная неравномерность», как отмечалось выше (раздел 1), есть следствие химической дифференциации вещества в солнечном облаке. При этом такой механизм разделения вещества должен был сопровождаться процессом передачи от центрального тела к системе момента орбитального количества движения, величина которого также распределена неравномерно и имеет резкий максимум для планет – гигантов Юпитера и Сатурна (табл. 1.2). Эти данные позволяют предположить, что разделение вещества (химическая дифференциация) во вращающемся солнечном облаке осуществлялось посредством ротационного (вихревого) механизма путем передачи момента.

Каждая из планет солнечной системы представляет собой волчок – вихрь, величина которого также неравномерно распределена в солнечной системе (табл. 1.3). Более того, амплитуды планетарных вихрей пропорциональны их орбитальным угловым моментам (табл. 1.2). Представляется, что такое совпадение не случайно и, по-видимому, лежащее в его основе явление может быть использовано для объяснения закона Бодэ.

Понятие об истинной фигуре Земли - геоиде, его математическое и геофизическое обоснование, геометрическое представление, место и условия наблюдения (Стейси, 1972; с. 30-34). Под формой Земли естественно понимать форму физической поверхности твердой части планеты. Однако в силу большой сложности этой поверхности из нее давно стали выделять более простую (более гладкую часть), в качестве которой принимают невозмущенную приливами, ветрами и т.д. поверхность океана, продолженную некоторым образом под континенты. От этой поверхности "уровня моря" ведется отсчет высот при изучении формы физической поверхности Земли или, как обычно принято говорить, рельефа земной поверхности.

Вращение Земли создает центробежные силы, которые приводят к образованию экваториального вздутия, из-за которого форма Земли существенно отличается от сферической (рис. 2.1).

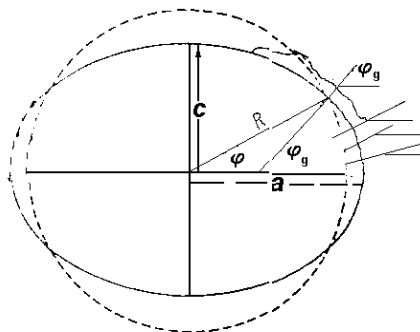


Рис. 2.1. Сравнение геоида (сплошная линия) с шаром того же объема (пунктирная линия). Сжатие геоида преувеличено примерно в 50 раз. Радиус шара $R=(a^2c)^{1/3}$, где a и c – большая и малая полуоси. Координата φ – географическая широта точки; φ_g – географическая широта или угол между нормально к поверхности геоида в точке наблюдения и экваториальной плоскостью.

Если бы весь земной шар был покрыт неглубоким морем, то форма поверхности (без учета несущественных возмущений, вызванных ветром, приливами и т.д.) полностью определялась бы гидростатическим равновесием воды под действием силы тяжести и сил, возникающих из-за вращения Земли. Получающаяся эквипотенциальная поверхность соответствует уровню моря и называется **геоидом**; она определяет фигуру Земли. Чтобы понять физический смысл понятия геоида для суши, нужно представить себе узкие каналы, прорытые через материки и соединенные с океаном. Уровень воды в таких каналах соответствовал бы поверхности геоида.

На средний геоид накладываются приливные эффекты, вызванные градиентами гравитационных полей Луны и Солнца. Но эти эффекты очень малы по сравнению со сжатием Земли, вызываемые ее вращением. Детали рельефа земной коры (материки, горные хребты) создают заметное отклонение реальной земной поверхности от геоида. Однако компенсация масс на некоторой глубине (принцип изостазии) ослабляет влияние рельефа земной поверхности на форму геоида.

Форма геоида была установлена астрономо-геодезической съемкой, проведенной по нескольким дугам на материках. В каждом пункте наблюдения определяется вертикаль, или направление локального вектора силы тяжести относительно звезд. По результатам съемок, произведенных с 1900 по 1960 гг., была найдена величина сжатия геоида. Она заключена в пределах от $1/297$ до $1/298,3$. В тех же пределах лежат значения сжатия, полученные от гравиметрических измерений. Эти оценки сжатия сделаны по измерениям на материках. В последнее время из анализа орбит спутников найдено более точное значение сжатия $1/298,25$. Им и предпочитают теперь пользоваться.

Геоид является поверхностью постоянного геопотенциала U_0 . В каждой точке Земли полный геопотенциал складывается из потенциала силы тяжести V и члена, зависящего от вращения Земли:

$$U = V - \frac{1}{2}\omega^2(x^2 + y^2) = V - \frac{1}{2}\omega^2 r^2 \cos^2 \varphi, \quad (2.1)$$

где ω - угловая скорость вращения Земли. Ось z направлена по оси вращения Земли, а x , y или r , φ - координаты точек на земной поверхности. В точках внутри Земли полный потенциал содержит еще один член, зависящий от давления. На поверхности ускорение силы тяжести направлено по нормали к геоиду и вычисляется по формуле:

$$g = -\text{grad}U. \quad (2.2)$$

Таким образом, задача вычисления формы геоида сводится к получению выражения для V . Если бы распределение масс внутри Земли было известно, то V можно было получить прямым интегрированием. Мы же пойдем обратным путем и постараемся получить сведения о внутреннем строении Земли из формы геоида.

При общем подходе к задаче следует обратиться к уравнению Лапласа, которому должен удовлетворять потенциал V во всех точках, находящихся вне Земли и, следовательно, в пределе - на самой поверхности Земли:

$$\nabla^2 V = r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial V}{\partial r}) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta}) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} = 0, \quad (2.3)$$

где r - расстояние от центра Земли, φ и λ - геоцентрические широта и долгота точки, $\theta = \pi/2 - \varphi$ - геоцентрическое полярное расстояние.

В разложении по степеням $1/r$ потенциал V можно представить:

$$V = -\frac{GM}{r} (J_0 P_0 - J_1 \frac{a}{r} P_1(\theta) - J_2 (\frac{a}{r})^2 P_2(\theta) + \dots), \quad (2.4)$$

где G - гравитационная постоянная, M - масса Земли, a - экваториальный радиус, $J_0, J_1, \dots$ - безразмерные постоянные, зависящие от распределения масс внутри Земли, которые требуется определить, $P_0, P_1, \dots$ - полиномы Лежандра, $P_0 = 1$.

$J_0 = 1$, поскольку на больших расстояниях (сферическое приближение):

$$V = -\frac{GM}{r}. \quad (2.5)$$

Если выбрать за начало координат центр Земли, то $J_1 = 0$. Тогда во втором приближении (сфероид Клеро) потенциал будет определяться из выражения:

$$V = -\frac{GM}{r} + \frac{GMa^2}{2r^2} J_2 (3\sin^2 \varphi - 1). \quad (2.6)$$

Из формулы (2.6) можно определять распределение масс внутри Земли. Покажем это. С этой целью определим выражения для сжатия Земли и получим уравнение для поверхности геоида.

Выражение для потенциала V в точке P (рис. 2.2) через главные моменты инерции Земли дается соотношением Мак-Кулло:

$$V = -\frac{GM}{r} - \frac{G}{2r^3} (A + B - 3Cn^2), \quad (2.7)$$

где A , B и C - моменты инерции Земли относительно осей x , y и z соответственно,

$$I = Al^2 + Bm^2 + Cn^2, \quad (2.8)$$

l , m , n - направляющие косинусы точки P на рис. Относительно осей x , y , z .

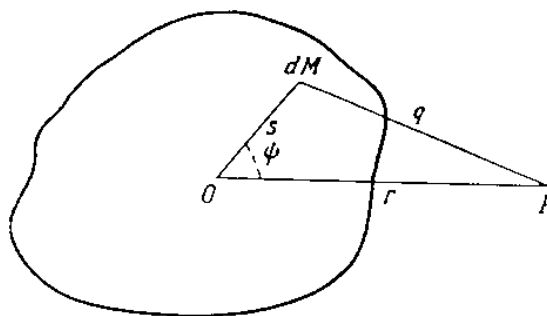


Рис. 2.2 Интегрирование потенциала силы тяжести для вывода формулы Мак-Кулло. Потенциал вычисляется в точке P , расположенной вне тела массы M , на расстоянии r от ее масс O . При интегрировании r постоянно; переменные интегрирования s и φ координаты элементы массы относительно O и прямой OP .

Из-за симметрии Земли относительно оси z :

$$A = B, \quad (2.9)$$

$$n^2 = \sin^2 \varphi = 1 - l^2 - m^2. \quad (2.10)$$

Т. о:

$$V = -\frac{GM}{r} + \frac{G}{2r^3} (C - A)(3\sin^2 \varphi - 1). \quad (2.11)$$

Откуда:

$$J_2 = \frac{C - A}{Ma^2}. \quad (2.12)$$

Полный геопотенциал равен:

$$U_0 = -\frac{GM}{r} + \frac{G}{2r^3} (C - A)(3\sin^2 \varphi - 1) - \frac{1}{2} r^2 \omega^2 \cos^2 \varphi. \quad (2.13)$$

По определению, геоид определяется как поверхность постоянного потенциала U_0 . На экваторе ($r = a$, $\varphi = 0$) и полюсах ($r = c$, $\varphi = \pi/2$) имеем соответственно:

$$U_0 = -\frac{GM}{a} - \frac{G}{2a^3} (C - A) - \frac{1}{2} a^2 \omega^2, \quad (2.14)$$

$$U_0 = -\frac{GM}{c} + \frac{G}{c^3}(C - A). \quad (2.15)$$

Отсюда находим разность между значениями радиусов на экваторе ($r = a$) и на полюсе ($r = c$):

$$a - c = \frac{C - A}{M} \left(\frac{a}{c^2} + \frac{c}{2a^2} \right) + \frac{1}{2} \frac{ca^3 \omega^2}{GM}. \quad (2.16)$$

Таким образом, полагая в правой части уравнения (2.16) $a \approx c$, сжатие ε с точностью до членов первого порядка выражается формулой:

$$\varepsilon = \frac{a - c}{a} = \frac{3}{2} \frac{C - A}{Ma^2} + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 a^3}{GM}. \quad (2.17)$$

Величина сжатия имеет порядок величины $\varepsilon \approx 10^{-3}$, поэтому ошибка из-за отбрасывания членов порядка ε^2 сравнима по величине с отброшенными высшими гармониками в разложении потенциала силы тяжести. С той же точностью уравнение для поверхности геоида записывается в виде:

$$r = a(1 - \varepsilon \sin^2 \varphi). \quad (2.18)$$

Второй член в (2.17) уверенно определяется по отношению центростремительного ускорения к ускорению силы тяжести на экваторе:

$$m = \frac{\omega^2 a^3}{GM} = 3,4678 \cdot 10^{-3}. \quad (2.19)$$

По спутниковым данным значение для J_2 , принятое теперь в качестве стандарта Международным геодезическим и геофизическим союзом, равно:

$$J_2 = 1,08270 \cdot 10^{-3}. \quad (2.20)$$

Из (2.17) для сжатия получаем:

$$\varepsilon = \frac{3}{2} J_2 + \frac{1}{2} m = 3,3579 \cdot 10^{-3}. \quad (2.21)$$

При удержании членов второго порядка малости для величины сжатия получается более точное значение:

$$\varepsilon = 3,35280 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{298,26}. \quad (2.22)$$

Гравитационное притяжение Луны и Солнца, действуя на экваториальное вздутие Земли, создает момент, вызывающий прецессию оси вращения Земли. По скорости прецессии определяется динамическое сжатие Земли:

$$H = \frac{C - A}{C} = 3,2732 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{305,51}. \quad (2.23)$$

Таким образом, из уравнений (2.12), (2.20) и (2.23) находим полярный момент инерции Земли:

$$C = \frac{J_2}{H} Ma^2 = 0,33078 Ma^2. \quad (2.24)$$

Из формулы (2.24) видно, что момент инерции Земли меньше момента инерции однородного шара, так как для последнего численный множитель равен 0,4. Следовательно, массы заметно концентрируются к центру Земли. Кроме того, полученное таким образом значение C представляет одно из основных условий, которым должно удовлетворять радиальное распределение плотности внутри Земли. Благодаря этому условию можно рассчитать пределы изменения плотности в слоях (раздел 5), выделяемых в недрах Земли методами сейсмологии (раздел 3).

Принимая, что распределение плотности известно из сейсмических данных, и допуская, что на всех глубинах существует гидростатическое равновесие, можно вернуться к задаче о фигуре Земли и, пользуясь этими результатами, рассчитать ее фигуру равновесия. Сравнение сжатия геоида (2.21) и динамического сжатия (2.23) показывает,

что поверхности внутренних слоев имеют меньшее сжатие, чем поверхность Земли, так как если бы сжатие всех слоев постоянной плотности было одинаковым, то выполнялось бы соотношение:

$$\frac{C-A}{C} = \frac{a^2 - \frac{1}{2}(a^2 + c^2)}{a^2} \approx \frac{a-c}{a}. \quad (2.25)$$

Наблюдаемое различие можно было ожидать, так как вещество внутренних слоев, ограниченных поверхностями постоянного потенциала, обладает большей средней плотностью, чем Земля в целом. Поэтому для них вклад в потенциал от вращения Земли меньше, чем вклад в потенциал силы тяжести.

Гидростатическая теория с точностью до первого порядка дана Джеффрисом, который показал, что сжатие поверхности можно выразить через момент инерции следующим образом:

$$\varepsilon_H = \frac{\frac{5}{2}m}{1 + \frac{25}{4}\left(1 - \frac{3}{2}\frac{C}{Ma^2}\right)}. \quad (2.26)$$

В этой формуле m берется из (2.19), а C/Ma^2 – из (2.24). Однако, формула (2.26) недостаточна для того, чтобы по ней можно было установить различие между сжатием по гидростатической теории и наблюдаемым сжатием.

Поправка к (2.26) была получена численно с использованием данных о распределении плотности в Земле (раздел 5). Вычисления дали $\varepsilon_H = 1/299,7$. Как видим, различие между сжатием ε и динамическим сжатием ε_H несомненно: Земля сжата примерно на 0,5% сильнее, чем следует из гидростатической теории.

Земля как 2- и 3-осный эллипсоиды вращения, размеры полуосей, геометрическое (полюсное и экваториальное) динамическое сжатия (Стейси, 1972, с. 37). Избыточное сжатие не так уж и велико. Если в разложении потенциала силы тяжести рассматривать только члены второго порядка и вычесть равновесное сжатие, то Земля оказывается трехосным эллипсоидом с главными моментами инерции $A' > B' > C'$, причем $(C' - A')/(B' - A') \approx 2$. Соответствующее соотношение осей можно ожидать с наибольшей вероятностью для случайно развивавшегося сфероида. Если такое тело вращается, то на его форму накладывается вздутие, вызванное вращением. Если тело неидеально упругое (т.е. может течь), то вздутие принимает равновесную (гидростатическую) форму, накладывающуюся на исходное сжатие. При этом тело поворачивается так, что ось наибольшего исходного (неравновесного) момента инерции совпадает с осью вращения. Кажется маловероятным, что добавочное сжатие представляет собой запаздывание реакции экваториального вздутия на замедление вращения Земли.

Отклонение от условий гидростатического равновесия означает, что в мантии существуют касательные напряжения, поддерживаемые статически и динамически. Их величина должна быть порядка 10^8 дин/см.

Понятие о нестабильности вращения Земли, периодах Эйлера и Чандлера, периодических и непериодических изменениях скорости ее вращения, нутации и прецессии (Стейси, 1972, с. 37-43). Из уравнения (2.11) видно, что в разложении потенциала силы тяжести, кроме члена, пропорционального r^{-1} , имеется меньший член, пропорциональный r^{-3} , который обусловлен сжатием Земли. Этот член зависит от угловой координаты φ . Следовательно, на массу m , расположенную в точке (r, φ) , кроме центральной силы тяготения $-m\frac{\partial V}{\partial r}$, действует момент сил $-m\frac{\partial V}{\partial \varphi}$. Поэтому на массу Земли в свою очередь действует момент сил, равный по величине и противоположный по направлению.

Моменты, возникающие из-за действия Луны и Солнца на экваториальное вздутие, вызывают прецессию земной оси (рис. 2.3). Период прецессии составляет 25800 лет.



Рис. 2.3. Причина прецессии земной оси. Гравитационное воздействие Солнца на экваториальное вздутие создает момент одного и того же направления во время обоих солнцестояний и не создает никакого момента во время равноденствий.

Полное исследование показывает, что на прецессию накладывается малая нутация, или качания полюса мира вокруг полюса эклиптики. На самом деле имеется несколько нутаций, возникающих из-за эллиптичности орбит Земли и Луны, расположенных в разных плоскостях, а также от слабого воздействия других планет.

Независимо от гравитационного взаимодействия с другими телами Земля испытывает свободную, эйлеровскую прецессию. В геофизической литературе ее обычно называют свободной нутацией или чандлеровскими колебаниями по имени первооткрывателя. Колебания возникают из-за того, что ось вращения Земли слегка наклонена к оси наибольшего момента инерции. Полный момент количества движения остается постоянным и по величине и по направлению, а Земля движется так, что полюс описывает на ее поверхности круг с центром в точке пересечения оси наибольшего момента инерции с поверхностью Земли (рис. 2.4). Ось вращения Земли практически фиксирована в пространстве и чандлеровское колебание полюса выражается в периодических вариациях широты с периодом $T_{ch} = 430 - 435$ суток и переменной амплитудой, составляющей, в среднем, $0,14''$.

По аналогии с вращающимся волчком, который можно рассматривать как жесткое твердое тело, можно получить выражение для периода свободной прецессии Земли. Суть вычислений заключается в следующем. Полная энергия вращения больше, чем энергия вращения относительно оси С. Избыток энергии вращения приводит к стремлению тела восстановить состояние симметричного вращения и создает эффективный гироскопический момент. Рассматривая его как внешний момент, вызывающий вынужденную прецессию, получим угловую скорость свободной (эйлеровской) прецессии жесткой твердой Земли, или, как полагают, теоретический период Чандлера (ch):

$$\omega_{ch} = -H\omega, \quad (2.27)$$

где H – динамическое сжатие, определяемое выражением (2.23), ω – угловая скорость вращения Земли.

Как можно видеть, теоретическое значение $T_{ch, теор} = 2\pi/\omega_{ch} = 305$ суток не равно на практике определенному значению периода Чандлера T_{ch} . Более того, вариации широты с частотой ω_{ch} на практике не выявлены. Это может указывать на то, что Землю нельзя

рассматривать как жесткое тело, и, следовательно, чандлеровские колебания, возможно, не являются свободной прецессией планеты.

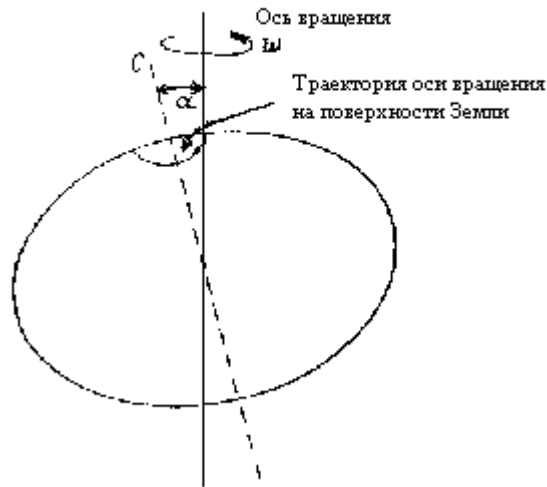


Рис. 2.4. Чандлеровское колебание полюса. Периодические изменения широты связаны с тем, что Земля движется как единое целое и ее ось вращения, оставаясь неподвижной в пространстве, описывает конус с раствором 2α вокруг оси наибольшего момента инерции.

Колебания Чандлера и сейсмотектонический процесс (Викулин, Кролевец, 2001). В рамках ротационной модели сейсмического процесса (см. раздел 3) исследуется природа взаимосвязи сильных землетрясений с прецессией полюса планеты. Получены следующие результаты. 1) Прецессия полюса планеты вызывается «нулевыми» колебаниями, генерируемыми сейсмотектоническим процессом в пределах верхней части литосферы. 2) Чандлеровская частота «расщепляется» на две $f_{ch1} = 0,835 \text{ год}^{-1}$ ($T_{ch1} = 437$ дней) и $f_{ch2} = 0,860 \text{ год}^{-1}$ ($T_{ch2} = 425$ дней), что определяется различием значений нулевых частот для меридионально (тихоокеанского) и широтно (альпийско-гималайского) ориентированных сейсмических поясов. 3) Распределение значений радиусов траекторий движения полюса по их числу имеет регулярную составляющую $0'',05$, что в пересчете на энергию нутации по порядку величины равно сейсмотектонической энергии, сбрасываемой в очагах сильнейших землетрясений. Формулируется гипотеза, согласно которой взаимосвязь солнечной активности с сейсмотектоническим процессом обеспечивается взаимодействием годовой компоненты прецессии полюса с чандлеровскими частотами f_{ch1} и f_{ch2} .

Геоид по спутниковым данным (Стейси, 1972, с. 60-65). Выше было показано, что на экваториальное вздутие Земли действуют моменты, создаваемые Солнцем и Луной и вызывающие прецессию земной оси (рис. 2.3). Конечно, и Земля, в свою очередь, создает моменты такой же величины и противоположного направления, действующие соответственно на Солнце и на Луну. Момент, действующий на Луну, оказывает заметное влияние на ее орбиту. Аналогичным образом экваториальное вздутие воздействует на движение искусственных спутников Земли. Масса искусственных спутников мала и поэтому не оказывает заметного влияния на движение Земли. В то же время орбиты спутников изменяются, и их изменение дает наиболее точные сведения о крупномасштабных отклонениях Земли от сферической симметрии.

Геоид, построенный по спутниковым данным (рис. 2.5), по форме мало отличается от эллипсоида. Эти отклонения в 1000, а может быть и более раз меньше сжатия

эллипсоида. Тем не менее, их можно обнаружить, прослеживая изменения элементов спутниковых орбит.

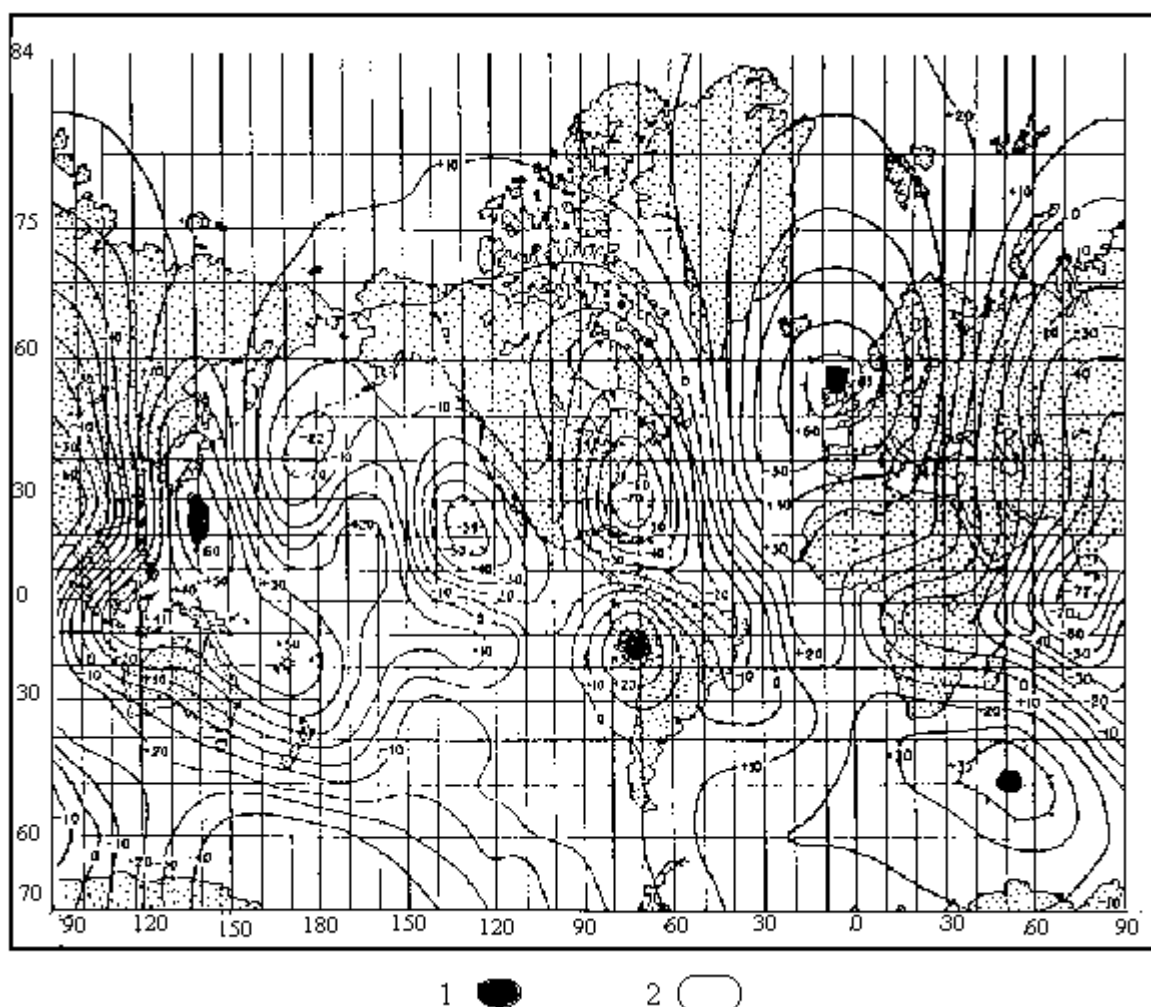


Рис. 2.5. Карта геоида по спутниковым данным. На изолиниях указаны отклонения (в метрах) поверхности геоида от эллипсоида со сжатием, соответствующим измеренному значению J_2 с учетом коэффициента J_4 связанного с J_2 при разложениях до членов второго порядка малости по сжатию. 1, 2 – области максимальных и минимальных значений отклонений поверхности геоида от эллипсоида (Стейси, 1972, с. 64).

Изучение орбит искусственных спутников Земли значительно расширило наши знания о глобальной структуре гравитационного поля Земли и, кроме того, позволило в 30 раз повысить точность определения сжатия. Экваториальное вздутие Земли заметно влияет на орбиту движения спутника. Если спутник движется к северо-востоку и пересекает экватор в северном направлении, то точка пересечения его орбиты с экватором будет постепенно смещаться к западу (рис. 2.6 а). Скорость перемещения орбиты к западу позволяет вычислить сжатие.

Сжатие для Земли постоянной плотности, вычисленное Ньютоном, равно $1/230$. Французская геодезическая экспедиция XVIII в. в результате своих измерений получила значения, находящиеся в пределах $1/310 - 1/178$. До наблюдений искусственных спутников для сжатия обычно использовалось значение $1/297,3$, найденное Джеффрисом с ошибкой около $1/300$ этой величины по материалам гравиметрических измерений на поверхности Земли. Наблюдения орбит искусственных спутников дают величину $1/298,25$ с точностью $1/30000$. Средний экваториальный радиус равен $a = 6378,160$ км, полярный – $c = 6356,775$ км.

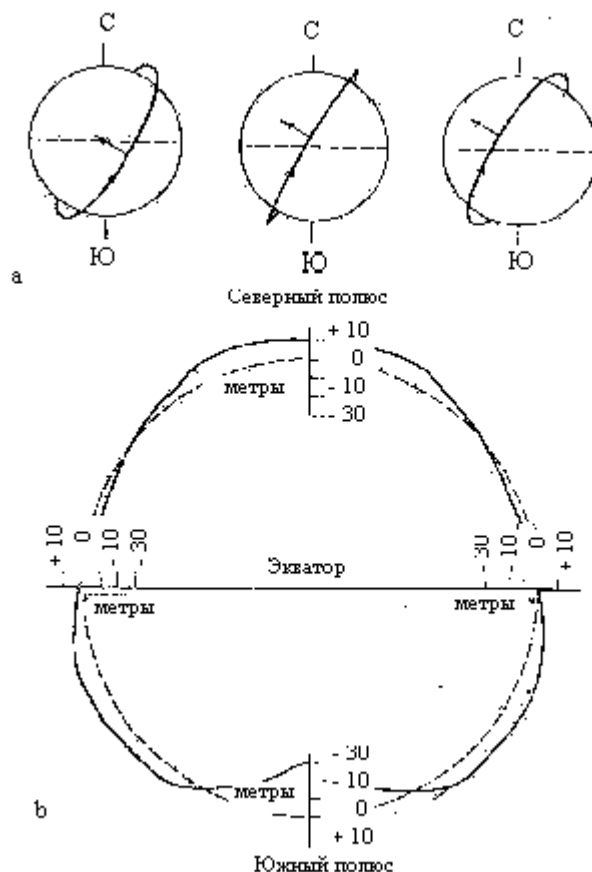


Рис. 2.6. а – экваториальное вздутие Земли заставляет поворачиваться к западу орбиту движущегося в восточном направлении искусственного спутника. По скорости поворота орбиты вычисляется сжатие Земли. б – высота геоида (сплошная кривая) относительно сфероида со сжатием $1/298,25$ (пунктирная линия) в предположении, что Земля симметрична относительно полярной оси. Масштаб не выдержан. (Ботт, 1974; с. 13).

Уклонение геоида от сфероида (референц-эллипсоида) лучше всего можно определить по вариациям гравитационного поля на поверхности Земли. Наблюдения орбит искусственных спутников Земли позволили значительно усовершенствовать эти определения. Подобные наблюдения доставляют нам более точные данные о вариациях гравитационного поля для более обширных районов, чем измерения, выполняемые в настоящее время на поверхности Земли. Вместе с тем гравиметрические наблюдения на поверхности все еще остаются наилучшим способом изучения локальных вариаций гравитационного поля и геоида в пределах расстояний менее 2000 км.

Один из наиболее известных выводов «спутниковой геодезии» состоит в том, что Земля имеет «грушевидную» форму. В действительности же отклонения геоида от сфероида, создающие грушевидность, меньше 20 м (рис. 2.6 б), в то время как экваториальное вздутие Земли превышает 20 км ($a - c = 21,385$ км).

Интересно, что расположение поднятий и впадин поверхности геоида не связано со строением земной коры (материками и океанами). Это один из самых поразительных результатов, показывающих, что существует компенсация масс (изостазия) в континентальных масштабах. Если бы материки были просто наложены на идеально слоистую эллипсоидальную Землю, то наблюдалась бы четкая связь формы геоида с очертаниями материков, и разница в высотах между поднятиями и впадинами на поверхности геоида была бы в 10 раз большей. Отсутствие связи между формой геоида и материками наводит на мысль, что особенности формы геоида либо определяются различиями плотности в глубоких частях мантии (глубже пластичного слоя в верхней

мантии, существование которого, как полагают, обеспечивает изостатическое равновесие), либо зависят от различий в плотности, поддерживаемых динамически (благодаря конвекции). В последнем случае неоднородности в распределении плотности, скорее всего, располагаются в верхней мантии.

Определение массы, средней плотности и момента инерции Земли, значение последнего для познания строения планеты. Земля как фигура равновесия неоднородной вращающейся жидкой массы (приблизительно) и вытекающий отсюда вывод о ее слоистом внутреннем строении (Ботт, 1974; с. 14-16). Массу Земли можно оценить по величине ускорения силы тяжести на ее поверхности с учетом небольшой поправки за влияние вращения. В упрощенной форме этот способ можно пояснить следующей схемой. Будем считать Землю радиально-симметричной не вращающейся сферой. Тогда можно показать, что ускорение свободного падения на поверхности Земли равно $g = GM/r^2$, где r – расстояние от центра сферы, M – масса и G – гравитационная постоянная. Притяжение и радиус планеты точно известны. Постоянная G определена экспериментально с ошибкой около 0,03%. Предполагать радиальную симметрию Земли нет необходимости, если известна ее фигура или сила тяжести на всей поверхности. Таким образом, M может быть вычислена с той же точностью, с которой известна гравитационная постоянная, т. е. с ошибкой порядка 0,03%. По этой величине определение G часто называют «взвешиванием Земли». Из массы и объема Земли можно получить ее среднюю плотность. Так, масса $M = 5,977 \cdot 10^{27}$ г, средняя плотность $\rho_0 = 5,517$ г/см³.

Если предположить, что Земля симметрична относительно своей полярной оси, тогда у нее будет два главных момента инерции: A – относительно экваториальной, и C – относительно полярной оси. Их можно определить двумя последовательными этапами по результатам астрономических наблюдений и известной из измерений величине сжатия.

И средняя плотность, и моменты инерции Земли указывают, что плотность должна сильно увеличиваться с глубиной. Среднюю плотность и моменты инерции важно знать при изучении распределения плотности внутри Земли, так как любая приемлемая модель плотности должна удовлетворять этим измеренным значениям. Моменты инерции необходимы и для определения фигуры Земли, которую она бы имела, если бы находилась в состоянии гидростатического равновесия.

Таким образом, видим, что фигура Земли, как и других планет и их крупных спутников в солнечной системе, действительно является прямым следствием протекающих внутри планеты процессов. Более того, по-видимому, можно сделать вывод о том, что протекающие в настоящее время внутри планетные процессы несут на себе «отпечаток» процессов, определявших и продолжающих определять формирование солнечной системы. Механизм, определяющий такое «наследие», по-видимому, может быть связан с вихревыми свойствами пространства – времени. На это указывают результаты проведенного в начале этого раздела исторического обзора (см. с. 45), согласно которого существует два, по-видимому, независимых класса решений, каждый из которых в состоянии обеспечить устойчивость формы вращающихся гравитирующих жидких тел, какими можно считать исходное газо-пылевое облако и образовавшиеся в процессе эволюции этого облака планеты: решения «грушевидной формы» А.М. Ляпунова (2000) и вихревые решения П. Дирихле – Ю. Дедекинда – Б. Римана (Ламб, 1947; Поплавский, Соловьев, 2000).

Форма Земли и геодинамика (Кузнецов, 2000, с. 198). «Геодинамика занимает “ключевую” позицию в современной геологии и здесь накопилось наибольшее количество неразрешенных вопросов и парадоксов. Среди них, несоответствие степени сжатия современной Земли и скорости её вращения; несоответствие длины периметра Тихого океана идее распада Пангеи (парадокс Мезервея); нестыковка палеомагнитных оценок положений полюсов, направлению дрейфа материков; несоответствие фактических

данных о Земле, её ядре, мантии, форме геоида и гравитационным аномалиям, идее конвекции в мантии и роли субдукции в этой конвекции и т.п.

Ниже попытаемся разобраться в некоторых из этих несоответствий, связанных с несоответствием сжатия современной Земли со скоростью ее вращения (Кузнецов, 2000, с. 198-202).

Парадокс Эверндена. Заголовком к этому разделу взято название недавно опубликованной статьи Дж. Ф. Эверндена (1997). Автор анализирует известную монографию Г. Джеффриса (1960) в части оценки величин параметров, определяющих фигуру Земли, сравнивает результаты Джеффриса с работой Лэмба (1947) и приходит к ряду нетривиальных выводов. Основной из них состоит в том, что Земля сплюснута намного меньше, чем её жидкая модель. Автор объясняет реальное сжатие Земли значительно большей, чем ранее предполагалось, прочностью нижней мантии, а совсем не текучестью её вещества. Более того, он пытается доказать, что прочная мантия Земли сохраняется со времени её образования. Эвернден попутно доказывает, что знание параметров фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$ ничего не говорит о реальном распределении плотности в Земле.

Джеффрис полагал Землю гидростатичной, однако при этом должно было выполняться правило: $1/H \approx 1/\varepsilon$ [$H = (C - A)/C$], где C и $A = B$ - полярный и экваториальные моменты инерции Земли, $\varepsilon = 5/4 \times \omega^2 a^3 / GM$ - сжатие Земли, ω - скорость её вращения, a - экваториальный, c - полярный радиусы Земли, величина, обратная сжатию: $1/\varepsilon = a/(a - c)$. Условие гидростатичности современной Земли, вращающейся с периодом $T = 24$ часа, справедливо при: $1/\varepsilon = 232$. Как известно, у Земли: $1/H = 305.5$, $1/\varepsilon = 297.8$ и $1/H - 1/\varepsilon = 7.8$, а наблюдаемая разность 6.75. Все это говорит о негидростатичности Земли. Длительность суток T для планеты, имеющей размер Земли и ее среднюю плотность, должна быть равна: $T = 27.2$ часа, а не $T = 24$ часа, как у Земли. Подчеркнем, что наблюдаемый период вращения T соответствует $1/\varepsilon = 232$, причем отметим, что первым вычислил это ещё Ньютон. Для $T = 22$ часа, Эвернден подсчитывает: $1/\varepsilon = 200$. Он приходит к заключению, что если Земля замедляет свое вращение, то её сжатие не будет уменьшаться до тех пор, пока длина суток T не станет: $T \geq 27.2$ часа. Или, если Земля вращалась в прошлом быстрее и её возможная жидкая конфигурация была более сплюснутой, чем сейчас, но её реальное сжатие было бы таким же, как сейчас. Иначе, вывод, к которому приходит Эвернден: Земля никогда не имела сжатия $1/232$. Он формулирует следствия из этого вывода. Получается, что у Земли:

- 1) Очень высокая прочность нижней мантии;
- 2) Температура нижней мантии никогда не достигала значений, при которых возникает заметная текучесть под действием ротационных напряжений, т.о. исключается конвекция в нижней мантии;
- 3) Высокая прочность мантии требует, чтобы земное ядро было связано с верхней мантией и корой только с помощью кондуктивного (неконвективного) теплового потока;
- 4) Глубинные мантийные плюмы не могут существовать;
- 5) Отрицаая мантийные плюмы, следует отвергнуть гипотезу о том, что граница ядра является источником иридия.

Отдавая должное Дж. Эвердену и его смелому утверждению о негидростатичности Земли и отмеченному им несоответствию T и $1/\varepsilon$, надо заметить, что сделанные им выводы излишне категоричны и противоречат наблюдениям. Например, группой сибирских геофизиков (Крылов и др., 1993), с использованием методов глубинного сейсмического зондирования, обнаружено, что астеносферная зона под Байкалом “простреливает” всю толщу мантии от её границы с ядром до земной коры (см. рис. 2.7). Этот выдающийся в физике Земли результат явно противоречит выводам Эверндена. Можно привести и другие примеры, но проблема, поставленная Эвернденом, остается. Может сложиться впечатление, что его выводы противоречат модели горячей Земли, согласно которой мантия наращивается на границе с ядром и, следовательно, если

Эвернден прав, и нижняя мантия, без какой-либо динамики ее вещества, существует с момента образования Земли, то, следующего из модели горячей Земли, явления - происходить не может. Можно ли найти естественное и очевидное объяснение несоответствию длительности суток и сжатию в рамках нашей модели? Попытаемся найти такое решение...

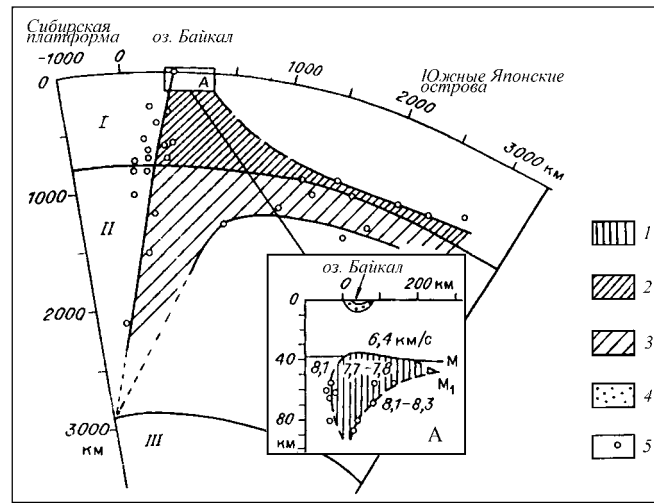


Рис. 2.7. Сейсмический разрез мантии по линии Байкал - южные Японские острова (на врезке - разрез земной коры и верхов мантии через Южно-Байкальскую впадину): 1 – аномальный слой верхней мантии; 2 – аномальная зона с дефицитом скорости $v_p = 0.09$ км/с; 3 – то же с дефицитом 0.07 км/с; 4 – осадочные породы; 5 – проекция пересечения сейсмического луча с контуром аномальной мантии. I – верхняя, II – нижняя мантия, III – ядро Земли (Крылов и др. 1993).

Оценки М.В. Стоваса. Обратимся к работам М.В.Стоваса (1975), к сожалению, не получившим должного освещения в литературе по физике Земли. (Такого же мнения придерживается и К.Ф. Тяпкин (1998), автор новой модели геоизостазии, раздел V – А.В.). Он обратил внимание на очевидный факт, что изменение угловой скорости вращения Земли обуславливает изменение полярного сжатия упруго-пластического тела Земли, что, в свою очередь, приводит к сопряженной деформации всех её основных параметров. При этом возникают широтные, меридиональные и радиальные напряжения в коровом слое, что является причиной возникновения особо напряженного состояния в широтных зонах между $30 - 40^\circ$ в обоих полушариях - зонах перемены знака главных напряжений.

Изменение ротационного режима Земли вызывает соответствующее изменение потенциала центробежных сил и, следовательно, изменение главной части потенциала U деформирующих сил, который непосредственно определяет сжатие Земли:

$$U = 1/3 \omega^2 a^2 (1 - 3 \sin^2 \varphi) . \quad (2.28)$$

Величина полной деформирующей силы:

$$F = 1/3 \omega^2 a (1 + 3 \sin^2 \varphi)^{1/2} . \quad (2.29)$$

Формулы, аналогичные (2.29), могут быть записаны для составляющих силы F (F_N , F_R , F_k) (Стовас, 1975, с. 27). Из решения уравнений для составляющих силы для эллипсоида Красовского следуют 4 вывода:

- 1) нормальная F_N (а, следовательно, и радиальная F_R) деформирующая сила на “критической” параллели ($\pm 35^\circ$) равна нулю;
 - 2) на полюсах и экваторе нормальная сила F_N равна силе F .
 - 3) тангенциальная деформирующая сила F_k , на “критической” параллели, равна F .
 - 4) на полюсах и экваторе тангенциальная сила F_k равна нулю.
- При изменении угловой скорости вращения Земли ω будут изменяться F_k и F_R :

$$\partial F_k / \partial \omega \sim 2\omega a (1 - \varepsilon) \partial r / \partial \varepsilon; \quad \partial F_R / \partial \omega \sim 2\omega (1 - \varepsilon) \partial r / \partial \varepsilon; \quad (2.30)$$

здесь $\partial r / \partial \varepsilon$ сопряженное изменение радиуса-вектора эллипсоида; r - радиус-вектор эллипсоида; a - экваториальная полуось; ε - сжатие. Рис. 2.8-а демонстрирует изменение F_R в зависимости от широты φ при вариации ротационного режима Земли. Изменение деформирующих сил F_R и F_k при изменении скорости вращения вызывает изменение формы геоида. Перемена знака силы происходит на 35-ой параллели.

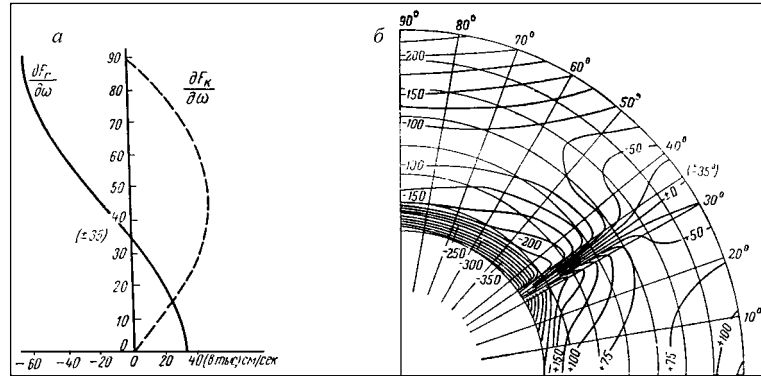


Рис. 2.8. а - Изменение F_R и F_k в зависимости от широты φ при вариации ротационного режима Земли; б - Распределение главного напряжения по широте и глубине. Модель D. Изолинии проведены через 25 дин/см² (Стовас, 1975).

Изменение параметров эллипсоида при изменении ε от 1/210 к современному 1/298 характеризуется тем, что площадь земной поверхности в районе экватора уменьшается (на 184214 км²), а площадь в районах полюсов увеличивается, соответственно (на 183474 км²). Величина радиуса a уменьшается примерно на 3 км, а c - возрастает примерно на 6.

М.В. Стовас подсчитал изменения главных напряжений σ при изменении полярного сжатия на 10^{-7} , для четырех моделей А, В, С и D:

- 1) А: $R - R_0 = 64$ км; $\sigma = 2 \times 10^{11}$ дин/см²;
- 2) В: $R - R_0 = 127$ км; $\sigma = 4 \times 10^{11}$ дин/см²;
- 3) С: $R - R_0 = 640$ км; $\sigma = 7 \times 10^{11}$ дин/см²;
- 4) D: $R - R_0 = 2900$ км; $\sigma = 2 \times 10^{12}$ дин/см²;

здесь R - радиус Земли, R_0 - внутренний радиус сферы.

Как можно видеть из этих оценок и рис. 2.8-б, величина главного напряжения σ_1 , оцененная М.В. Стовасом для различных глубин $R - R_0$, заметно превышает литостатическое давление Земли на этих глубинах.

Наши оценки величин лапласовых “поверхностных” напряжений, возникающих в верхней оболочке литосферы при её “растекании”, показывают, что для соблюдения Землей принципа минимизации гравитационной энергии возникают усилия $> 10^{11}$ дин/см², по порядку величины близкие приведенным выше.

Ответ на вопрос Дж.Ф. Эверндена. Итак, суть парадокса, замеченного Эвернденом, заключается в сильной негидростатичности Земли. Это выражается в том, что для $T = 24$ часа, Земля должна была бы обладать обратным сжатием $1/\varepsilon = 232$, в то время как она имеет $1/\varepsilon = 298$. Вывод, к которому он приходит, состоит в том, что “Земля всегда была такой” и никогда не была гидростатичной. Заметим, что Дж. Эвернден не сомневается в том, что Земля раньше вращалась заметно быстрее, правда, причину замедления он не обсуждает.

Вопрос Дж. Эверндена поставим в такой плоскости: была ли на Земле ситуация, когда $1/\varepsilon = 232$, или сжатие Земли всегда было $1/\varepsilon = 298$? Согласно нашей модели, Земля расширяется. Если бы она не вращалась, то $\varepsilon = 0$, а $1/\varepsilon = \infty$. Если бы Земля была гидростатичной, то, как мы отмечали, $1/\varepsilon_g = 232$, а она имеет: $\varepsilon_g > \varepsilon > 0$. В течение эволюции радиус Земли (R) увеличивался, возрастал и период вращения T . (За счет

сохранения момента количества движения Земли: $MvR = \text{const}$, $v = R/T$, период T то же возрастал: $T \sim R^2$). Длительность периода вращения $T = 16$ часов примерно соответствует (по нашей модели) времени около 400 млн. лет назад, когда началось энергичное формирование мантии. Предположим, что к этому моменту Земля была ещё “жидкой”, а дальше стала наращиваться жесткая мантия. Этот момент соответствует: $1/\varepsilon = 100$ (при $T = 16$ ч.). На рис. 2.9 прямая 1 показывает зависимость $1/\varepsilon$ (T) для реальной Земли $1/\varepsilon = 298$ при $T = 24$ ч. Прямая 2 вычислена по формуле Лэмба ($1/\varepsilon \sim T$) для гидростатичной Земли (Эвернден, 1997).

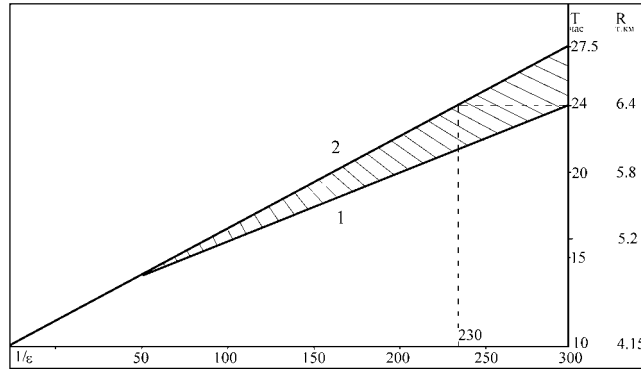


Рис. 2.9. а) Зависимость величины обратного сжатия $1/\varepsilon$ от длительности периода вращения Земли T для: 1 - реальной и 2 - гидростатичной Земли.

Разность величин $1/\varepsilon$ показывает степень негидростатичности Земли. Из этого рисунка следует, что степень негидростатичности Земли увеличивается по мере увеличения T , иначе, по мере её эволюции и расширения. Сплюснутость гидростатичной, “жидкой” Земли больше, чем жесткой. Обозначим экваториальный радиус “жидкой” Земли: $a_1 = a_0 (1 + \varepsilon_1/3)$, а “жесткой”, $a_2 = a_0 (1 + \varepsilon_2/3)$. Введем параметр $\delta = (a_1 - a_2) / (a_1 - a_0) = 1 - \varepsilon_2/\varepsilon_1$. Он характеризует изменение формы Земли по мере увеличения её размера. Если в начале процесса наращивания мантии $\delta = 0$, что говорит о гидростатичности Земли, то в конце процесса, у современной Земли, $\delta = 0.22$ (22 %). Для абсолютно твердой сферы: $\delta = 1$. Введенный нами параметр, в определенном смысле, играет ту же роль, что и числа Лява. Он показывает, насколько жестче становится Земля, точнее, её мантия, по мере эволюции. В отличие от нашего параметра, числа Лява для абсолютно твердой сферы равны нулю и больше нуля, для однородной жидкой сферы.

Таким образом, парадокс Эверндена разрешается в модели горячей Земли сравнительно просто: параметр фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$ говорит о том, что она расширялась в течение своей эволюции, проходя все значения $1/\varepsilon$, а степень негидростатичности современной Земли достигла примерно 22 %. Сейчас самое время вернуться к вопросу: почему Земля стремится к гидростатическому равновесию с фигурой с обратным сжатием $1/\varepsilon = 298$, а не 232, как этого следовало бы ожидать?

Отвечая на этот вопрос, обратимся к рис. 2.9, из которого следует, что Земля, эволюционируя и расширяясь путем наращивания толщины мантии, становилась все в меньшей и меньшей степени гидростатичной. Раньше Земля была сплюснута в большей степени и, по мере уменьшения скорости её вращения, она «отслеживала» скорее не изменение ω , а dR/dt .

Согласно модели «Горячей Земли» генерация мантии происходит в D”-слое, скорость процесса кристаллизации «контролируют» рТ-условия в этом слое, которые, в свою очередь, определяются гидродинамикой внешнего ядра и её степенью сжатия. Так

как внутренние оболочки Земли всегда имеют сжатие меньшее, чем внешние, именно это обстоятельство и объясняет, почему на Земле $1/\varepsilon = 298$, а не 232».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ботт М.** Внутренне строение Земли. М.: Мир. 1974. 376 с.
2. **Викулин А.В., Кролевец А.Н.** Чандлеровское колебание полюса и сейсотектонический процесс // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. №6. С. 996-1009.
3. **Джеффрис Г.** Земля, её происхождение, история и развитие. М.: ИЛ. 1960. 485 с.
4. **Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р.** и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S- волнах. Новосибирск: Наука. 1993. 198 с.
5. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
6. **Ламб Г.** Гидродинамика. М.: Гостехиздат. 1947. 928 с.
7. **Ляпунов А.М.** Общая задача об устойчивости движения. Череповец: Изд-во «Меркурий-ПРЕСС». 2000. 254 с.
8. **Поплавский А.А., Соловьев В.Н.** Гипотеза о макросейсмическом дефекте, порождающем землетрясения // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН.. 2000. С. 235-242.
9. **Пуанкаре А.** Фигуры равновесия жидкой массы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика». 2000. 208 с.
10. **Тяпкин К.Ф.** Физика Земли. Киев: Вища школа. 1998. 312 с.
10. **Стейси Ф.** Физика Земли. М.: Мир. 1972. 344 с.
11. **Стовас М.В.** Избранные труды. Ч. I. М.: Недра. 1975. 155 с.
12. **Эвернден Дж.Ф.** О чем говорят параметры фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$? // Изв. РАН Физика Земли. № 2.1997. С. 85-94.

III. СТРОЕНИЕ И СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИИ

Определение науки сейсмологии. Классификация землетрясений по происхождению, глубине очага и силе. Способы оценки силы землетрясений: 12-балльная шкала, шкала магнитуд, и др. Географическое распределение (главные пояса сейсмичности и отдельные области). Прогнозирование землетрясений, сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство.

Землетрясение, его очаг, гипоцентр, эпицентр и эпицентральное расстояние. Характер деформаций в очаге по теории упругой отдачи и за его пределами (Магницкий, 1965; Касахара, 1985). Сейсмичность Земли и физика землетрясений (Кузнецов, 2000).

Распространение упругих колебаний в теле Земли, понятие об изосейсмической поверхности и изосейсте, фронте волны и сейсмическом луче. Объемные (продольные и поперечные) и поверхностные (Релея, Лява и Стоунли) волны, скорости их распространения в Земле и последовательность прихода к точке записи на ее поверхности. Годографы различных типов сейсмических волн, их траектории внутри Земли (Стейси, 1972).

Определение скорости распространения сейсмических волн в Земле с помощью уравнения Гергольцта - Вихерта. Анализ данных о скоростях распространения продольных и поперечных волн по радиусу Земли, выделение границ раздела скоростей 1-го и 2-го рода и разделение Земли на земную кору (слой "А"), мантию (верхнюю, переходную область и нижнюю - слои "В", "С" и "Д") и ядро (внешнее, переходная зона и внутренне - слои "Е", "F" и "G") (Магницкий, 1965; Стейси, 1972).

Проявление внешнего и внутреннего ядер Земли в особенностях выхода объемных сейсмических волн на поверхность Земли (Магницкий, 1965).

Состояние слоев вещества Земли по данным сейсмологии. Распределение скоростей и сейсмических волн в земной коре (континентов и океана), типы земной коры (по данным сейсмологии). Скоростная модель земной коры континентов с инверсионным слоем, свойства последнего (Магницкий, 1965).

Сейсмология и глобальная тектоника (Гуттенберг, 1963; Ле Пишон, Францито, Боннин, 1977; Новая глобальная тектоника, 1974).

Определение науки сейсмологии. Классификация землетрясений по происхождению, глубине очага и силе. Способы оценки силы землетрясений: 12-балльная шкала, шкала магнитуд, и др. Географическое распределение (главные пояса сейсмичности и отдельные области). Прогнозирование землетрясений, сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство. Сейсмология – это наука, изучающая особенности распределения землетрясений, процессов, протекающих в их очагах, и распространение упругих волн в недрах Земли. В перечне наук о Земле наиболее тесно сейсмология «граничит» с тектоникой и физикой недр Земли.

Под землетрясением или трясением Земли обычно подразумевается трясение земной поверхности. В сейсмологии под землетрясением понимают не только трясение земной поверхности, но и процесс разрушения, нарушения сплошности Земли в некоторой области (области очага), при котором потенциальная упругая энергия, запасенная в недрах планеты, переходит в кинетическую энергию колебаний, уносимую из очага сейсмическими волнами.

В развитии мировой сейсмологии наша страна занимает видное место. Русский академик Б.Б. Голицын является одним из основателей сейсмологии как точной науки.

Задолго до создания сейсмологии М.В. Ломоносов указывал, что землетрясение есть следствие процессов, происходящих внутри Земли и связанных с горообразованием и изменениями в глубинных горных породах. И.В. Мушкетов и А.П. Орлов составили и

опубликовали в 1893 г. «Каталог землетрясений Российской империи», который стимулировал разработку Особой комиссией при Императорском Русском географическом обществе программы наблюдений за землетрясениями и, как следствие, начало создания сети сейсмических станций на территории России (Мушкетов, Орлов, 1893).

Одна из таких станций начала свою работу в Петропавловске-Камчатском в 1915 г., удаленном в то время от научных центров на максимально возможное расстояние. Первый наблюдатель А.А.Пурин, чиновник радиотелеграфа, в 1917 г. в Петропавловске-Камчатском опубликовал брошюру «О землетрясениях на Камчатке и их регистрация». Всего в России в 1915 г. насчитывалось 15 сейсмических станций, что составляло около $\frac{1}{4}$ всех сейсмических станций мира (Пурин, 1917). Российские станции были оснащены лучшими в то время сейсмографами, сконструированными Б.Б. Голицыным (Голицын, 1912).

Землетрясения – грозное явление природы. Достаточно сказать, что от землетрясений на планете, в среднем, из каждых 8000 человек один погибает и примерно десять - в большей и меньшей степени страдают.

Землетрясения происходят вследствие движения земной коры (тектонические землетрясения), извержения вулканов (вулканические землетрясения), обвалов и оползней (денудационные землетрясения) и деятельности человека – в результате взрывов, сооружения значительных сооружений (плотин и появления водоемов) и разработки месторождений (наведенная сейсмичность). Всем этим типам землетрясений присущи как общие черты – излучение сейсмических волн разной интенсивности, так и отличия. Ниже мы будем касаться только землетрясений, происходящих в земных недрах в результате движения слагающих их блоков.

Основные географические закономерности распределения землетрясений планеты можно видеть из данных, представленных на рис. 3.1. Видно, что землетрясения, как правило, происходят вдоль границ тектонических плит; десять крупнейших плит планеты представлены на этом рисунке. Плиты перемещаются относительно друг друга по поверхности подстилающих их более мягких пород.

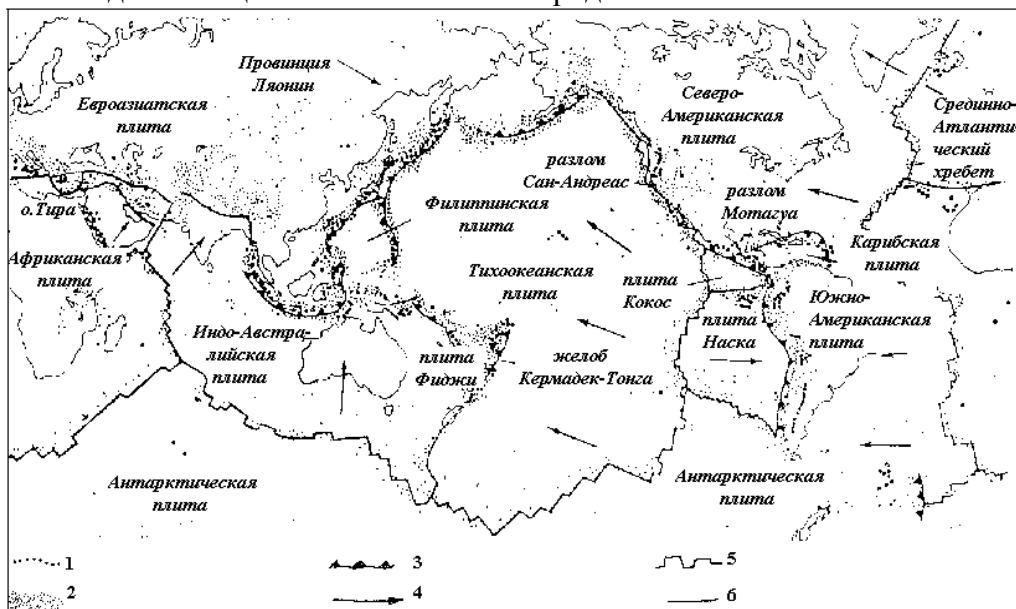


Рис. 3.1 Карта мира, показывающая расположение основных тектонических плит, а также места недавних землетрясений, вулканических извержений. Эпицентра землетрясений обозначены мелкими точками, вулканы – крупными точками.

1- вулканы. 2 – зоны землетрясений. 3 – зоны субдукции (подвига). 4 – направление движения плит. 5 – зоны разрастания дна вдоль океанических хребтов, смещенные трансформными разломами. 6 – зоны столкновения плит.

В краевых частях каждой плиты, там, где она соприкасается с другими плитами, горные породы оказываются под действием больших деформирующих (*тектонических*) сил, вызывающих в них физические и даже химические изменения. Именно на краях плит геологические структуры Земли подвергаются наибольшему воздействию сил, возникающих в результате движения и столкновения плит, и именно там происходят самые крупные геологические преобразования.

К наиболее активным относятся Тихоокеанский и Альпийско-Гиммалайский сейсмические пояса, в пределах которых выделяется примерно 80-85% и 10-15% всей сейсмической энергии планеты.

Распределение землетрясений по глубинам гипоцентров можно видеть на сейсмических разрезах, построенных по сейсмическим данным, полученным на Камчатке (рис. 3.2). Видно, что землетрясения происходят в пределах тонкого слоя, простирающегося под Камчатку под углом примерно 45° . Отметим, что на Камчатке и Курилах происходят землетрясения с глубиной гипоцентра до 600-700 км. Для других участков тихоокеанского пояса распределения землетрясений может отличаться.

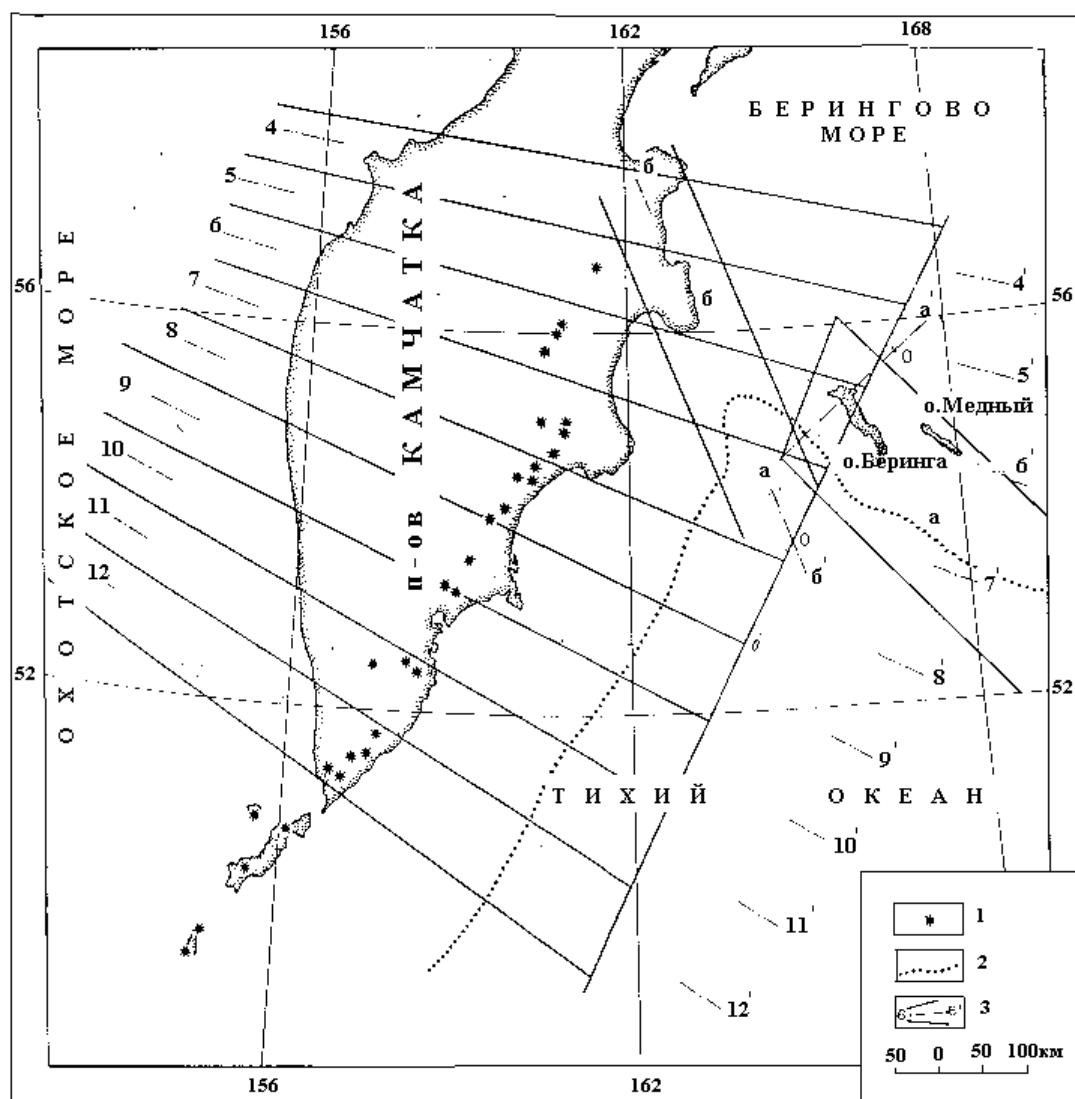


Рис. 3.2.а Схема расположения разрезв сейсмоактивного блока по данным за 1964-1972 гг. 1 – вулканы; 2 – ось глубоководного желоба; 3 – секторы и осевые линии, по которым построены разрезы рис.2.

Принято называть землетрясения с глубинами очагов до 30-50 км – коровыми, с глубинами в диапазоне 30 – 300 км – промежуточными и с глубинами больше 300 км – глубокими.

Для классификации землетрясений по интенсивности их восприятия были разработаны макросейсмические шкалы. Первые такие шкалы появились в конце XIX – начале XX веков: шкалы Росси-Форея (10 балльная) в Европе, Меркали (12 балльная) в

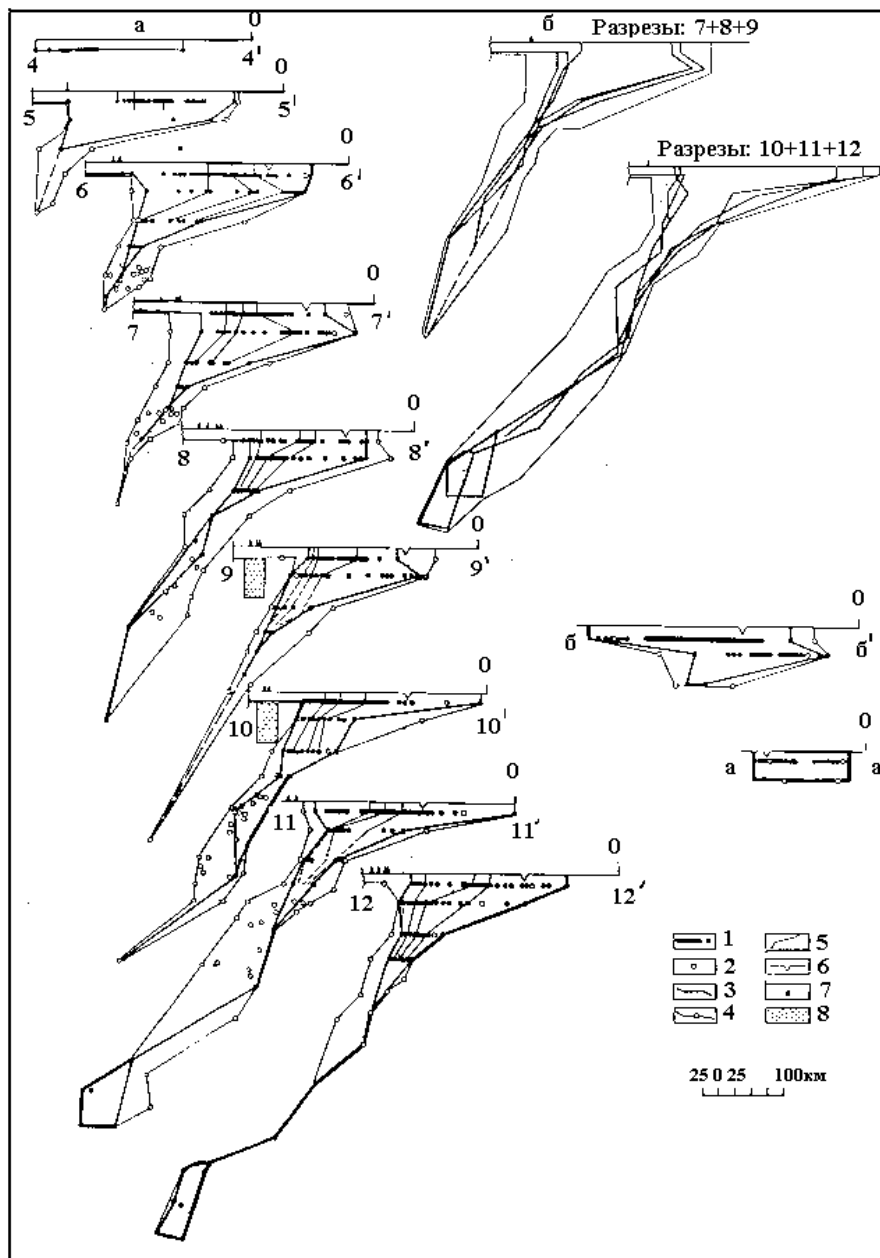


Рис. 3.2.б. Разрезы сейсмоактивного блока. а – вертикальные разрезы по секторам;

б – совмещенные разрезы. 1 – очаги землетрясений с $K \geq 11.0$; 2 – очаги землетрясений с $K 9 \div 10.0$; 3 – граница сейсмоактивного блока по землетрясениям с $K > 11.0$; 4 – границы по землетрясениям с $K > 9.0$; 5 – линии, отделяющие справа налево 25, 50, 75% землетрясений с $K > 11.0$; 6 – ось глубоководного жёлоба; 7 – вулканы; 8 – гипотетический магматический очаг Авачинского вулкана.

США и JMA (Japan Meteorological Agency, 10 балльная) в Японии. В России принята 12 балльная шкала MSK – 64, которая является близкой шкале Меркали (Медведев, 1968).

Краткая характеристика интенсивности землетрясений по шкале MSK-64 сводится к следующему.

- 1 балл – колебания почвы отмечаются только приборами;
- 2 балла – землетрясение ощущается в отдельных случаях людьми, находящимися в спокойном состоянии;
- 3 балла – колебания отмечаются немногими людьми;
- 4 балла – землетрясение отмечается многими людьми; возможно дребезжание стекол;
- 5 баллов – качание висячих предметов, многие спящие просыпаются;
- 6 баллов – многие люди пугаются и выбегают из зданий, легкие повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке, в немногих случаях в сырых грунтах возможны трещины до 1 см, в горных районах отдельные случаи оползней, наблюдаются изменения дебита источников и уровня воды в колодцах;
- 7 баллов – большинство людей испуганы и выбегают из помещений, многие люди с трудом удерживаются на ногах, колебания отмечаются лицами, ведущими автомашины, звенят большие колокола, трещины в штукатурке и откалывание отдельных кусков, тонкие трещины в стенах, в немногих случаях возникают новые или пропадают существующие источники воды;
- 8 баллов – испуг, паника, кое-где обламываются ветви деревьев, сдвигается и иногда опрокидывается тяжелая мебель, часть висячих ламп повреждается, большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб, трещины в грунтах достигают нескольких сантиметров, возникают новые водоемы;
- 9 баллов – всеобщая паника, большие повреждения мебели, животные мечутся и кричат, в некоторых зданиях обвалы, трещины в грунте достигают 10 см, скалы обваливаются;
- 10 баллов – всеобщее разрушение зданий, трещины в грунте могут достигать 1 м, в прибрежных районах перемещаются большие песчаные и илистые массы, возникают новые озера;
- 11 баллов – катастрофа, серьезные повреждения даже зданий хорошей постройки, значительные повреждения почвы в виде широких трещин, разрывов, и перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях, многочисленные горные обвалы;
- 12 баллов – изменения рельефа, сильное повреждение или разрушение практически всех наземных и подземных сооружений, радикальные изменения земной поверхности.

Необходимо отметить, что эта шкала справедлива для классификации только не сейсмостойких зданий.

С целью предупреждения возможных последствий предпринимаются попытки предсказания землетрясений. В этом направлении намечены некоторые успехи, однако, практических результатов пока не достигнуто. В значительно большей степени развито направление сейсмического районирования, т. е. разбиение территории на области с различной интенсивностью колебаний.

С целью более тщательного районирования территории в случае сооружения на ней особо важных объектов (атомные электростанции, плотины и т. п.) проводится детальное сейсмическое районирование (ДСР) и микросейсмическое районирование (МСР). В соответствии с этими картами инженерами – строителями разрабатываются соответствующие сейсмостойкие конструкции, которые способны учесть специфику землетрясений и выдержать колебания соответствующей интенсивности (Сейсмическое..., 1977, 1980; Сейсмическая..., 1979).

Для территории Камчатки такое районирование (общее сейсмическое районирование – ОСР) выполнялось многократно (рис. 3.3) (Проблемы..., 2000). Из данных, приведенных на этом рисунке, видно, что с увеличением наших знаний о сейсмическом процессе допустимое картой ОСР значение наибольшей интенсивности колебаний почвы для территории г. Петропавловска-Камчатского, в среднем, один раз в двадцать лет увеличивалось на единицу: 7 баллов в 1938 г., 8 баллов в 1963 г., 9 баллов в 1978 г. и более 9 (10) баллов в 1997 г.

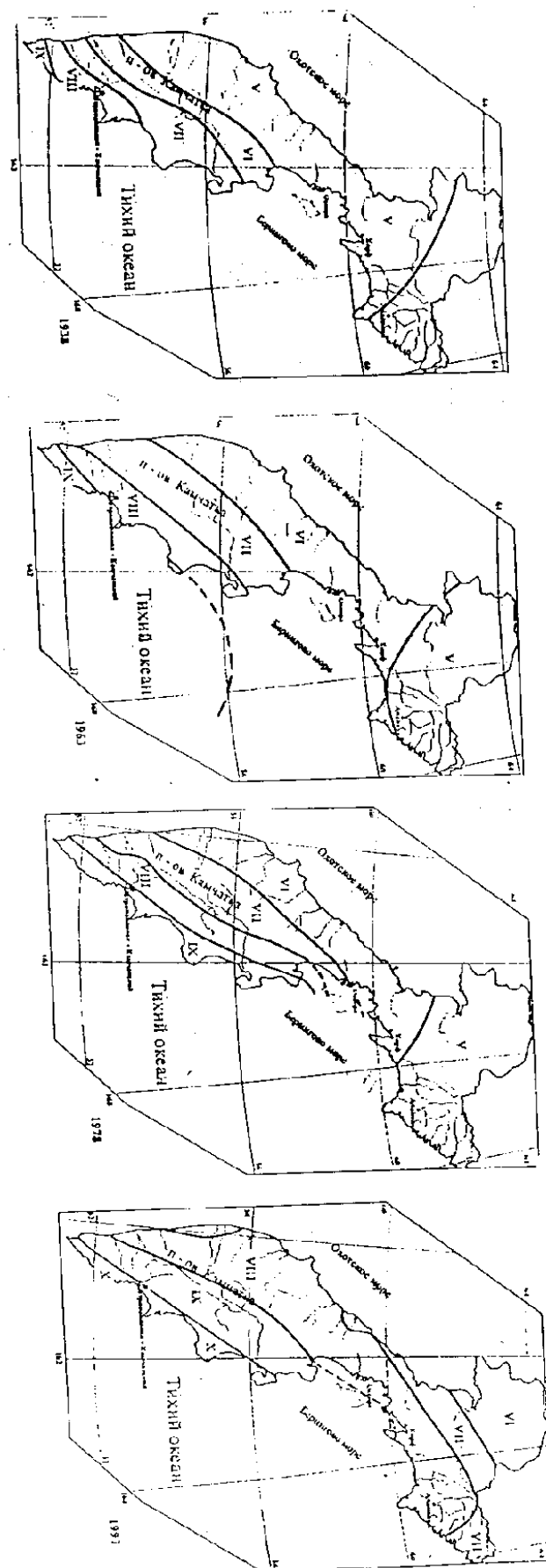


Рис.3.3.Карты общего сейсмического районирования (ОСР) территории Камчатки, построенные в 1938,1963,1978 и 1997 гг

Землетрясение, его очаг, гипоцентр, эпицентр и эпицентральное расстояние. Характер деформаций в очаге по теории упругой отдачи и за его пределами (Магницкий, 1965; Касахара, 1985). Всякое землетрясение возникает вследствие внезапного высвобождения значительного количества энергии в некотором объеме внутри Земли. Как правило, при этом в некоторой области в теле Земли происходят разрушение и другие необратимые деформации горных пород. Эта область называется очагом землетрясения, а ее центр – гипоцентром землетрясения. Проекция гипоцентра на земную поверхность называется эпицентром, а проекция очага – эпицентральной областью.

Вне очага землетрясения деформации носят преимущественно характер упругих и распространяются от него по законам распространения упругих волн. В данном случае эти волны называются сейсмическими. К ним применяются обычные понятия фронта и луча. Расстояние до данной точки от эпицентра, измеряемое в линейной мере или соответствующим центральным углом, называется эпицентральным расстоянием. Поверхность, во всех точках которой плотность потока сейсмической энергии одинакова, называется изосейсмической. Пересечение изосейсмических поверхностей с поверхностью Земли образуют линии, называемые изосейстами. Для однородной изотропной Земли при значительном удалении от очага изосейсмические поверхности будут сферами, а изосейсты – окружностями.

При расхождении от очага землетрясения сейсмическая энергия распределяется на все большую поверхность. Это ведет к уменьшению плотности потока сейсмической энергии с увеличением расстояния r от гипоцентра. Явление это называется геометрическим расхождением. В однородном изотропном полупространстве для значительно превосходящего размеры очага r расхождение волн изменяется по закону $1/r^2$, для распространяющейся в плоском слое цилиндрической волны – по закону $1/r$. Фактически спад плотности потока сейсмической энергии происходит гораздо сложнее из-за неоднородности Земли, особенностей излучения из очага, поглощения энергии в процессе внутреннего трения, рассеяния на различных неоднородностях и границах.

С целью количественного определения выделяющейся в очаге землетрясения энергии была разработана шкала магнитуд. Отметим, что макросейсмические шкалы позволяют классифицировать только интенсивность колебаний в точке, которая может быть одинаковой для землетрясений разной магнитуды, удаленных от точки наблюдения на разные расстояния. Магнитуда же землетрясения количественно связана с процессом изменения энергии в его очаге.

Под магнитудой землетрясения понимается величина, определяемая формулой

$$M = \lg(A/T)_{\max} + f(\Delta),$$

где A – максимальное значение амплитуды смещения почвы; T – соответствующий такой амплитуде период; $f(\Delta)$ – эмпирическая калибровочная функция, дающая ход изменения A/T в зависимости от эпицентрального расстояния Δ для волн разных типов. Связь энергии E , выделившейся в очаге, с магнитудой дается соотношением

$$\lg E = 11 + 1,6M \text{ (Гутенберг, Рихтер, 1961).}$$

Существуют и другие такого же типа зависимости между энергией и магнитудой. В нашей стране также используется понятие энергетического класса, который линейно связан с магнитудой и численно равен показателю степени десятичного логарифма от величины сейсмической энергии, выделившейся в очаге землетрясения, выраженной в эргах.

Обследование большого землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г. позволило выявить ряд черт, которые впоследствии были заложены в модель очага землетрясения. Было показано, что движение при землетрясении можно интерпретировать в виде горизонтального смещения двух блоков земной коры по разделяющему их разрыву Сан-Андреас. Эти смещения оказались сильно убывающими по мере удаления от линии разрыва. Анализ смещений позволил предложить теорию возникновения землетрясений, получившую название *теории упругой отдачи* (Reid, 1910). Суть теории заключается в следующем. Пусть на рис. 3.4 AA – линия разграничения блоков коры I и II. В результате

тектонических процессов эти блоки начали смещаться в направлении, указанном стрелками. Пусть линия ВВ обозначает момент начала движения. Так как между блоками имеется сцепление, то в процессе их перемещения в пограничной зоне возникнут деформации сдвига (угловые), которые характеризуются деформацией линий ВВ и В'ОВ'. Угловые деформации приведут к возникновению скалывающих напряжений, убывающих по мере удаления от АА. Когда напряжения достигнут предела прочности пород на скалывание или силы сцепления по шву АА, произойдет нарушение сплошности (разрыв) и пограничные части блоков распрямятся, так что ОВ займет положение В'б' (так как не вся деформация была упругой, то распрямление будет несколько неполным). Если ООВ прямая вкост разрыва, проведенная к моменту землетрясения, то после скачка она займет положение б'В. Сплошная линия б'В покажет величину векторов смещения в процессе землетрясения. (Подобная схема справедлива и для вертикальных смещений).

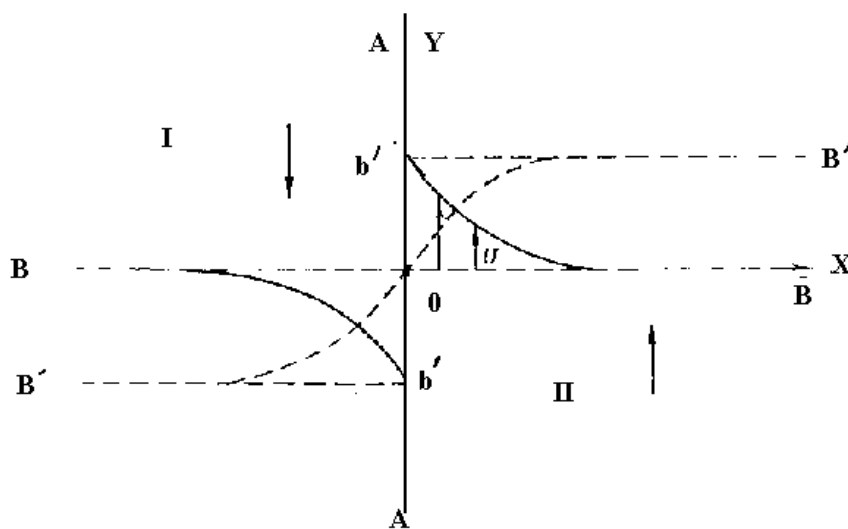


Рис. 3.4. Схема, поясняющая механизм упругой отдачи.

Примерно такая же картина дается векторами смещений, например, при землетрясении в районе Танго (Япония) в 1927 г., которая приведена на рис. 3.5, где жирной линией показан разрыв Гомура.

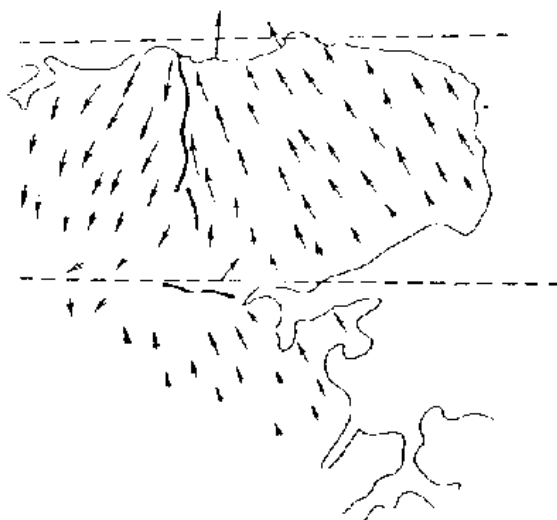


Рис. 3.5. Вектора смещений поверхности грунта (стрелки) и положение разлома Гомура (жирная линия) в очаге землетрясения Танго (Япония) в 1927г.

Сейсмичность Земли и физика землетрясений (Кузнецов, 2000, с. 230).

«Сейсмичность Земли и способ ее реализации - тектонические землетрясения, является общепланетарной особенностью. Сейчас доказано, что аналогичные явления происходят и на Луне. Принято считать, что при помощи землетрясений реализуется “сброс” накопившейся в Земле тектонической энергии. Похоже, что другим способом для Земли “избавиться” от этой энергии можно с помощью вулканизма. В основе этих грандиозных диссипативных процессов лежат два различных элементарных акта: образование трещины и возникновение расплава. И тот, и другой являются реакцией среды на внешнюю нагрузку. Первый ведет к сейсмичности, второй - к вулканизму. Основная причина возникновения подобных явлений на Земле состоит в реализации принципа минимизации её потенциальной гравитационной энергии. Еще Ньютон заметил, что форма Земли соответствует расплавленному состоянию ее недр. По-видимому, присутствие на Земле вулканических процессов определяет это соответствие. Однако, не только вулканизм “отслеживает” соответствие формы Земли принципу минимизации энергии. Совсем недавно авторы (Chao et al., 1995) пришли к заключению, что землетрясения могут приводить к тому, что наша планета становится в большей степени сферической и более компактной, а ее гравитационная энергия уменьшается (не совсем ясным способом), “перекачиваясь” в тепло. Более того, эти авторы утверждают, что землетрясения не столько «сбрасывают» тектонические напряжения, сколько перераспределяют их влияние по литосфере Земли. (Аналогичный вывод следует и из ротационной волновой модели сейсмотектонического процесса, развиваемый автором в следующем IV разделе книги. – А.В.)

Сейсмичность Земли является результатом действия на Земле процессов самоорганизации. По-видимому, сейсмичность, в этом плане, является неотъемлемой частью этих процессов, неся на себе своеобразную роль «диффузии» (перколяции) напряжений. Роль переноса в этих процессах выполняет, в таком случае, движение (дрейф, растекание) литосферы. По-видимому, понять природу самоорганизующихся процессов, происходящих на Земле, можно только после того, как будет достигнута необходимая ясность в физике движения (геодинамике) литосферы и физике самого землетрясения. (Автор может согласиться с этим выводом В.В. Кузнецова с той только разницей, что, во-первых, механизм самоорганизации определяет не процесс «диффузии», а волновые процессы: разные типы описывающих эти процессы уравнения. Более того, во-вторых, следствием ротационного подхода является вывод о том, что самосогласованное упругое поле Земли является коллективным результатом движения всех блоков и плит планеты. – А.В.).

Физика землетрясения изучается в различных научных центрах мира более 80 лет. Начало этим исследованиям было положено Х.Ф.Рейдом (Reid, 1911), когда он выдвинул свою “теорию упругой отдачи”, которая сохранила основную суть и используется сейсмологами до настоящего времени. Эта теория базировалась на хорошо заметной аналогии между разломом, возникшим в момент землетрясения в Сан-Франциско в 1908 г., и разломом Сан-Андреас, на котором построен этот город, оказавшийся практически разрушенным этим землетрясением. Суть модели Рейда состояла в том, что трещина, разрушившая город, распространялась с глубины в несколько десятков километров к поверхности Земли. Идея Рейда практически не нашла такого яркого, как в Сан-Франциско, подтверждения в большинстве других произошедших с того времени землетрясений. Прошло много лет, за эти годы было высказано много идей, однако, физика землетрясения так и осталась неясной.

В последние годы разработано несколько моделей сейсмичности. К их числу относится модель Барриджа-Кнопова (Burridge, Knopoff, 1967), предложенная для объяснения повторных ударов (афтершоков) и в последнее время получившая большое развитие. Суть модели можно пояснить на примере санок, стоящих на поверхности с трением, которые тянут веревкой с пружиной. В начале натягивается пружина, а санки

стоят, затем, когда усилие становится больше чем сила трения, санки начинают движение скачком. Если таких “санок” много, то взаимное влияние дискретных элементов (санки, “прыгая”, дергают за собой другие) может приводить к тому, что одновременно в модели могут “прыгнуть” сразу несколько элементов. Это и есть “главный удар” - землетрясение, в то время как “прыжки” других блоков, это повторные удары, или афтершоки. Заложенные в Б-К модели идеи в дальнейшем использовались при построении других моделей *самоорганизации* (Bak et al., 1987; Olami et al., 1992). Среди такого рода моделей следует также отметить модель «Ансамбль излучающих трещин».

Модель очага со множеством неровностей (Гусев, 1993; с. 24-36). «Широкополосный эмпирический закон масштабирования очаговых спектров землетрясений. Впервые закон масштабирования очаговых спектров (ЗМОС), определяющий закономерности изменения колебаний энергии разных частот (в том числе высоких) в зависимости от "величины" (магнитуды или сейсмического момента) землетрясения, предложил Хаскелл (1966) в виде известного закона ω^{-3} . Аки (1967) улучшил согласование этого ЗМОС с наблюдениями, введя теперь уже классический закон ω^{-2} . Оба эти ЗМОС исходили из стохастической модели источника, и предполагали, что выполняется общее геометрическое и кинематическое подобие (автомодельность) очагов. Еще более реалистичский ЗМОС, также типа ω^{-2} , предложил Брун (1970). Бруновский ЗМОС широко применялся для анализа некогерентных колебаний (хотя Брун исходил из детерминистской модели). Аки (1972) улучшил согласие своего ЗМОС с наблюдениями, ценой отказа от подобия (автомодельности) спектров.

С появлением работ Тэтчера и Хэнкса (1973) и Канамори и Андерсона (1975) вопрос о существовании приближенного геометрического и кинематического подобия очагов был однозначно решен положительно в отношении параметров очагов, определяемых из длинопериодных колебаний, а также в отношении характерной ("корнер") частоты спектра. С другой стороны, эмпирический закон масштабирования Фурье-спектров акселерограмм (Трифунак, 1976) впервые дал основу для надежного эмпирического описания общей картины очаговых спектров в полосе 0,5-10 Гц. Имелась также разрозненная, но очень важная информация о трендах ЧИСС-спектров, полученная группами К.К. Запольского и Т.Г. Раутиан. Существенная информация о реальном ЗМОС содержалась также в уже выявленных эмпирических связях между магнитудами $m_b - M_S$, $M_S - M_W$ и т.п.

В статьях (Гусев 1979; 1983; 1984) эта информация была сведена в единую систему, что впервые позволило построить в первом приближении эмпирический ЗМОС в широкой полосе частот. Его отличительной новой чертой являлось, в первую очередь, использование в качестве опорной шкалы сейсмического момента M_W (ранее при построении эмпирических законов масштабирования в основном использовали магнитуду M_L или энергетический класс K). Переход к шкале M_0 позволил уверенно сравнивать и сопоставлять данные разных регионов, использующие разные магнитудные шкалы. Впервые создалась возможность интерполяции и экстраполяции параметров колебаний в диапазоне $M = 7 - 8,5$, где из-за явления насыщения ненадежны все традиционные магнитуды, и лишь шкала M_0 дает надежную опору.

При построении ЗМОС была также устранена традиционная в 70 гг. неточность - применение формул для полупространства при расчетах очаговых спектров. Были использованы частотно-зависимые импедансные поправки. Эти методические приемы позволили нам в рамках единой схемы, с одной стороны, обсуждать эмпирические очаговые спектры в собственном смысле (то есть приведенные к непоглощающей и однородной среде), а, с другой стороны, полностью сохранять возможность прогноза воздействия на поверхность.

Важным новым параметром предложенного А.А. Гусевым семейства очаговых спектров является верхняя частота среза очагового спектра ускорений. Сама идея наличия такого верхнего среза в спектрах акселерограмм тривиальна, так как эта черта прекрасно видна в средних эмпирических спектрах. Новой является идея очаговой природы этого феномена. Практически одновременно то же явление было специально рассмотрено Хэнксом (1982), но он не стал приписывать это явление именно очагу, склоняясь к объяснению через поглощение в среде. Затем Пападжорджу и Аки (1983; 1985) поддержали идею очаговой природы максимальной частоты и отметили ее медленный спад с магнитудой. Само существование зависимости максимальной частоты от магнитуды является прямым указанием на ее очаговую природу.

Изложенные результаты представляют основу для решения прямых и обратных задач для нестационарного протяженного некогерентного излучателя в рассеивающейся среде.

О вероятностной природе процессов генерации некогерентного излучения. Первые попытки формального описания стохастической природы некогерентного излучателя (Хаскелл, 1966; Аки, 1967), а также более продвинутая теория Андриуса (1981) вводили случайную функцию скачка смещения на разломе $b(x,y,t)$ и автокорреляционную функцию для ее производных. Менее строгий подход - описать очаг как совокупность элементарных излучателей (субочагов) со случайными фазами - восходит к Хаузнеру (1955), он был развит Шебалиным (1971), Бландфордом (1975) и Хэнксом (1979). Все эти авторы предполагали, что субочаги представляют собой иерархическое семейство с широким набором размеров. Этому разнообразию размеров соответствует широкий спектр генерируемых характерных частот, так что порождаются реалистические широкополосные спектры. При этом под субочагом обычно подразумевалась элементарная трещина, и ясно не формулировалось, смыкаются ли эти трещины при формировании единого очага.

Второе поколение моделей с субочагами отошло от идеи иерархии субисточников. Первая важная модель этого рода - специфическая барьерная модель Аки-Пападжорджу (1983; 1985) предполагает, что очаг - разлом покрыт системой однотипных субочагов-трещин, причем эти трещины отделены друг от друга прочными барьерами, которые не разрушаются (по крайней мере, в процессе формирования данного очага землетрясения). Эта модель впервые позволила провести количественную интерпретацию акселерограмм ряда сильных землетрясений в широкой полосе частот, определить предположительные параметры трещин - субочагов. Построенный на этой основе теоретический ЗМОС качественно напоминает определенное выше семейство эмпирических средних очаговых спектров ускорения.

Другие исследователи связывают генерацию высокочастотных волн с разрушением прочных пятен-неровностей (asperity) на (в остальном) малопрочной поверхности разрыва-разлома. Костров и Дас выдвинули идею пятен контакта-неровностей, и детально исследовали случай одиночной неровности (1983; 1986), а затем провели численное динамическое моделирование разлома с сеткой неровностей (1988). Идею набора неровностей в очаге далее развил Боутрайт (1988). Однако до работ А.А. Гусева (1986; 1988; 1989) не предпринималось попыток интерпретировать на основе подобных представлений наблюдательный материал по сильным движениям (в первую очередь акселерограммы и их спектры) и тем более изучать свойства реальных неровностей на разломе. А.А. Гусев выдвинул и применил для этой цели "модель очага со множеством неровностей". Такое название отражает главное характерное свойство модели - наличие неровностей и тот факт, что число неровностей в ней может быть весьма велико (сотни уже при магнитуде $M = 7,5$).

Модель исходит из того, что сопротивление разлома сдвигу сконцентрировано в неровностях. Поэтому распространение сейсмического разрыва ("вспарывание разлома") фактически сводится к более или менее последовательному разрушению дискретных неровностей, импульсы, генерируемые при разрушении каждой из неровностей, можно

рассматривать как случайный импульсный процесс; его свойства и определяют свойства короткопериодного излучения (акселерограммы). Используя результаты Кострова и Дас, мы полагаем, что каждый такой импульс соответствует включения на поверхности разлома некоторой силы ("сейсмической силы неровности") с характерным временем нарастания порядка $2R_a/c$, где R_a - радиус условно круговой неровности, c – скорость сейсмической волны.

Таким образом, совокупность наблюдаемых свойств очагов землетрясений в широкой полосе частот может быть объяснена как в частотной, так и во временной области на основе представления о множестве дискретных субочагов – прочных неровностей, последовательно разрушающихся при распространении сейсмического разрыва, причем импульсы от неровностей складываются в некогерентный сигнал».

Модель процесса землетрясения (Мишин, 1993). «Землетрясение можно рассматривать как естественный кратковременный процесс возбуждения сейсмического излучения в сплошной среде земных недр. Измерения в источниках излучения, в очагах землетрясений, никогда не проводились, поэтому заключения о характере процессов в очагах до настоящего времени носят умозрительный характер. Вся информация о процессе землетрясения складывается из наблюдений за сотрясениями, вызываемыми сейсмическими волнами на поверхности Земли. Поэтому неизбежно сосуществование разных представлений о процессах в очаге, нередко противоречащих друг другу. Сначала мы остановимся на модели, следующей из предыдущего рассмотрения сейсмических процессов, а затем коснемся содержания других.

В качестве модели процесса землетрясения рассмотрим следующее положение: землетрясение - *это перемещение блока горных пород и удар при его торможении*. В самой общей форме об этом говорили Э. Зюсс, Б.Б. Голицын и другие исследователи прошлого. Рассмотренные в предыдущих главах экспериментальные результаты позволяют дополнительно аргументировать положения этой модели.

Как отмечалось раньше, причиной возбуждения сейсмических волн в системах связанных масс всегда является торможение движущейся массы на контакте с неподвижной средой. С точки зрения рассматриваемой модели землетрясения имеют ту же природу, что и удары, взрывы, обвалы горных пород. Энергия сейсмического излучения, формируемого в очаге, определяется кинетической энергией объектов, входящих во взаимодействие с неподвижной средой. Отличие землетрясений от этих процессов заключается главным образом в том, что процесс землетрясения до настоящего времени остается невоспроизводимым и о его параметрах приходится судить только по последствиям».

Сильным аргументом в пользу «ударной» модели С.В. Мишина являются результаты, связывающие сейсмическую энергию землетрясений с гравитационной энергией планеты, полученные в работе (Chao, Gross, 1995). (См. раздел V, с. 156).

Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружения (Смирнов, 1992). «Экспериментальное обоснование новой концепции сейсмического разрушения здания. По многочисленным наблюдениям большинство сейсмических разрушений зданий происходит сразу после первых наиболее мощных поперечных толчков. Результатом таких толчков, которые, конечно же, не успевают раскачать здание, т. е. вызвать в нем появление опасных сил инерции, является почти мгновенный срез колонн или стен здания, вследствие чего происходит разрушение здания до попадания его в резонанс.

Известно, что при землетрясениях появлению инерционных сил всегда предшествует появление в вертикальных элементах зданий волн поперечного сдвига, вызванных горизонтальными толчками, т. е. толчки и сдвиговые волны первичны, а инерционные силы - вторичны. Логично было бы считать именно эти толчки и волны сдвига одной из главных причин сейсмического разрушения зданий, тем не менее,

единственной общепринятой причиной сейсмических разрушений сооружений до сих пор считаются инерционные силы.

Такой весьма надуманный и противоречащий всем экспериментам подход был оправдан лишь в начале формирования сейсмической науки, когда она вынужденно строилась на теории колебаний. Однако при современном развитии теории волновых процессов и теории ударной прочности материалов такой подход заводит в тупик теорию и практику сейсмозащиты здания и от него следует отказаться.

Традиционный сейсмический расчет зданий заключается в определении значения статической силы, «эквивалентной» указанным инерционным силам, которая прикладывается к массивным элементам и дискам перекрытий. При этом для определения прочности и неразрушимости элементов здания используются обычные статические прочностные константы материалов. Однако всесторонний и тщательный анализ многочисленных реальных схем разрушения зданий показывает, что во многих случаях они никак не согласуются с инерционной концепцией разрушения и, как правило, противоречат ей. Множество типов реальных сейсмических разрушений невозможно объяснить, используя эту концепцию расчета, т. е. только воздействием инерционных сил. Это значит, что есть очень существенный изъян в существующей теории сейсмического расчета зданий, который требует исправления.

Выводы из реальных схем разрушения. Поскольку фундаментальные теоретические положения строительной механики и теории предельного равновесия обоснованы многократными экспериментами и неопровержимы, то из анализа многочисленных примеров следует принципиально важный общий вывод: во всех рассмотренных случаях инерционные силы не могли вызвать такие сейсмические разрушения зданий. Все они были вызваны совершенно иным по своей природе, волновым ударно-сдвиговым воздействием, приложенным к зданиям, что привело к их разрушению еще до появления инерционных сил. До сих пор это воздействие почти не принималось во внимание при прочностном расчете и не было детально исследовано.

Мало того, среди множества реальных случаев сейсмического разрушения практически почти невозможно найти примеры, которые бы прямо свидетельствовали о том, что эти разрушения вызваны появлением опасных инерционных сил. Дело в том, что почти все реально возникавшие случаи изгибного разрушения колонн, высоких стен и ядер жесткости, похожие на разрушение от сил инерции, могут быть вызваны действием изгибных напряжений, появление которых сопровождается прохождением волн сдвиговых напряжений по вертикальным элементам зданий. Если волны сдвига имеют длину, превышающую высоту здания, указанные изгибные напряжения достигают очень больших значений и приводят к изгибному разрушению зданий, которое внешне выглядит точно так же, как и разрушение от инерционных сил. Однако такое разрушение происходит раньше появления инерционных сил.

Если учесть еще, что подавляющее большинство сейсмических разрушений происходит сразу же после первого толчка, когда здание не успевает раскачаться, а о появлении резонансных инерционных сил не может быть и речи, можно сделать общий достаточно смелый, но единственно возможный вывод о том, что подавляющее большинство сейсмических разрушений происходит не от инерционных сил, а от волнового воздействия, которое будет описано ниже.

Обоснование малой вероятности появления разрушающих инерционных сейсмических сил. Общепринятая концепция сейсмических разрушений зданий состоит в следующем. В грунте при землетрясениях возникает очень широкий спектр гармонических колебаний с разными частотами, но здание всегда «улавливает» в этом спектре именно свою частоту и, резонируя только с ней, разрушается, никак не реагируя на другие частоты. Однако эта концепция не имеет ничего общего с реальностью. Дело в том, что сейсмические перемещения вообще не являются колебаниями, и тем более, гармоническими. При гармонических колебаниях должны были бы происходить

возвратно-поступательные перемещения грунта, изменяющиеся по закону синуса или косинуса (как это происходит при колебаниях зданий). На самом же деле землетрясения создают множество хаотичных толчков, т. е. скачкообразных перемещений, которые вызваны происхождением наиболее опасных поверхностных волн сжатия в грунте. (См. выше модель А.А. Гусева (1993) – А.В.) Во фронте этих волн скачком появляется скорость перемещения грунта, а за волной она исчезает. Ясно, что попадание собственных колебаний здания в резонанс с хаотичными толчками весьма маловероятно. Если еще учесть, что при пластических деформациях и начальных разрушениях здание сразу «уходит» от резонанса, но при этом никак не может уйти от опасного разрушающего воздействия волн среза, то станет ясно, что вероятность разрушения от действия сейсмических инерционных сил близка к нулю.

Реальная причина сейсмических разрушений. Автором статьи найдено и описано то достаточно очевидное сейсмическое воздействие, которое позволяет логично объяснить все случаи реальных сейсмических разрушений, не укладывающиеся в инерционно-силовую концепцию. Причиной таких разрушений являются волны напряжений сдвига, которые возникают в стенах, диафрагмах и других вертикальных элементах зданий от прохождения горизонтальных сейсмических волн сжатия (или горизонтальных толчков) под зданиями.

Прочностной расчет вертикальных железобетонных элементов зданий на воздействие волн сдвига. Сущность прочностного расчета вертикальных железобетонных элементов зданий на воздействие ударных касательных напряжений во фронте волн сдвига такая же, как при расчете защитных железобетонных оболочек АЭС на их пробивание при ударе самолета, хотя скорость перемещений в первом случае на два порядка ниже, чем в случае удара самолета. При расчете на сейсмические воздействия необходимо ввести и использовать такие новые понятия ударно-скоростного разрушения, как скорость разрушения бетона и его мгновенная прочность.

При составлении методики прочностного расчета железобетонных стен и колонн на воздействие волн сдвига придется описывать процесс формирования и развития волнового поля напряжений сдвига, а затем анализировать и описывать вызванный им процесс скоростного разрушения бетона в стенах, диафрагмах и колоннах.

Подавляющее большинство существующих конструктивных мер защиты зданий АЭС и ГЭС от сейсмических разрушений (кроме сейсмоизоляции) направлено лишь на нейтрализацию опасного воздействия инерционных сил и поэтому абсолютно бесполезно при воздействии ударно-волновых напряжений среза (что и подтверждается почти во всех случаях достаточно интенсивных землетрясений). Поэтому нужны совершенно иные, новые антисейсмические меры, которые будут эффективны в борьбе с описанным реальным и наиболее опасным ударно-волновым сейсмическим сдвиговым воздействием.

Использование существующей резонансной инерционно-силовой концепции сейсмических разрушений особенно опасно при прочностных расчетах мощных конструкций зданий АЭС и ГЭС.

Считается, что очень толстые железобетонные стены, типичные для этих сооружений, должны успешно противостоять воздействию сил инерции. В результате часто создается обманчивое впечатление сейсмической надежности АЭС и ГЭС. На самом деле, толстые стены зданий и сооружений этих объектов так же плохо сопротивляются воздействию горизонтальных сейсмических толчков и волн среза, как и тонкие колонны, и потому требуются качественно новые меры сейсмозащиты и сейсмоизоляции, в том числе конструктивные решения, учитывающие суть реального процесса сейсмического разрушения».

Можно видеть, что в представленных выше моделях землетрясений понимание их взаимосвязанности становится главным содержательным моментом. Однако, сама физика процесса, происходящего в очаге отдельно взятого землетрясения, как правило, остается

неизменной – упругая отдача Ф. Рейда (1910; 1911). На наш взгляд, и это обстоятельство тоже привело В.В. Кузнецова (2000) к столь категоричным выводам о несоответствии модели упругой отдачи реально наблюдаемым фактам. Более детально эта мысль развивается автором в начале следующего IV раздела книги.

Распространение упругих колебаний в теле Земли, понятие об изосейсмической поверхности и изосейсте, фронте волны и сейсмическом луче. Объемные (продольные и поперечные) и поверхностные (Релея, Лява и Стоунли) волны, скорости их распространения в Земле и последовательность прихода к точке записи на ее поверхности. Годографы различных типов сейсмических волн, их траектории внутри Земли (Стейси, 1972). Распределение колебаний в упругой среде описывается волновым уравнением второго порядка:

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} U + \mu \nabla^2 U + \rho F = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (3.1)$$

где U - смещение, λ и μ - упругие постоянные среды, ρ - ее плотность, F - сила, действующая на среду. В случае отсутствия действующих на тело сил решением уравнения (3.1) являются волновые движения - объемные (продольные и поперечные) и поверхностные волны, скорости которых определяются упругими постоянными среды и ее плотностью.

Объемные волны распространяются внутри среды. Смещения в продольной (V_P) и поперечной (V_S) волне ориентированы вдоль и ортогонально распространению волны соответственно, их скорости равны:

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (3.2)$$

Видно, что величина продольной скорости всегда больше поперечной (примерно в два раза):

$$V_P > V_S. \quad (3.3)$$

Основная задача сейсмологии состоит в изучении внутреннего строения Земли. Потому очень важно знать, как отклонение от однородности влияет на распространение сейсмических волн. Различают три типа неоднородностей:

1. Постепенное изменение плотности и упругих параметров с глубиной под действием давления температуры в химически однородном веществе.

2. Резкие границы между средами, различающимися по составу и физическим свойствам (под "резким" подразумевается достаточно большое по величине (скачкообразное) изменение на расстоянии порядка длины сейсмической волны).

3. Изменение химического состава или фазовые переходы, которые хотя не так резки, чтобы их можно было отнести к типу 2, но и не столь плавны, чтобы отнести к типу 1.

Все три типа неоднородностей приводят к преломлению сейсмических волн, а на резких границах, кроме того, возникают отраженные и обменные волны, т.е. происходит переход волн P в S и S в P . Законы преломления и отражения волн определяются геометрической сейсмикой, аналогичной геометрической оптике. Основу этой теории образует принцип наименьшего времени Ферма, согласно которому свет или сейсмическая волна распространяются из одной точки в другую по пути, для которого время распространения меньше, чем для всех соседних путей, соединяющих эти точки, т.е. луч соответствует кратчайшему пути. Распространение волн можно изображать при помощи лучей, ортогональных волновым фронтам. По принципу Гюйгенса каждая точка волнового фронта действует как источник вторичных волн, огибающая которого представляет собой положение фронта в последующий момент времени. Вторичные волны имеют одинаковую фазу только на огибающей, и в результате их интерференции распространение волны происходит по нормали к ее фронту.

Движение в Р - волнах происходит в продольном направлении и поэтому они не могут быть поляризованными. При рассмотрении падения волн на резкую границу следует различать S - волны поляризации SH и SV, которые ведут себя по разному. Поперечные волны со смещениями, перпендикулярными плоскости падения, т.е. волны SH, испытывают обычное преломление, т.е. без образования продольных волн. Волны SV со смещениями, лежащими в плоскости падения, кроме преломленной и отраженной волн S, возбуждают волны Р (рис. 3.6). Волна при падении на границу возбуждает только волну SV, волна SH не образуется. Распределение энергии между преломленными и отраженными волнами зависит от угла падения.

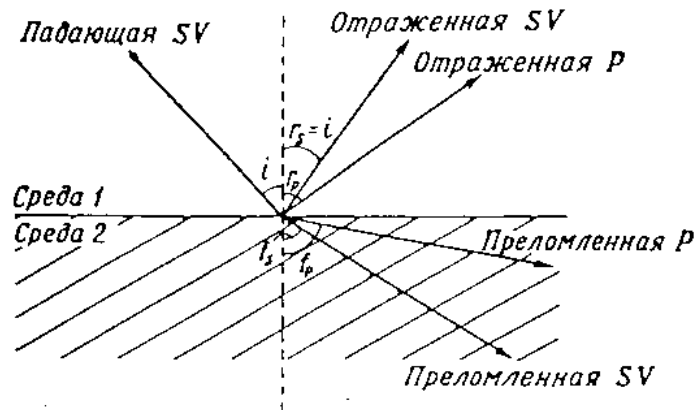


Рис. 3.6. Преломленные и отраженные лучи при падении волны SV на плоскую границу раздела. Граница предполагается жестко сжатым, т.е. смещения на ней непрерывны.

Как и в геометрической оптике, отражение и преломление сейсмических волн подчиняется закону Снелиуса:

$$\sin i/V_{S1} = \sin r_S/V_{S1} = \sin r_P/V_{P1} = \sin i_S/V_{S2} = \sin r_P/V_{P2}. \quad (3.4)$$

Жидкие среды, к которым относятся земное ядро, составляют частный случай сред с модулем сдвига $\mu = 0$. Поэтому S - волны не могут распространяться в жидкости. Конечно, они могут отражаться от границы ядра, а волны SV, падающие на границу ядра, возбуждают Р - волны, проходящие сквозь ядро.

Поверхностные волны распространяются вдоль поверхности тела или в приповерхностном волноводе, в котором скорость и плотность растут с глубиной. Наиболее распространенной является волна Релея (R). Частицы в волне движутся в вертикальной плоскости, ориентированной по направлению распространения волны, и описывают в этой плоскости эллипсы. Движение частиц по эллипсам при обычной слоистости Земли происходит в направлении, противоположном распространению волны. Большая ось эллипса обычно вертикальна. (В некоторых средах вертикальной может оказаться малая ось. Неупругость среды приводит к тому, что оси эллипса наклоняются по отношению к указанным направлениям.) Амплитуда таких движений в релеевской волне затухает экспоненциально с глубиной. Большая часть энергии, переносимой волной, сосредоточена в слое, толщина которого порядка длины волны. Значение скорости волны Релея всегда удовлетворяют условию:

$$V_R < V_S \quad (3.5)$$

и при значении коэффициента Пуассона $\nu = 0,5$ составляет

$$V_R = 0,92V_S. \quad (3.6)$$

В случае слоистого полупространства вопрос о поверхностных волнах усложняется. Появляется дисперсия волн, зависящая от числа слоев, их толщины и механических свойств.

Волны Стоунли представляют собой разновидность волн Релея и могут распространяться вдоль двух упругих сред при условии, что свойства сред не слишком сильно отличаются друг от друга и одна из сред - жидкость (как на дне океана).

Волны Лява (L) представляют собой разновидность волн типа SH, смещения в которых горизонтальны и ориентированы перпендикулярно направлению распространения. Волны Лява могут распространяться только в волноводах. Обычно одной из границ волновода служит свободная поверхность Земли, а другая образуется за счет возрастания скорости распространения поперечных волн V_S с глубиной. Кроме того волны Лява могут распространяться по каналам пониженной скорости, расположенным внутри Земли. К таким каналам относится широко распространенный, возможно охватывающий всю Землю, слой пониженных скоростей поперечных волн в верхней мантии, на глубинах от 100 до 200 км. Значение скорости Лява будет определяться упругими параметрами полупространства (V_S) и слоя (V_S'), его толщиной и всегда будет удовлетворять неравенству:

$$V_S' < V_L < V_S. \quad (3.7)$$

Т.о., наибольшие и наименьшие значения скоростей поперечных волн V_{Smax} и V_{Smin} в слоистой среде следующим образом ограничивают значения скоростей волн Релея и Лява:

$$V_{Smax} > V_L > V_{Smin}; 0,92V_{Smax} > V_R > 0,92V_{Smin}. \quad (3.8)$$

В соответствии с полученными данными, последовательность прихода волн от источника (эпицентр землетрясения или взрыва) на сейсмостанцию будет следующая: P, S и затем поверхностные волны (рис. 3.7).

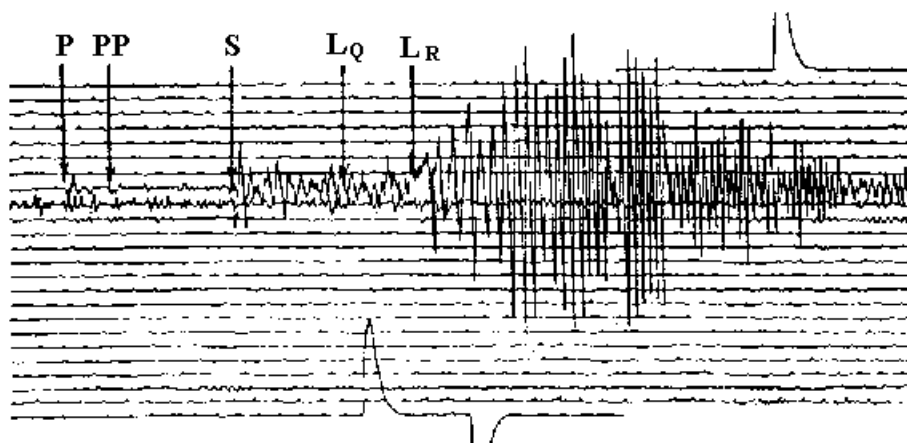


Рис. 3.7. Сейсмограмма, полученная на станции Чартерс-Тауэрс в Квинсленде (Австралия). Видны вступления волн P, PP, S и поверхностные волны L_Q и L_R от землетрясения с магнитудой 5.9, происшедшего у берегов северной части о-ва Суматра 21 августа 1967 г. (эпицентральное расстояние 6100 км, $\Delta = 54.9^\circ$). Последовательные кривые – это участки непрерывной спиральной записи на бумаге, закрепленной на вращающемся барабане. Запись составляющей W-E длиннопериодного прибора. Отклонения вверх соответствуют движению почвы в восточном направлении. Максимальное смещение на сейсмограмме соответствует 200 мкм. На ленте нанесены минутные марки времени. Видно, что между вступлениями волн P и S прошло около 8 минут. На нижней и верхней трассах записаны калибровочные импульсы.

Если бы скорости волн в Земле были постоянны, то сейсмические лучи были бы прямыми (как хорда на рис. 3.8). Время пробега сейсмической волны от поверхностного источника до станции, расположенной на расстоянии Δ , определялось бы формулой:

$$T = 2 \frac{R}{V} \sin \frac{\Delta}{2}, \quad (3.9)$$

где V - скорость сейсмической волны. Практически все подробные сведения о внутреннем строении Земли получены сейсмологией непосредственно из наблюдаемых значений времен пробега сейсмических волн.

Существенная особенность наблюдаемых времен пробега состоит в том, что они возрастают с расстоянием не так быстро, как это следует из (3.9). Наблюдаемые годографы (кривые $T(\Delta)$) искривлены сильнее (рис. 3.9).

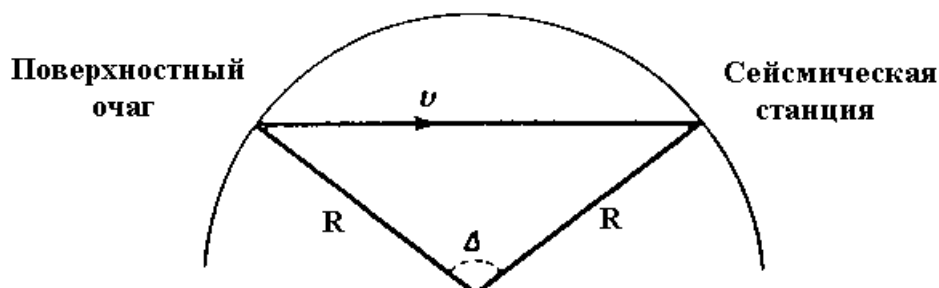


Рис. 3.8. Сейсмический луч в гипотетически однородной Земле. В сейсмологии расстояние между двумя точками на земной поверхности обычно выражается через угол Δ , под которым они видны из центра Земли.

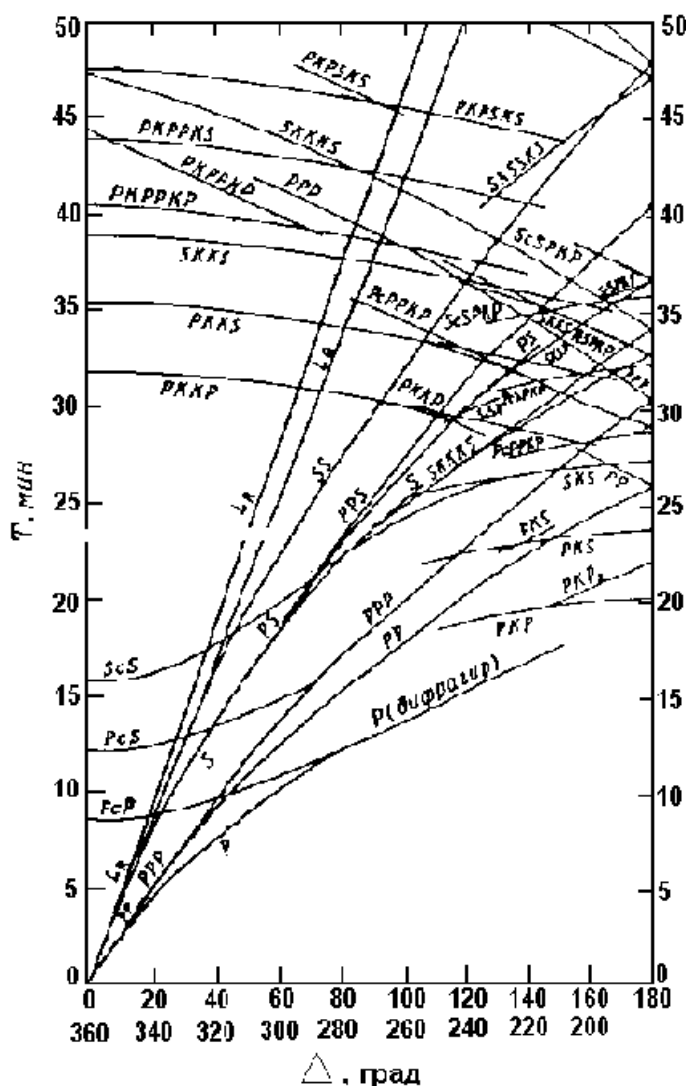


Рис. 3.9. Годографы Джеффриса – Буллена.

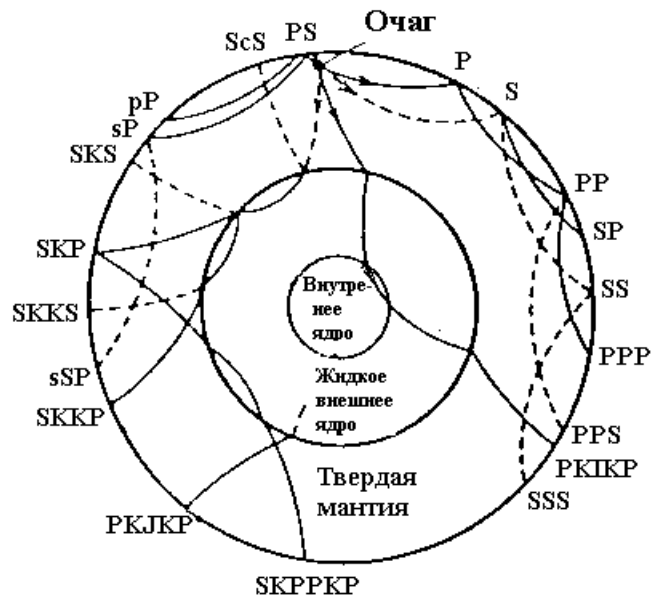


Рис. 3.10. Сейсмические лучи, соответствующие годографам на рис.3.9, по Буллену.
----- лучи P, - - - лучи S.

Следовательно, скорость в недрах Земли больше, чем на поверхности, и сейсмические лучи изогнуты, как показано на рис. 3.10 - 3.14.

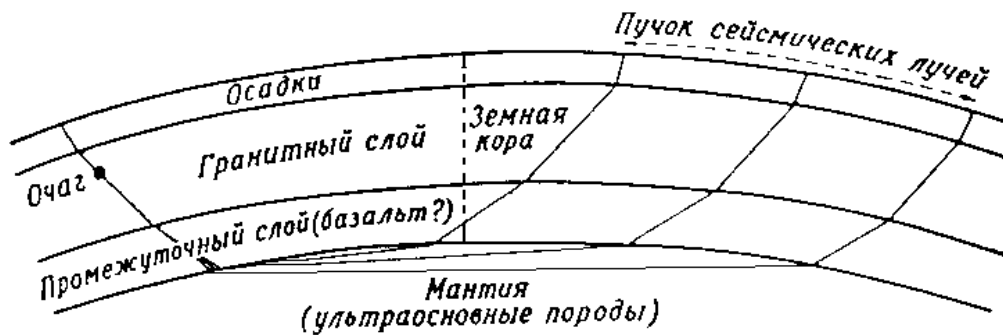


Рис. 3.11. Сейсмические лучи от близкого землетрясения в слоистой Земле. Показано преломление в слоях земной коры.

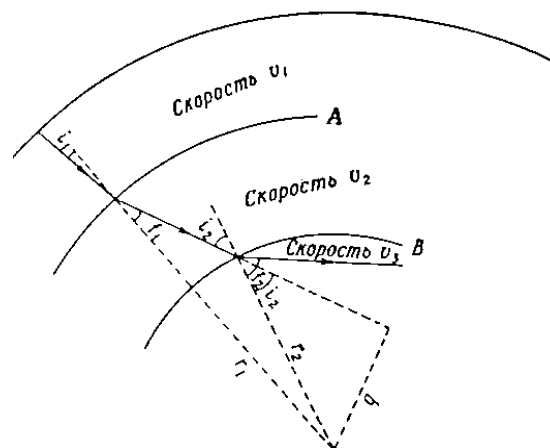


Рис. 3.12. Луч от удаленного землетрясения в трехслойной Земле. Пост роение показывает геометрический смысл параметра p сейсмического луча.

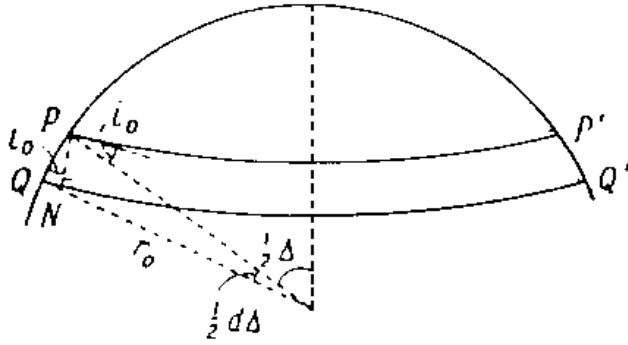


Рис. 3.13. Схема двух близких лучей, используемая для вывода формулы (3.17)

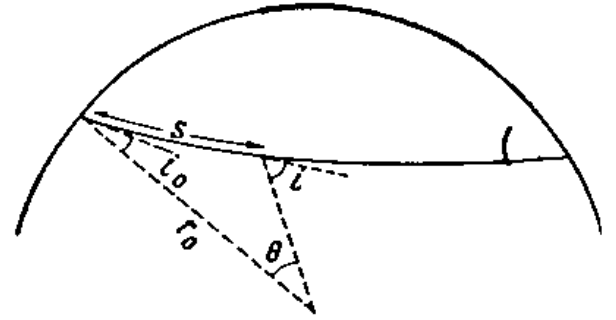


Рис. 3.14. Схема, используемая для вывода формулы (3.18)

Для определения скоростного строения Земли достаточно установить зависимость скорости сейсмической волны как функции ее радиуса. Для этого выведем уравнение сейсмического луча.

Рассмотрим три слоя, представленные на рис. 3.12. Применяя закон Снеллиуса к границам А и В, получим:

$$\sin i_1/V_1 = \sin f_1/V_2, \quad (3.10)$$

$$\sin i_2/V_2 = \sin f_2/V_3. \quad (3.11)$$

Из двух треугольников

$$Q = r_1 \sin f_1 = r_2 \sin i_2. \quad (3.12)$$

Таким образом,

$$R_1 \sin i_1/V_1 = r_2 \sin f_1/V_2 = r_2 \sin i_2/V_2 = r_2 \sin f_2/V_3. \quad (3.13)$$

Формулу (3.13) можно распространить на случай преломления на любом числе границ и на случай рефракции в слое с непрерывным нарастанием скорости с глубиной. Т.о., вдоль каждого луча

$$r \sin i/V = \text{const} = p. \quad (3.14).$$

Здесь i - угол между лучом и радиусом в данной точке. Величина p называется параметром луча. Определяя параметр луча, мы тем самым находим величину r/V в точке, где $\sin i = 1$, т.е. в точке наибольшего проникновения луча. Или, учитывая равенство $\text{ctgi} = dr/r d\Delta$, получаем уравнение луча в дифференциальном виде:

$$\frac{dr}{d\Delta} = \pm \frac{r}{p} \sqrt{\frac{r^2}{V^2} - p^2}. \quad (3.15)$$

Определение скорости распространения сейсмических волн в Земле с помощью уравнения Гергольца – Вихерта (Стейси, 1972). Другая важная формула для параметра p получается из простого геометрического рассмотрения бесконечно близких лучей PP' и QQ' (рис. 3.13). Отрезок PN - нормаль, опущенная из PP' на QQ' , т.е. фронт волны. Разность времен пробега по PP' и QQ' будет равна:

$$DT = 2QN/V_0, \quad (3.16)$$

где V_0 - скорость сейсмических волн у поверхности. Но

$$QN = p r_0 \sin i_0 = 1/2 r_0 d\Delta \sin i. \quad (3.17)$$

Отсюда:

$$\frac{dT}{d\Delta} = \frac{r_0 \sin i_0}{V_0} = p. \quad (3.17)$$

Для получения значения скорости в точке проникновения сейсмического луча на максимальную глубину r_1 можно воспользоваться методом Герглоца - Вихерта, суть

которого заключается в использовании уравнения луча в дифференциальном виде (3.15). В результате получаем интегральное уравнение:

$$\int_0^{\Delta_1} \text{arch}\left(\frac{p}{p_1}\right) d\Delta = \pi \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right), \quad (3.18)$$

где r_0 - радиус Земли. Полученная формула удобна для численного интегрирования по таблицам времен пробега, заданным с равным шагом Δ , так как p , согласно (3.17), - известная функция от Δ , а p_1 - значение p при $\Delta = \Delta_1$. Таким образом, (3.18) позволяет найти значение r_1 , соответствующее Δ_1 , и, следовательно, $\eta = r_1/V_1$. Таким образом, получается зависимость $V(r)$ для интервала r вплоть до самой глубокой точки проникновения сейсмического луча.

Анализ данных о скоростях распространения продольных и поперечных волн по радиусу Земли; выделение границ раздела скоростей 1-го и 2-го рода; разделение Земли на земную кору (слой "А"), мантию (верхнюю, переходную область и нижнюю - слои "В", "С" и "Д") и ядро (внешнее, переходная зона и внутренне - слои "Е", "F" и "G") (Магницкий, 1965; Стейси, 1972). На основе полученных годографов строят кривые изменения скоростей Р и S с глубиной; такие кривые представлены на рис. 3.15. Данные, представленные на этом рисунке, позволяют подразделить недра Земли на основные слои (рис. 3.16): А - земная кора, простирающаяся до глубин 30-40 км, на которые приходятся первые максимумы значений скоростей; мантию - слои В, С и D, простирающуюся до глубин 2900 км; ядро - слои Е, F и G.

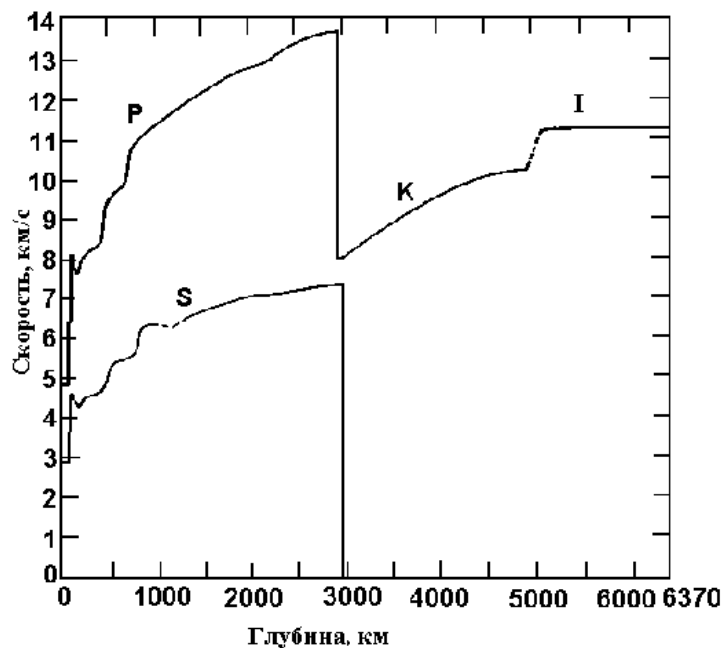


Рис. 3.15. Скорости продольных и поперечных волн в Земле.

Границам между корой, мантией и внутренним ядром (слой G) соответствуют скачки значений скоростей продольных и поперечных волн (границы первого рода).

Слой В включает область глубин, связанных с первым минимумом скоростей и простирается на глубине около 200 км, где скорости волн Р и S снова достигают значений, существовавших выше минимума. Слой С включает глубины достаточно быстрого увеличения скоростей и заканчивается перегибом графиков скоростей на глубинах около 900 км. Слои В и С образуют "верхнюю мантию". Слой D характеризуется более медленным, по сравнению со слоем С, увеличением скоростей.

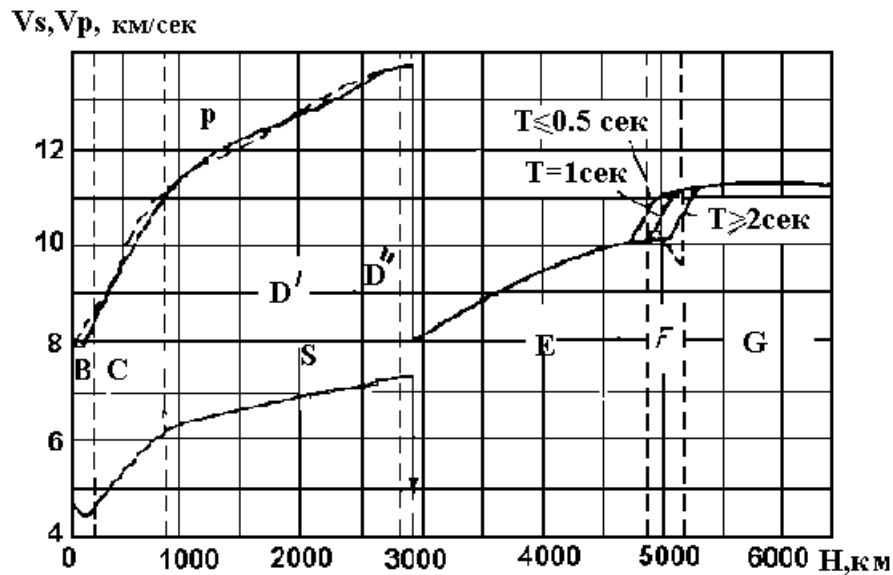


Рис. 3.16.

Проявление внешнего и внутреннего ядер Земли в особенностях выхода объемных сейсмических волн на поверхность Земли (Магницкий, 1965). Наиболее четкой является граница между мантией и ядром. Четкость этой границы доказывается интенсивными, отраженными от нее волнами PcP и ScS. При вертикальном падении волн условием отражения будет $\left| 2\pi \frac{\delta}{T} \frac{1}{\Delta V} \right| \ll 1$, где δ - толщина переходного слоя между средами, ΔV - разность скоростей в средах, T - период колебаний. Для случая границы ядра и продольных волн имеем $\Delta V = 5,5$ км/сек, $T \approx 10$ сек. Это составляет толщину переходного слоя $\delta \ll 10$ км.

Состояние слоев вещества Земли по данным сейсмологии. Распределение скоростей и сейсмических волн в земной коре (континентов и океана), типы земной коры (по данным сейсмологии). Скоростная модель земной коры континентов с инверсионным слоем, свойства последнего (Магницкий, 1965). На основании изложенных выше данных можно сделать ряд выводов о свойствах и состоянии основных оболочек Земли.

Прохождение поперечных волн через слои B, C и D позволяет сделать вывод, что вещество их находится в эффективно твердом состоянии. Факт не обнаружения волн S, прошедших через ядро Земли (слой E), позволяет предполагать, что слой E или находится в жидком состоянии, или обладает очень сильным поглощением. Однако это поглощение не может быть вызвано внутренним трением в твердых телах.

Знание скоростей V_P и V_S на разных глубинах позволяет определить важные механические характеристики вещества Земли:

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\rho} &= V_S^2; \\ \frac{K_s}{\rho} &= V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2; \\ \frac{K_s}{\mu} &= \left(\frac{V_P}{V_S} \right)^2 - \frac{4}{3}; \quad (3.19) \\ \nu &= \frac{1 - \frac{2\mu}{3K}}{2 + \frac{2\mu}{3K}}. \end{aligned}$$

Здесь K_s - адиабатический модуль сжатия, ν - коэффициент Пуассона. Анализ данных, полученных с помощью этих соотношений, позволяет сделать следующие выводы.

Переходный слой на границе мантия - ядро, по-видимому, весьма однороден по составу, вероятно, представляет смесь окислов Mg, Al, Si, Ti, Fe, а градиент температуры в слое мало отличен от адиабатического.

Слой С нельзя рассматривать как однородный. В нем происходит или изменение химического состава, или фазовые переходы (или то и другое).

Что касается слоя В, лежащего непосредственно под земной корой, то, скорее всего, здесь тоже имеет место некоторая неоднородность и он состоит из таких пород, как дунит, перидотиты, эклогиты.

При изучении землетрясения, происшедшего в 40 км от Загреба (Югославия), А. Мохоровичич 1910 г. заметил, что на расстоянии больше 200 км от источника первой на сейсмограмме вступает продольная волна другого типа, чем на более близких расстояниях. Он объяснил это тем, что в Земле на глубине порядка 50 км существует граница, на которой скорость внезапно возрастает. Это исследование было продолжено его сыном С. Мохоровичичем после Конрада, который в 1925 г. обнаружил еще одну фазу продольных волн P^* при изучении волн от землетрясений в восточных Альпах. Соответствующая фаза поперечных волн S^* была идентифицирована позже. Фазы P^* и S^* указывают на существование, по крайней мере, одной границы - "границы Конрада" - между подошвой осадочной толщи и границей Мохоровичича.

Волны, возникшие при землетрясениях и искусственных взрывах и распространяющиеся в земной коре, в последние годы интенсивно изучались. Использовались методы как преломленных, так и отраженных волн. Некоторые результаты приводятся в таблице 3.1. Значения скоростей для континентальных областей, данные в первых двух колонках этой таблицы, находятся в пределах, характерных для гранитов (табл. 3.2 и 3.3), и приписываются так называемому гранитному слою, хотя состав вещества в этом слое различается от места к месту. Кроме того, в различных областях были получены указания на существование волн с другими скоростями и границами внутри гранитного слоя. С другой стороны, под океаническим дном за пределами шельфов не имеется указание на существование гранитного слоя. Во многих континентальных областях подошвой гранитного слоя является граница Конрада. В табл. 3.1 буквой С (Conrad) отмечены те случаи, когда под океанами граница Конрада принимается как подошва осадочной толщи.

Часто бывает трудно обнаружить границу Конрада с помощью метода преломленных волн (включая времена пробега волн от землетрясений), так как во многих районах отсутствуют участки, на которых волны P^* с наибольшей глубиной проникновения в "базальтовый слой" вступают раньше продольных волн, распространяющихся в гранитном слое. Поэтому в отдельных континентальных областях граница Конрада не обнаружена (хотя и может существовать).

Таблица 3.1.

Современные данные о скорости продольных V и поперечных v волн (в км/сек) в земной коре и непосредственно под корой. С – глубина границы Конрада (под океанами – подошва осадочного слоя); М – глубина границы Мохоровичича; а – метод отраженных, б – преломленных волн; А – использование взрывов, Б – землетрясений.

Большинство значений только приближенные. Звездочка в последнем столбце указывает, что значения получены путем обобщения нескольких опубликованных данных.

Гранитные слои		С, км	Слои «габбро»		М, км	Слой ультраосновных пород		Область	Метод	Ссылка
V	v		V	v		V	v			

ЕВРОПА

6.0	3.7	14	6.6	3.9	27	8.2	-	Северо-запад Германии	Аб	[64]
6.0	3.4	20	6.6	3.7	31	8.2	4.8	Блэк-Форест	Аб	[64]
5.9	3.4	20	6.5	3.7	30	8.2	4.4	Блэк-Форест	Аб	[127]
-	-	-	-	-	30	-	-	Шампань	Аа	[53]
-	-	17	-	-	37	-	-	Рошелл	Аа	[16]
5.6	3.3	15	6.4	3.7	30	8.1	4.7	Юго-запад Германии	Бб	[80]
-	-	20	-	-	28	-	-	Ульм (Германия)	Аа	[119]
6.1	3.5	25	6.7	-	-	-	-	Западные Альпы	Ааб	[137]
5.6	-	20	6.5	-	30	8.2	-	Северные Альпы	Ааб	[120]
5.9	3.4	20	6.5	3.7	30	8.2	4.4	Баварские Альпы	Аа	[121]
5.7	3.4	(35)	6.6	3.6	45	8.0	4.4	Южные Альпы	Бб	[27]
5.5	3.0	24	6.4	3.6	60	8.2	-	Абруцци (Италия)	Бб	[32]
5.1	3.1	14	6.1; 6.9	4.2	32	8.2	4.5	Долина р.По (Италия)	Бб	[29]
-	-	19	-	-	24	-	-	Дебрецен (Венгрия)	Аа	[48]
-	-	20	-	-	25	-	-	Пекс (Венгрия)	Аа	[130]
5.6	3.3	11	6.4	3.7	31	8.2	-	Богемия	Аб	[86]
5.6	3.4	9	6.2	3.8	35	8.1	4.5	Венгрия и Южная Словакия	Бб	[144]

КОНТИНЕНТАЛЬНАЯ АЗИЯ

-	-	-	-	-	40	-	-	Коркино (Урал)	Аб	[64]
5.6;6.0	3.2;3.4	15±	6.7	4.0	49	8.0	4.7	Куринская депрессия (Кавказ)	Аб	[6]
-	-	-	-	-	50-67	-	-	Центральный Кавказ	Аб	[6]
5.6	3.4	25	6.6	3.9	46	7.9	4.5	Северо-Восточная Индия	Бб	[4]
5.7	3.4	20	6.2	3.6	50	8.0	-	Центральная Азия	Аб	[23]
5.5	-	15	6.4	-	55	8.1	-	Озеро Иссык-Куль		[49]
5.5	-	20	6.4	-	35	8.1	-	Южнее восточной части озера Балхаш		[49]
Гранитные слои		С, км	Слои «габбро»		М, км	Слой ультраосновных пород		Область	Метод	Ссылка
V	v		V	v		V	v			
5.5	-	16	6.4	-	38	8.1	-	200км к Северо-западу от оз.Иссык-Куль	Бб	[49]
5.5	-	18	6.4	-	40	8.1	-	Южнее западной части озера Балхаш	Бб	[49]
-	-	45	-	-	60±	-	-	Северный Памир	Аб	[64]

СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА

6.1	-	-	-	-	33	-	8.1	Центральное Атлантическое побережье	Аб	[64]
6.0	-	15	≥6.5	-	40	8.1	-	Центральные Аппалачи	Аб	[64]
6.3	3.6	35	-	-	36	8.1	4.7	Нью-Йорк	Аб	[64]
6.1	3.6	32	-	-	34	8.2	4.7	Пенсильвания	Аб	[64]
6.2	3.5	30	7.1	3.9	37	8.2	4.8	Канадский щит	Аб	[64]
6.0	-	-	(7.0)	-	40	8.2	-	Висконсин	Аб	[64]
5.9	-	10	6.8	-	37	8.2	-	Южная часть Калифорнийской долины	Аб	[49]
-	-	26	-	-	32	-	-	Южная часть Калифорнийской долины	Аа	[128]
6.4	3.8	28	7.1	4.1	35	8.1	4.5	Южная часть Калифорнийской долины	Баб	[61]
5.6	-	13	6.6	-	31	8.1	-	Центральная Калифорния	Бб	[26]
6.0	-	25	7.2	-	43±	8.2	-	Альберта(Канада), равнина	Аб	[123]
6.1	-	-	-	-	31	8.1	-	Аляска	Аб	[3]

ЮЖНАЯ АМЕРИКА

-	-	-	-	-	34	-	-	Арекипа (Перу)	Аб	[138]
-	-	-	-	-	55	8.0	-	Анды (Чили)	Аб	[133]

АФРИКА

6.2	3.7	-	-	-	34	8.2	4.7	Иоганнсбург	Аб	[50]
-----	-----	---	---	---	----	-----	-----	-------------	----	------

АВСТРАЛИЯ, НОВАЯ ЗЕЛАНДИЯ

6.1	3.7	-	-	-	37	8.2	4.7	Западная Австралия	Аб	[34]
6.0	3.6	-	-	-	35	8.2	4.7	Западная Австралия	Аб	[18]
6.1	3.6	-	-	-	35	8.2	4.7	Западная Австралия	Аб	[22]
6.0	-	9	6.3	-	20	8.1	-	Новая Зеландия	Ааб	[36]

ЯПОНИЯ

6.1	3.4	24	7.4	-	32	8.2	-	Северо-Запад Хонсю	Аб	[122]
5.8	3.4	22	7.0	4.0	32	8.1	4.7	Киото	Бб	[88]

Продолжение таблицы 3.1

Толщина слоя воды, км	С, км	Слой «габбро»		М, км	Слой ультраосновных пород		Область	Метод	Ссылка
		V	v		V	v			

АТЛАНТИЧЕСКИЙ ОКЕАН

1.5-4	5.5	6.6	-	14	7.9	-	Восточная Атлантика	Аб	[79]
4-5	7	6.6	-	10	7.9	-	Восточная Атлантика	Аб	[79]
4-5	7.5	6.8	-	13	8.1	-	Западная Атлантика	Аб	[79]
>5	8	6.7	-	11	8.0	-	Западная Атлантика	Аб	[79]
5	7	6.6	-	10	7.9	-	Бассейн Северной Америки	Аб	[45]
5	8	6.7	-	13	8.1	-	Восточнее о-ва Барбадос	Аб	[46]
> 5	8	6.3	-	12	8.0	-	Впадина Пуэрто-Рико	Аб	[104]

ТИХИЙ ОКЕАН

3.5	4	6.5	-	9	8.0	-	У берегов Сан-Диего, Калифорния	Аб	[114]
4	5	7.0	-	9	8.4	-	У берегов Нижней Калифорнии	Аб	[115]
1.5-4	6	6.7	-	12	7.9	-	Тихий океан	Аб	[79]
4-5	7	6.8	-	12	8.3	-	Тихий океан	Аб	[79]
>5	7	6.6	-	12	8.2	-	Тихий океан	Аб	[79]
4-5	7	6.8	-	12	8.2	-	15 ⁰ ± с.ш., 160-120 ⁰ в.д.	Аб	[115]
4-5	6	6.8	-	12	8.2	-	15 ⁰ ± с.ш., 170-110 ⁰ в.д.	Аб	[115]
6	8	6.5	-	12	8.2	-	60 км восточнее впадины Тонга	Аб	[117]
9	12	6.5	-	20	8.1	-	Впадина Тонга	Аб	[117]
-	10	6.9	-	17	8.1	-	Эниветок	Аб	[116]

Таблица 3.2.

Скорости продольных V и поперечных v волн (в км/сек), определенные с помощью лабораторных экспериментов: а) Хьюс и Моретт [82], б) Берч [17]

Значения температур T и давлений p даны для различных глубин h в земной коре.

	(а)						(б)		
h, км	1	5	10	15	20	25	11	23	32
T, °C	45	135	225	290	350	400	220	420	520
p, бар	260	1300	2600	3900	5300	6700			
V, км/сек									
Гранит	5.96	6.16	6.15	6.11			6.22	6.26	6.27
Габбро	6.7	6.9	6.96	6.95	6.88	6.8	6.85	6.84	6.83
Базальт	5.44	5.68	5.74	5.79					
Дунит	7.35	7.5	7.22						
v, км/сек									
Гранит	3.36	3.48	3.5	(3.5)					
Габбро	3.47	3.51	3.52	3.51	3.47	3.44			
Базальт	3.21	3.22	3.23	3.23					
Дунит	3.77	3.9	3.68						

Таблица 3.3.

Скорости продольных V и поперечных v волн (в км/сек) в различных типах горных пород при давлении 1 атм и комнатной температуре, полученные из лабораторных экспериментов и определенные в полевых условиях на обнажениях.

(а) Лит и Берч [91]; (б) Мейселуэйн [96, стр.233,237]; (в) Бауле и Мюллер [12, стр.195]; (г) Берч [17]; (д) Хьюс и Моретт [82]

Тип породы	(а)		(б)	(в)		(г)	(д)	
	V	v	V	V	v	V	V	v
Гранит	4.0-5.7	2.1-3.3	4.5-5.6	5.2	3.0	5.2		3.4
Базальт	5.6		5.6	6.4	3.2		5.4	3.2
Габбро						6.3	6.4-6.7	3.5
Дунит							7.4	3.8
Эклогит				8.0	4.3			

Примечание: ссылки в табл. 3.1 – 3.3 приведены согласно (Магницкий, 1965).

В настоящее время имеются указания на дополнительные ясно выраженные границы между поверхностями Конрада и Мохоровичича; для нескольких континентальных областей даже указаны слои со скоростями продольных волн от 6,5 до 7 и от 7 до 7,5 км/сек. В табл. 3.1 все слои между границей Конрада и Мохо объединяются в "габбро" и "базальтовый" и приводится наименьшее значение скорости, найденное для этого слоя в данном районе. Было предположено, что могут существовать слои "диорита" ($V = 6,1$ км/сек) и слой "габбро" ($V = 7$ км/сек). Многие значения скоростей, приведенные в табл. 3.1 для слоев "габбро", выше, чем скорости, измеренные в образцах базальта (табл. 3.2, 3.3), но находятся в допустимых пределах значений, полученных в образцах "габбро". Это справедливо также для слоя, залегающего под границей Мохоровичича в океанических областях. Однако существуют, вероятно, заметные различия в составе этих слоев "габбро" под различными областями и на разных глубинах.

Во многих океанических областях глубина границы Мохо под дном океана меньше 10 км. Для большинства континентов ее глубина увеличивается с увеличением расстояния от побережья и под высокими горами может достигать более 50 км. Эти "корни" гор впервые были обнаружены по гравитационным данным.

В большинстве случаев определения скоростей ниже границы Мохо дают одни и те же цифры: 8,1 - 8,2 км/сек для продольных волн и около 4,7 км/сек для поперечных. Сначала для многих районов сообщались меньшие значения скоростей (около 7,8 и 4,4 км/сек), но с повышением чувствительности приборов вычисленные скорости постепенно приближались к более высоким значениям и в настоящее время представляются гораздо лучше согласованными. Некоторые различия еще остаются, и они частично могут быть вызваны причинами, связанными с предположением о горизонтальности слоев, когда в действительности слои наклонны.

Сейсмология и глобальная тектоника (Гутенберг, 1963; Ле Пишон, Францито, Боннин, 1977; Новая глобальная тектоника, 1974). Рассмотрен вопрос о внутренней согласованности и глобальной совместимости деформаций вдоль мировой рифтовой системы, островных дуг и главных горных поясов. Основной вывод заключается в том, что эти движения довольно точно можно описать в рамках концепции *взаимодействия и относительного движения системы литосферных плит*. То, что современные деформации на поверхности Земли концентрируются в узких вытянутых поясах, известно давно. Эти пояса, обычно совпадающие с главными сейсмическими зонами земного шара, включают мировую рифтовую систему, островные дуги и такие дугообразные структуры, как активные горные пояса и активные континентальные окраины. Эти крупные

тектонические структуры не имеют резких окончаний; по-видимому, они связаны воедино в глобальную тектоническую систему.

Данные, приведенные на рис. 3.1 показывают, что большая часть мировой сейсмической активности сконцентрирована в довольно узких поясах и что эти пояса могут рассматриваться как непрерывные. Интерпретация глобальной тектоники при помощи модели взаимодействия нескольких крупных плит литосферы позволяет считать, что большая часть мировой сейсмической активности обусловлена процессами, происходящими на окраинах плит или вблизи них. На рис. 3.1 показано также, что землетрясения значительно чаще происходят в зонах конвергенции (дугах и дугообразных структурах), чем в зонах дивергенции (океанических хребтах). Вдоль океанических хребтов, где осуществляются, по-видимому, менее сложные тектонические процессы, эти зоны узкие; на континентах, где данные процессы наверняка более сложны, зоны шире и отдельные структуры в них выделить нелегко. Зоны глубокофокусных землетрясений (рис. 3.1, 3.2) соответствуют зонам поддвижения. Следовательно, все главные особенности мировой карты эпицентров землетрясений вполне согласуются с новой глобальной тектоникой. Ни одной другой гипотезе не удавалось столь хорошо объяснить распределение землетрясений.

Дугообразная форма активных зон – одна из проблем дисциплины, которую можно назвать механикой литосферы.

Одна из основных проблем сейсмологии – изучение различий между континентальными и океаническими областями.

То, что сейсмология поставляет многочисленную и важную информацию для проверки новой глобальной тектоники, показано многократно. Именно такова направленность проводящихся в настоящее время в связи с этой проблемой сейсмологических исследований. Необходимо, однако, и обратное воздействие новой глобальной тектоники на сейсмологию с целью определения новых направлений сейсмологических исследований.

Важнейшее направление сейсмологии – изучение землетрясений – одним из первых испытывает на себе влияние новой глобальной тектоники. Все еще ждет решения ряд фундаментальных вопросов: почему землетрясения происходят в основном в узких зонах, разделенных крупными стабильными глыбами (плитами); почему эти зоны развиты в глобальных масштабах; почему сейсмические и связанные с ними тектонические зоны приобрели свою современную конфигурацию; и т. д.

Сейсмология уже давно служит главным источником информации о структуре глубинных частей Земли и, по-видимому, таковым и останется, будь то с участием или без участия новой глобальной тектоники. Обычно применяемым и весьма эффективным методом сейсмологии является использование упрощенных моделей Земли для предсказания некоторых наблюдаемых явлений. Новая глобальная тектоника предусматривает совершенно новый тип модели. Слоистые модели со сферически симметричными оболочками для многих районов земного шара ныне представляются устаревшими.

На некоторые из поставленных выше вопросов, сформулированных авторами новой глобальной тектоники в конце 60-х годов прошлого века, мы постараемся дать ответ ниже.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голицын Б.Б. Лекции по сейсмометрии. Российская АН. СПб. 1912.
2. Гусев А.А. 1979. Докл. АН СССР. Т. 244. С. 544-548
3. Гусев А.А. 1984. Вулканология и сейсмология. №1. С. 3-22
4. Гусев А.А. 1988. Вулканология и сейсмология. №1. С. 41-55
5. Гусев А.А. 1993. Свойства и природа короткопериодного излучения очага землетрясения. // Автореферат диссерт. на соиск. уч. ст. д. ф. – м. н. М.: ИФЗ РАН. 43 с.

6. **Гутенберг Б.** Физика земных недр. М.: Из-во Иностран. лит-ры. 1963. 264 с.
7. **Гутенберг Б., Рихтер К.Ф.** Магнитуда, интенсивность, энергия и ускорение как параметры землетрясений. (I). (II) // Слабые землетрясения. М.: Из-во Иностран. лит-ры. 1961. С. 45-71. С. 72-119.
8. **Касахара К.** Механика землетрясений. М.: Мир, 1985, 264 с.
9. **Кузнецов В.В.** Физика земных катастрофических явлений. 1992. Новосибирск Наука. 96с.
10. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
11. **Ле Пишон К., Франшто Ж., Боннин Ж.** Тектоника плит. М.: Мир. 1977. 288 с.
12. **Магницкий В.А.** Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 380 с.
13. **Манк У., Макдональд Г.** Вращение Земли. М.: Мир. 1964. 384 с.
14. **Медведев С.В.** Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. С. 151 – 162.
15. **Мишин С.В.** Элементы сейсмометрии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 1993. 167 с.
16. **Мушкетов И.В., Орлов А.П.** Каталог землетрясений Российской империи. СПб. 1893. 536 с.
17. **Новая** глобальная тектоника. М.: Мир. 1974. 472 с.
18. **Новый** каталог сильных землетрясений на территории СССР (ред. Н.В.Кондорская, Н.В.Шебалин). М.: Наука. 1977. 536 с.
19. **Проблемы** сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН. 2000. 318 с.
20. **Пурин А.А.** Землетрясения Камчатки и их регистрация. Петропавловск-Камчатский. 1917. 23 с.
21. **Сейсмическое** районирование территории СССР. М.: Наука. 1980. 308 с.
22. **Сейсмическая** сотрясаемость территории СССР. М.: Наука. 1979. 192 с.
23. **Сейсмическое** микрорайонирование. М.: Наука. 1977. 248 с.
24. **Смирнов С.Б.** Ударно-волновая концепция сейсмического сооружения // Энергетическое строительство. 1992. № 9. С. 70-73.
25. **Стейси Ф.** Физика Земли. М.: Мир. 1972. 344 с.
26. **Шебалин Н.В.** 1971. Вопросы инж. Сейсмологии. Вып. 15. М.: Наука. С. 50-78.
27. **Aki K.** 1967. J. Geophys. Res. V. 72. P. 1217-1231.
28. **Aki K.** 1972. Geophys. J. V. 72. P. 3-25.
29. **Andrews D. J.** 1981. J. Geophys. Res. V. 86. P. 3867-3877.
30. **Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.** Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 381-384.
31. **Blandford A.A.** 1975. Bull. Seismol. Soc. Amer. V. 75. P. 1385-1405.
32. **Boatwright J.** Bull. Seismol. Soc. Amer. V. 78. P. 489-508.
33. **Brune J. N.** 1970. J. Geophys. Res. V. 75. P. 4997-5009.
34. **Burridge R., Knopoff L.** Model and theoretical seismicity. Bull. Seism. Soc. Am. 1967. V.57. N.3. P. 341-372.
35. **Chao B. F., Gross R.S.** Changes in Earth's rotational energy induced by earthquakes // Geophys. Int. 1995. 122. P.776-783.
36. **Das S., Kostrov B.V.** 1983. J. Geophys. Res. V. 88. P. 4277-4288.
37. **Das S., Kostrov B.V.** 1986. Earthquake Source Mechanics (eds. S. Das, a.o.). Washington. Amer. Geophys. Union. 91-96.
38. **Das S., Kostrov B.V.** 1988. J. Geophys. Res. V. 93. P. 8035-8050.
39. **Gusev A.A.** 1983. Geophys. J. Poy. Astr. Soc. V. 74. P. 787-808.
40. **Hanks T.S.** 1979. J. Geophys. Res. V. 84. P. 2235-2242.
41. **Hanks T.C.** 1982. Bull. Seismol. Soc. Amer. V. 72. P. 1867-1879.
42. **Haskell N.A.** 1966. Bull. Seismol. Soc. Amer. V. 56. P. 125-140.

43. **Housner G.W.** 1955. Bull. Seismol. Soc. Amer. V. 45. P. 197-218.
44. **Kanamori H., Anderson D.L.** 1975. Bull. Seismol. Soc. Amer. V. 65. P. 1073-1096.
45. **Olami Z., Feder H.J.S., Christensen K.** Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. N. 8. P. 1244-1247.
46. **Papageorgious A.S., Aki K.** 1983. Bull. Seismol. Soc. Amer. V. 73. P. 953-978.
47. **Papageorgious A.S., Aki K.** 1985. Pure Appl. Geophys. V. 123. P. 353-374.
48. **Reid H.F.** The elastic-rebound theory of earthquakes. University of California Publ. Geol. Sci. 1911. V. 6. 413-444.
49. **Reid H.F.** The California earthquake of April 18 1906. V.2 // The mechanics of the earthquake. The Carnegie Inst. Washington, 1910.
50. **Thatcher W., Hanks T.** 1973. J. Geophys. Res. V. 78. P. 8547-8576.
51. **Trifunac M.D.** 1976. Bull. Seismol. Soc. Amer. V. 66. P. 1343-1373.

4. СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС (Викулин, 2003).

Постановка проблемы, класс сильнейших землетрясений, класс сильных землетрясений, сейсмический цикл, блочное строение сейсмофокальной зоны, повторяемость землетрясений, три стадии сейсмического цикла, о периодичности сейсмического процесса, о методике исследования распределения землетрясений во времени, особенности распределения землетрясений во времени, класс сильных форшоков и афтершоков, квазипериодичность сейсмического процесса, миграция землетрясений, взаимодействие землетрясений, феноменологическая модель сейсмического процесса, прогноз времени сильнейших землетрясений и мест расположения их очагов, механическая модель сейсмического процесса.

Постановка проблемы. Вывод новой глобальной тектоники о возможности описания мировой сейсмичности в рамках модели взаимодействующих литосферных плит (см. последний параграф предыдущего III раздела) с очевидностью указывает на то, что процессы, протекающие в очагах землетрясений, *изначально* следует рассматривать как такие *взаимосвязанные явления*, которые реализуются в условиях *планетарного* упругого поля, создаваемого ансамблем движущихся тектонических плит. В рамках такого подхода основную задачу сейсмологии – изучение землетрясений, следует перефразировать следующим образом – *изучение землетрясений как взаимосвязанных событий*. К выводу о том, что землетрясения представляют собой взаимосвязанные события независимым образом пришли многие исследователи (см. третий параграф III раздела)

Другими словами, с позиции современных тектонических представлений первоосновой процесса является *не отдельно взятое изолированное землетрясение* – такого явления в «жизни» Земли не существует, а *совокупность взаимосвязанных землетрясений – сейсмический процесс*, реализуемый в глобальном тектоническом поле. Движителем (источником) такого процесса, очевидно, должно быть явление планетарного масштаба.

К выводу о том, что землетрясения являются взаимосвязанными событиями, можно прийти и из анализа комплексных геофизических данных.

Необходимость исследования землетрясений как взаимосвязанных событий была очевидной, пожалуй, с того момента, как люди впервые обратили свое внимание на это грозное явление природы и стали вырабатывать соответствующие средства защиты. Эффекты группирования землетрясений и закономерного размещения их очагов в пространстве и во времени были отмечены уже первыми составителями описаний и списков сейсмических событий.

В 1915 г., когда сейсмология еще не являлась самостоятельным разделом науки, начала свою работу сейсмическая станция в Петропавловске-Камчатском, удаленном в то время от научных центров на максимально возможное на нашей планете расстояние. Первый наблюдатель станции - чиновник радиотелеграфа А.А.Пурин, был, несомненно, человеком активным и эрудированным. С аппаратурой станции - наисовременнейшим по тем временам сейсмографом Б.Б.Голицына, как и с текстом его книги «Лекции по сейсмометрии» (Голицын, 1912), он познакомился, как говорится, «с колес», после получения их в морском порту, куда они после полугодового путешествия прибыли из Санкт-Петербурга. Но уже через один - два года работы на станции в результате обработки сейсмограммного материала и сбора макросейсмических данных о землетрясениях и извержениях камчатских вулканов он уверенно писал в своей брошюре: «...если не предсказывать, то по крайней мере наметить пределы времени, между которыми следует ожидать наступление крупной катастрофы, можно и теперь».

Полученные к настоящему времени данные геофизических исследований позволяют интуитивно сформулировать очевидное предположение о существовании взаимосвязи между сильными землетрясениями в виде научно обоснованной концепции

волнового сейсмического процесса, в рамках которой совокупность землетрясений оказывается возможным аналитически описать в пространстве и во времени с учетом их взаимодействия друг с другом и с другими планетарными явлениями.

Одной из первых важных особенностей сейсмичности, на которую исследователи достаточно давно обратили свое внимание, было свойство *периодичности* - повторяемости наиболее сильных землетрясений в одном месте через определенный интервал времени.

Развитие инструментальной сейсмологии, завершение создания мировой сети сейсмических станций, введение в 1945 г. в практику сейсмологических наблюдений понятия магнитуды и построение на ее основе мировых и региональных каталогов землетрясений послужило основой для достаточно полного описания географии планетарной сейсмичности и, как следствие, введения концепции *сейсмических поясов*, узкими полосами простирающимися вдоль всей поверхности планеты на многие тысячи и десятки тысяч километров.

Уже первые результаты инструментального исследования сейсмичности позволили достаточно убедительно подтвердить замеченное ранее рядом исследователей ее свойство *миграции* - т.е. закономерного перемещения во времени и в пространстве всего сейсмического пояса, некоторой его части или отдельно взятых очагов сильнейших землетрясений, включая осцилляции. Явление миграции в виде упругих импульсов зарегистрировано и в образцах горной породы. Выявление эффекта D-волн указывает на *волновую природу миграции* землетрясений.

Было также отмечено, что наиболее сильные землетрясения часто имеют тенденцию группироваться в эпохи, в течение которых практически одновременно наблюдаются на всей поверхности Земли и при этом редко происходят в интервалах времени между ними.

Явление группируемости землетрясений в пространстве и во времени на меньшем масштабном уровне было установлено практически для всех сейсмоактивных районов Земли. На группируемость землетрясений по величине их сейсмической энергии указывают данные о существовании при определенных значениях магнитуд статистически значимых и объяснимых на геологическом материале отклонений от линейного закона повторяемости, которые отмечались многими исследователями: $M \approx 8$ - Новая Зеландия, Северная Анатолия, Мексика, Япония, Алеутские острова, Эгейское море, Южная Калифорния, Камчатка; $M = 4$, Таджикистан, $M = 5,5$, Камчатка, $M = 5 - 6$ Япония и др.

Существование таких явлений группирования землетрясений и их миграции позволяет предположить наличие между их очагами вполне определенной связи, по сути, взаимодействия, физика которого определяется свойствами пространственного, временного и энергетического распределений землетрясений.

Приведенные данные о группируемости землетрясений и волновой природе миграции сейсмичности указывают на то, что совокупность землетрясений, рассматриваемая в пространстве и во времени с учетом взаимодействия между их очагами, может рассматриваться как вполне определенный физический процесс.

Определение. Под сейсмическим процессом будем понимать совокупность землетрясений протяженного региона (очага отдельно взятого землетрясения, островной дуги или всего сейсмического пояса), рассматриваемую в пространстве и во времени с учетом взаимодействия их очагов.

Данные о существовании взаимосвязи между землетрясениями, с одной стороны, и процессами в атмосфере, вариациями вращения планеты, нутацией ее полюса, гелиофизическими параметрами, космическими факторами, эклиптической долготой Луны, солнечной активностью, количеством осадков, колебаниями уровня моря - с другой, указывают на *планетарный масштаб сейсмического процесса*.

С использованием теории субдукции были разработаны механические модели, в рамках которых сейсмичность удалось связать с движением тектонических плит в результате чего и стала очевидной *тектоническая природа волн миграции*.

Таким образом, приведенные данные позволяют предположить, что сейсмический процесс следует рассматривать как волновой, планетарного масштаба процесс, имеющий тектоническую природу.

Был установлен *блоковый характер геофизической среды*, доказано, что Земля обладает *сильно выраженными нелинейными свойствами*, и показано, что закономерности сейсмичности в поясах могут быть описаны *аналитическими методами* с помощью *нелинейных волновых уравнений*.

Идеи блокового строения геофизической среды при построении моделей сейсмического процесса использовались и ранее. Отличительная особенность таких моделей состоит в том, что в них основным моментом является иерархичность и вытекающая из нее попытка дать единое описание связи землетрясений различной силы и местоположения. В контексте данного обзора основным выводом «иерархического» подхода является *сильная нелинейность* дифференциальных уравнений, с помощью которых описывается сейсмический процесс. Такой вывод находится в полном согласии с приведенными выше данными о нелинейном характере блоковой среды и является вполне закономерным, поскольку в нелинейных средах, к которым относится и земная кора, только за счет «включения» в линейное уравнение соответствующих нелинейных членов можно пытаться в рамках одной модели совместить миграционную (волновую) природу сейсмического процесса, с одной стороны, с большой продолжительностью сейсмического цикла (100 - 200 лет) и малыми значениями скоростей миграции ($10 \div 1000$ км/год) - с другой.

Таким образом, представляется, что аналитические модели, претендующие на адекватное описание сейсмического процесса, должны содержать нелинейные волновые уравнения, коэффициенты которых определяются свойствами геофизической среды и сейсмичности.

В последние годы разработано большое количество математических моделей для описания нелинейных сейсмических эффектов и процессов. Согласно этим моделям, описание нелинейных эффектов в геофизических средах оказывается возможным описать в рамках канонических нелинейных уравнений Бусинеска, Бургерса, Кортевега - де Вриза, Шредингера, $\sin$ - Гордона и их модификаций, в которых существенными оказываются нелинейности, диссипация и дисперсия - основные характеристики и геофизической среды и волновых процессов, протекающих в ее пределах. Эти уравнения имеют довольно простую структуру, их решения в применении к конкретным физическим задачам достаточно хорошо изучены, что позволяет детально изучать физическую природу ряда фундаментальных сейсмо-тектонических (и других геофизических) процессов.

Нелинейные волновые свойства геофизической среды, имеющей блоковое (фрагментированное) строение, оказывается возможным описать, как правило, с привлечением уравнения $\sin$ - Гордона : медленные уединенные тектонические волны при вращении фрагментов блочных сред, уединенные волны при деформировании сред с пластическими прослойками, уединенные волны в разломе земной коры. При этом, динамические возмущения имеют солитонный характер и при достижении состояния предельного равновесия в макромасштабе микровращения блоков образуют некую упорядоченную структуру.

Движущиеся блоки земной коры имеют и «вращательную» составляющую, обусловленную вращением Земли. На это указывают данные о морфоструктурах и так называемым вихревым структурам.

Развивая представления микрополярного континуума, учитывающие одновременно и трансляционные смещения и кинематически независимые микроповороты отдельных блоков, оказалось возможным в рамках одной модели описать процессы, приводящие к

излучению и тектонических уединенных и сейсмических упругих (землетрясений) волн. Полученный результат имеет принципиальное значение, так как открывает возможность построения в рамках модели микрополярного континуума механики очага тектонического землетрясения.

С позиции моментной теории упругости вывод о том, что уравнение $\sin$ - Гордона, по сути, является уравнением движения блоковой среды, очевиден: антисимметричная часть тензора напряжений, связанная с микровращениями блоков, пропорциональна векторному произведению возвращающей силы, приложенной к поверхности вращающегося блока, на радиус поворота, и, таким образом, пропорциональна синусу угла поворота.

Успехи, достигнутые в рамках моделей геофизических сред, использующих представления о блоках,двигающихся друг относительно друга по, фактически, долгоживущим разломам, несомненны. И вместе с тем, при описании таких движений нельзя не учитывать процессов, приводящих к «залечиванию» разломов; такие процессы являются альтернативными процессу нарушения сплошности земной коры и в значительной степени определяют ее прочность. В противном случае, «за то огромное время, в течение которого на Землю действуют землетрясения, вся земная кора должна была бы расчлениваться трещинами и превратиться, грубо говоря, в песок». Учет такого рода данных неизбежно приводит нас к необходимости разработки таких нелинейных континуальных моделей, в которых при поворотах блоков напряжения накапливаются не только в пределах достаточно узких («трещинных») зон между ними, но и в значительно больших объемах, в пределах достигающих размеров всего тела.

Из приведенных выше данных следует, что физическое содержание моделей сейсмического процесса, связанное с его волновой тектонической природой и планетарным масштабом явления, по сути, обеспечивается за счет отождествления концепций очага землетрясения, как вполне определенного объема сейсмофокальной зоны, и блокового строения геофизической среды. Совмещение таких концепций, с очевидностью, влечет за собою выполнение вполне определенных условий. А именно, в свете представленных выше данных, само землетрясение, т. е. выделение энергии при сейсмическом толчке, происходит вследствие такого движения в его очаге, источником которого является взаимодействие «элементарных» сейсмофокальных блоков друг с другом, по сути, имеющее далекодействующий характер.

Ясно, что общепринятые в настоящее время модели очага землетрясения: лавинно неустойчивое образование трещин, дилатации, консолидационная и др., основанные на, по сути, «локальном» принципе упругой отдачи Рейда (см. III раздел) *не в состоянии объяснить* далекодействующий механизм взаимодействия в силу того, что упругие напряжения в такого рода моделях концентрируются внутри очага в узкой зоне, примыкающей к магистральному разрыву плоской формы.

Необходимость поиска новых («не локальных») моделей очага землетрясения вытекает, в том числе, и из других данных, указывающих на существование класса «замедленных», «безмолвных» и многократных - мультиплетных землетрясений. Попытка построения теории процесса при таких явлениях приводит к появлению большого количества условий, которые, вряд ли, удастся согласовать в рамках общепринятых на настоящий момент времени представлений о процессе в очаге землетрясения.

Интенсивное развитие инструментальной базы наблюдательной сейсмологии, имевшее место в течение последних десятилетий, позволили значительно расширить спектр упругих колебаний, регистрируемых при сейсмических событиях. Так, в настоящее время уверенно регистрируются собственные колебания планеты, собственные колебания тектонических плит и длиннопериодные (до 200 - 300 сек и, по-видимому, более) колебания при землетрясениях. При этом, методами длиннопериодной сейсмологии оказывается возможным с большой разрешающей способностью выполнять амплитудно - частотный анализ колебаний в широком спектре частот. Такие способы регистрации и

анализа, в частности, и позволили выявить мультиплетный характер движений при некоторых главных толчках достаточно сильных землетрясений и показать достаточно сложное строение их очагов. Попытка классификации причин и условий возникновения медленных («молчаливых», «безмолвных» и т.д.) землетрясений и крипа, проведенная в работе, практически ставит такие события в один ряд явлений с собственными колебаниями Земли.

Для объяснения цикличности сейсмического процесса предложена простая модель, в основе которой заложены представления о *винтовой дислокации* в упругой среде. Объяснение цикличности сейсмического процесса дается и в рамках клавишной модели, в которой сейсмофокальные блоки *слабо* связаны друг с другом. Следует также отметить и то, что общепринятые в настоящее время модели очага землетрясения не в состоянии дать физически обоснованное объяснение отмечавшейся выше связи между сейсмичностью и режимом вращения планеты.

Как видим, модель очага землетрясения, которая, очевидно, должна соответствовать концепции волнового сейсмического процесса тектонической природы, в то же время, во-первых, должна быть в состоянии описывать «элементарные» источники упругих колебаний, размеры которых лежат в широком диапазоне от очагов сильнейших землетрясений (первые сотни - тысяча километров) и их объединений в виде островных дуг (первые тысячи километров) до сейсмических поясов (десятки тысяч километров) и, по-видимому, всей планеты в целом. И, во-вторых, иметь геометрию, отличную от плоской.

Таким образом, волновому сейсмическому процессу должна соответствовать новая, отличная от общепринятых «плоских», модель очага землетрясения, физическое содержание которой определяется таким свойством сейсмического процесса, как дальнедействующий характер взаимодействия «элементарных» сейсмофокальных объемов.

Было выявлено такое свойство сейсмических поясов, как *seismic gaps* - места, в пределах которых землетрясения с достаточно большой магнитудой не происходили в течение многих десятков - первых сотен лет. При этом, концепция *seismic gap* оказалась достаточно плодотворной для целей долгосрочного прогноза мест очагов сильнейших землетрясений и оправдываемость такого прогноза для островных дуг и континентальных окраин Тихого океана оказалась достаточно высокой, не менее 70-90%.

Анализ некоторых из приведенных выше результатов исследований привел М. Бота - автора одного из первых обзоров по проблеме прогноза землетрясений, к выводу о существовании между землетрясениями *крупномасштабной связи*, исследование которой необходимо проводить в рамках всей планеты, представляющей собою, т.о., единую напряженную систему. Миграционные цепочки М.Ботом отождествляются с волнами вполне определенной природы, по сути, как теперь уже ясно - тектонической. При этом им отмечено, что в случае, если известно значение скорости миграции, то можно с достаточно высокой точностью *предсказать время* последующих землетрясений в цепочке.

Высокое значение оправдываемости указывает на то, что долгосрочный прогноз является более детерминированным, чем статистическим, а заложенные в его основе закономерности сейсмичности (т. е. *seismic gap*) - адекватными. Концепции *seismic gap* и очага сильнейшего землетрясения, по сути, являются близкими. Поэтому представляется, что установленное на практике свойство «адекватности», с математической точки зрения, может указывать на принципиальную возможность разрешимости проблемы прогноза землетрясений в рамках волновой модели сейсмического процесса.

Физическое описание процесса при переходе на новый масштабный уровень его рассмотрения часто сопровождается появлением качественно новых представлений. Например, переход к системе, содержащей большое количество частиц, как известно, может сопровождаться появлением новых своеобразных статистических закономерностей,

которые не удастся свести к чисто механическим. В этой связи при разработке планетарной модели сейсмического процесса, включающей большое число «элементарных» сейсмофокальных объемов - очагов землетрясений, и ее осмыслении имеет смысл поискать и другие подходы к построению новой механики очага землетрясения.

Исследование временных и пространственных закономерностей сейсмичности, связанных с моментами сильнейших землетрясений и местами расположения их очагов, привело к появлению концепции сейсмических брешей. Оказалось, что базирующийся на такой концепции долгосрочный сейсмический прогноз сильнейших землетрясений для островных дуг и континентальных окраин Тихого океана имеет оправдываемость, значение которой составляет 70-90%. Такое высокое значение оправдываемости указывает на то, что долгосрочный прогноз является более детерминированным, чем вероятностным. Другими словами, заложенная в основе такого прогноза закономерность, по сути, является фундаментальной и может использоваться в качестве инструмента, позволяющего исследовать физику сейсмического процесса.

Класс сильнейших землетрясений (Викулин, 1990, 2003). Получившая экспериментальное подтверждение гипотеза С.А.Федотова о закономерном распределении очагов сильнейших землетрясений - их «непересечении» в течение сейсмического цикла, позволяет предположить существование вполне определенного класса сейсмических событий. Для определения нижней магнитудной границы был проведен анализ с использованием данных о землетрясениях северо-западной окраины Тихого океана, включающей Японскую, Курило-Камчатскую и Алеутскую островные дуги общей протяженностью около десяти тысяч километров.

На рис. 4.1 представлены афтершоковые области сильных землетрясений, происшедших в пределах северо-западной окраины Тихого океана в XX столетии.

Данные, приведенные на этом рисунке, показывают, что существует такое значение магнитуды M_{SP} , в малой окрестности которого взаимное расположение афтершоковых областей имеет следующую особенность: афтершоковые области землетрясений с $M \geq M_{SP}$ имеют тенденцию не перекрывать друг друга, в то время как афтершоковые области землетрясений с $M < M_{SP}$ практически полностью расположены внутри афтершоковых областей более сильных событий. Особые значения магнитуд для разных районов рассматриваемого региона оказались близкими друг другу и равными: $M_{SP}^{(J)} = 7,5$ - для Японии, $M_{SP}^{(Kur)} = 7,9$ - для южных Курил, $M_{SP}^{(Kam)} = 7,6$ - для северных Курил - Камчатки и $M_{SP}^{(Al)} = 7,9$ - для Алеутских островов - южной Аляски. В целом, для северо-западной окраины Тихого океана значение особой магнитуды оказалось равным:

$$M_{SP} = 7,7 \pm 0,2, \quad (4.1)$$

где индекс «SP» обозначает, что соответствующее значение является особенностью пространственного распределения.

Землетрясения с $M \geq M_{SP}$ в дальнейшем будем называть сильнейшими.

Класс сильных землетрясений. Анализ сейсмичности показал, что сейсмическая активность афтершоков и форшоков в эпицентральных областях сильнейших курило-камчатских землетрясений с $M \approx 8$ имеет локальный минимум. Существование сейсмических затиший физически вполне очевидно. Из общих соображений, основанных на теории прочности, ясно, что эпицентр является физически объяснимой точкой, в окрестности которой сбрасываемые при землетрясении напряжения достигают максимальных значений. Другими словами, вблизи эпицентра должна существовать область, в пределах которой в течение определенного времени как до, так и после землетрясения наблюдается минимум сейсмической активности.

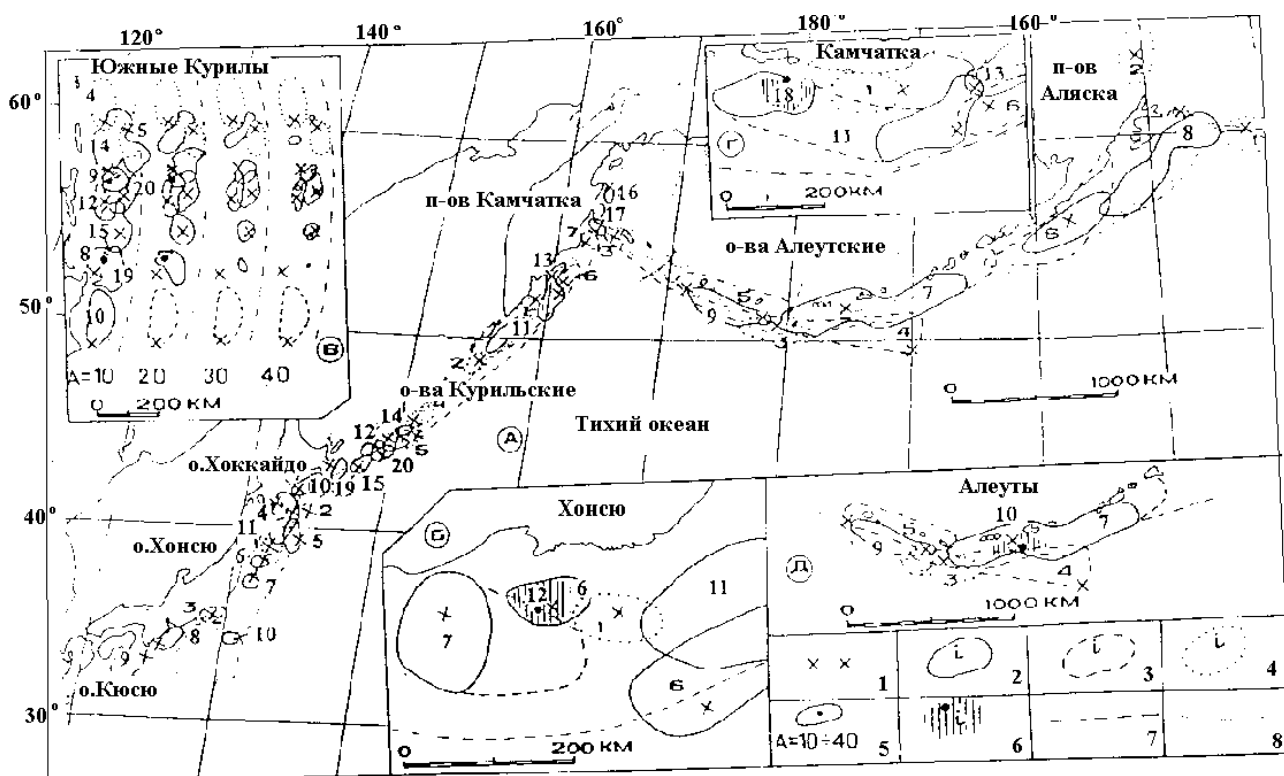


Рис. 4.1. Взаимное расположение афтершоковых областей сильнейших ($M \geq M_{sp}$) землетрясений 1899 – 1986 гг, происшедших в пределах северо-западной части Тихого океана (а), о.Хонсю (б), Южных Курил (в), Южной Камчатки (г), и центральной части Алеутских островов (д), (Викулин, 1987, 1990).

1 – эпицентры сильнейших землетрясений: $M \geq M_{sp}^{(J)} = 7.5$ – Япония; $M \geq M_{sp}^{(Kur)} = 7.9$ – Южные Курилы; $M \geq M_{sp}^{(Kam)} = 7.6$ – Северные Курилы – Камчатка; $M \geq M_{sp}^{(Al)} = 7.9$ – Алеутские о-ва – Аляска; 2, 3, 4, – уверенные, менее уверенные и вероятные границы афтершоковых областей сильнейших землетрясений соответственно; I – индекс, обозначающий порядковый номер землетрясения согласно прилагаемых списков; 5 – изолинии сейсмической активности $A = 10, 20, 30, 40$, проведенные в очагах соответствующих сильнейших землетрясений по афтершокам первого года; 6 – эпицентры землетрясений с $M = M_{sp} - 0.1$ и их афтершоковые области; 7 – оси глубоководных желобов; 8 – изобата 3000 м.

Списки землетрясений:

О.Хонсю. 1 – 01.11.1915, $M=7.7$; 2 – 03.05.1919, $M=7.6$; 3 – 01.09.1923, $M=8.2$; 4 – 09.03.1931, $M=7.6$; 5 – 03.03.1933, $M=8.3$; 6 – 03.11.1936, $M=7.7$; 7 – 05.11.1938, $M=7.7$; 8 – 07.12.1944, $M=8.0$; 9 – 21.12.1946, $M=8.1$; 10 – 26.11.1953, $M=7.5$; 11 – 16.05.1968, $M=7.9$; 12 – 12.06.1978, $M=7.4$.

О.Хоккайдо – Курилы – Камчатка. 1 – 25.06.1904, $M=7.7$; 2 – 01.05.1915, $M=8.3$; 3 – 30.01.1917, $M=8.1$; 4 – 07.09.1918, $M=8.2$; 5 – 08.11.1918, $M=7.9$; 6 – 03.02.1923, $M=8.5$; 7 – 24.02.1923, $M=7.7$; 8 – 11.09.1935, $M=7.7$; 9 – 21.02.1937, $M=7.6$; 10 – 04.03.1952, $M=8.3$; 11 – 04.11.1952, $M=8.5$; 12 – 06.11.1958, $M=8.2$; 13 – 04.05.1959, $M=7.6$; 14 – 13.10.1963, $M=8.0$; 15 – 11.08.1969, $M=8.2$; 16 – 22.11.1969, $M=7.7$; 17 – 15.12.1971, $M=7.8$; 18 – 28.02.1973, $M=7.9$; 19 – 17.06.1973, $M=7.9$; 20 – 24.03.1978, $M=8.0$.

Алеутские о-ва – Аляска. 1 – 10.09.1899, $M=8.6$; 2 – 27.08.1904, $M=8.3$; 3 – 17.08.1906, $M=8.3$; 4 – 07.03.1929, $M=8.1$; 5 – 17.12.1929, $M=8.0$; 6 – 10.11.1938, $M=8.2$; 7 – 09.03.1957, $M=7.9$; 8 – 28.03.1964, $M=8.3$; 9 – 04.02.1965, $M=8.5$; 10 – 07.05.1986, $M=7.7$.

С использованием сейсмологического материала Камчатки показано, что минимум сейсмической активности (сейсмические дыры) как закономерное явление существует в эпицентральных областях всех землетрясений энергетических классов

$$K \geq K_{sp} = 12,5 \text{ (} M \geq M_{sp} = 5,3 \text{), (4.2)}$$

которые названы сильными.

Области сейсмического затишья в эпицентральных областях достаточно сильных землетрясений выделены во всех сейсмических регионах планеты независимо от уровня их активности. Это указывает на то, что существование класса сильных землетрясений является достаточно общим свойством сейсмического процесса. (Отметим, что индекс «sp» в (4.2) отмечен обычными буквами, в то время как индекс «SP» в (4.1) – заглавными).

Сейсмический цикл (Викулин, 1990, 2003). Если тенденция к такому взаимному расположению афтершоковых областей землетрясений северо-западной окраины Тихого океана сохранится и в дальнейшем, то отмеченная особенность будет существовать в течение отрезка времени, названного С.А. Федотовым (1965, 1968) сейсмическим циклом, продолжительность которого составляет:

$$T_{SP} = 190 \pm 40 \text{ лет. (4.3)}$$

Ранее на материале землетрясений Камчатки, Курил и северо-восточной Японии для продолжительности сейсмического цикла С.А. Федотовым было получено значение равное $T_{\phi} = 140 \pm 60$ годам. Как видим, обе оценки T_{SP} и T_{ϕ} не противоречат друг другу.

Однако, между величинами T_{SP} и T_{ϕ} имеется существенное отличие. Оно заключается в том, что значение T_{SP} (и M_{SP}) было получено только на основании анализа свойств распределения очагов сильных землетрясений в пространстве, в то время как значение T_{ϕ} было определено в том числе и с использованием данных о повторяемости сильнейших землетрясений в одном месте. Т.е. сейсмический цикл по С.А.Федотову представляет собою концепцию, «усредняющую» (перемешивающую) свойства пространственного и временного распределений землетрясений.

Для определения функции распределения очагов землетрясений по их размерам был предложен способ, основанный на экспериментально установленном значении оправдываемости долгосрочного сейсмического прогноза сильнейших землетрясений, которое, как отмечалось выше, можно принять равным $P_{pr} = 0,7-0,9 \approx 0,8$. Требуя, чтобы величина пересечения площади, занятой афтершоками сильнейших землетрясений, не превышала $1 - P_{pr} \approx 0,2$, для определения положения границ очагов сильнейших землетрясений было предложено правило, использующее данные об афтершоках первого года и (или) макросейсмические данные о главном толчке.

Выделенные с помощью такого правила очаги сильнейших землетрясений в пределах северо-западной окраины Тихого океана, представлены на рис. 4.1.

«Элементарные» блоки. С момента появления первых данных инструментальных детальных сейсмологических наблюдений стало очевидно, что сейсмофокальная зона имеет блоковое строение. Это подтверждается и взаимным расположением афтершоковых областей сильнейших землетрясений. Действительно, как видно из данных, представленных на рис. 4.1, места стыка таких областей, как правило, приходятся на выявленные поперечные разломы, секущие сейсмофокальную зону вкрест ее простираения, или расположены на продолжении полуостровов, проливов и определенных на суше тектонических нарушений. Наличие соответствия между взаимным расположением афтершоковых областей сильнейших землетрясений, с одной стороны, и положением «элементарных» сейсмофокальных блоков - с другой, достаточно убедительно было показано в рамках «клавишной модели» Л.И. Лобковского и Б.В. Баранова (Лобковский, 1988).

Повторяемость сильнейших землетрясений. Для тех сегментов окраины Тихого океана, для которых ряд наблюдений имеют достаточно большую продолжительность, значения повторяемостей сильнейших землетрясений оказались близкими (табл. 4.1), составляя для окраины Тихого океана, в целом:

$$T_r = 100 \pm 50 \text{ лет.} \quad (4.4)$$

Таблица 4.1. *Повторяемость сильнейших землетрясений в разных регионах Тихоокеанского кольца.*

Регион	М	Даты сильнейших землетрясений	T ₁ , год	T ₂ , год
Камчатка				
Камчатский залив	8.4	22.08.1792	131 48	90 ± 40
	7.7	24.02.1923		
	7.8	15.12.1971		
Кроноцкий залив	8.5	03.02.1923	36	
	7.6	04.05.1959		
Авачинский залив	8.3	17.10.1737	104 111	
	8.4	17.05.1841		
	8.5	04.11.1952		
Япония				
Район Токио	7.9	31.01.1605	98 220	130 ± 50
	8.2	31.12.1703		
	8.2	01.09.1923		
Юго-западнее Токио	8.6	20.09.1498	107 102 147 90	
	7.9	31.01.1605		
	8.4	28.10.1707		
	8.4	23.12.1854		
	8.0	07.12.1944		
Перу				
Район Кальяо	8.3	1513-1515	72 101 59 196	110 ± 50
	8.5	09.07.1586		
	8.5	20.10.1687		
	8.0	28.10.1746		
	8.0	24.08.1942		
Алеуты				
Полуостров Аляска	8.0	22.07.1788	150	100 ± 50
	8.3	10.11.1938		
Ближние острова	8.0	17.08.1906	59	
	8.5	04.02.1965		

Примечание:. T₁, T₂ и T₃ – периоды повторения сильнейших землетрясений в одном месте, пределах района (дуги) и в масштабе всего Тихоокеанского кольца соответственно; T₃ = 100 ± 150 лет.

Наиболее показательным в этом отношении является желоб Нанкай (рис. 4. 2), для которого каталог сильнейших землетрясений имеется с 684 г. С 1498 г. такой каталог является, по-видимому, полным.

Примерное равенство T_{SP} ≈ 2T_r соответствует наблюдавшейся в XX веке закономерности, согласно которой вкрест сейсмофокальной зоны Тихого океана располагались не более чем две афтершоковые области сильнейших землетрясений (рис. 4.1).

Значения повторяемостей сильнейших тихоокеанских землетрясений, не выходящие за пределы интервала (4.4), ранее были получены многими другими авторами. Следует отметить, что близкие значения повторяемости наиболее сильных (разрушительных) землетрясений были отмечены и для других сейсмических поясов

планеты: 90 - 140 лет - для Кавказа и 150 лет - для Анатолийского разлома. Такой же период - по сути, сейсмический цикл, был установлен для Японии. Период, равный 200 годам, выделен и на сейсмологическом материале Новой Зеландии.

Данные за достаточно продолжительные отрезки времени, очевидно, могут характеризоваться и большими периодами. Так из данных, представленных на рис. 4.2, для желоба Нанкай (ряд наблюдений продолжительностью более $\Delta t=1300$ лет) выделяются характерные периоды, равные 600 и 1200 годам. Близкая ситуация имеет место и для других сейсмических регионов планеты. Наряду с периодом, близким T_r , для Армении ($\Delta t=1300$ лет) выделяется период «общей продолжительностью 800-950 лет, сейсмоактивная часть которого охватывает около 600 лет», для землетрясений Турции ($\Delta t=2300$ лет) - выделяется период продолжительностью 250-300 лет. Для Китая ($\Delta t=2200$ лет) выделены периоды продолжительностью 240-280 и около 1000 лет.

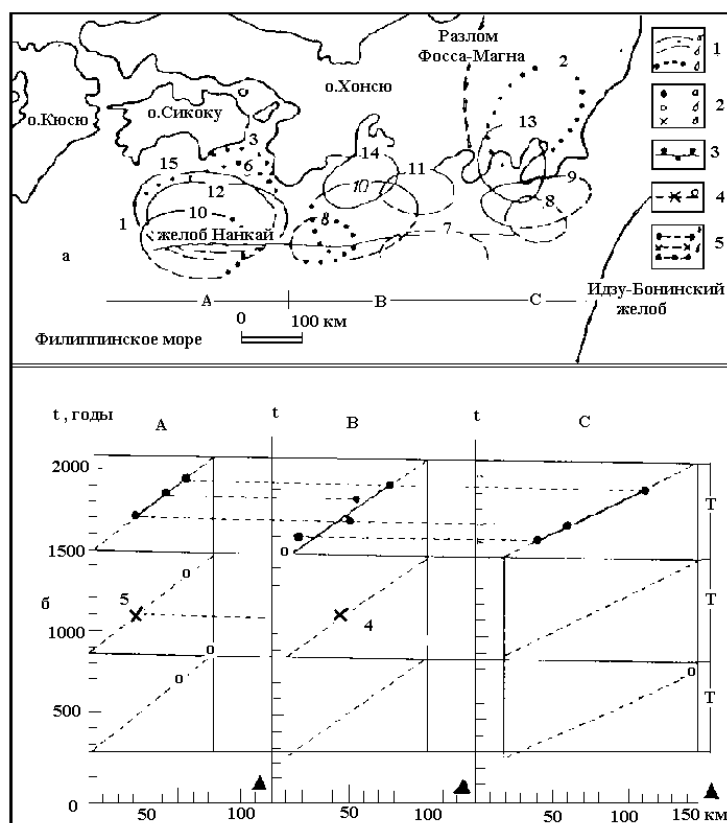


Рис. 4.2. Расположение очаговых областей землетрясений с $M \geq 7.9$ в 684 – 1946 гг. в районе желоба Нанкай (а) и их пространственно-временная карта (б) (Викулин, 1992; Викулин, Викулина, 1989). 1 – уверенные (а), менее уверенные (б) и вероятные (в) участки границ очаговых областей землетрясений; 2 – уверенные (а), менее уверенные (б) и вероятные значения, определяющие величину расстояния от оси желоба до ближайших к берегу участков очаговых областей землетрясений; 3 – миграционные цепочки, рассчитанные для каждой из трех зон (А, Б, С) методом наименьших квадратов и объединяющих очаговые области землетрясений 1605 – 1946 гг; 4 – так же цепочки, продолженные в интервале времени 648 – 1498 гг; 5 – пары (а) и тройки (б) землетрясений.

Цифры 1 – 15 обозначают следующие землетрясения: 1 – 27.11.674 г.; 2 – 818г., $M=7.9$; 3 – 26.08.887г., $M=8.6$; 4 – 21.02.1099г., $M=8.0$; 5 – 17.12.1096г., $M=8.4$; 6 – 03.08.1361 г., $M=8.4$; 7 – 20.09.1498г., $M=8.6$; 8 – 31.01.1605г., $M=7.9$; 9 – 31.12.1703г., $M=8.2$; 10 – 28.10.1707г., $M=8.4$; 11 – 23.12.1854г., $M=8.4$; 12 – 24.12.1854г., $M=8.4$; 13 – 01.09.1923г., $M=8.2$; 14 – 07.12.1944г., $M=8.0$; 15 – 21.12.1946г., $M=8.0$.

Как видим, для разных сейсмических регионов планеты, независимо от уровня их активности, имеет место примерно одинаковый набор значений характерных периодов. Эти данные позволяют предположить, что по своим «временным» свойствам сейсмический процесс имеет единую природу в масштабе всей планеты.

Три стадии сейсмического цикла (Викулин, 2003; Викулин, Сенюков, 1988). Изменение сейсмической активности (нормированное на время и площадь число землетрясений определенного энергетического класса или магнитуды) со временем исследуем на примере камчатского землетрясения.

5 декабря 1997 г. на Камчатке вблизи Кроноцкого полуострова произошло землетрясение с $M = 7,5 - 7,7$, которое сопровождалось достаточно мощным по количеству и частоте появления сильных толчков форшоковым и афтершоковым процессом. На Камчатке в течение примерно месяца 3.12.97 - 1.1.98 гг. землетрясения энергетических классов $K \geq 12$ ($M \geq 5$) происходили только в пределах Кроноцкого сейсмофокального блока - очага Кроноцкого землетрясения. Таких землетрясений было зарегистрировано $N = 64$. Всего в течение 1.1.97 - 4.3.98 гг. в пределах сейсмофокального объема у берегов Камчатки было зарегистрировано $N = 81$ землетрясение таких энергетических классов.

Исследовались «траектории» движения эпицентров землетрясений таких энергетических классов - прямолинейные отрезки, соединяющие эпицентры всех следующих друг за другом землетрясений. Для каждой траектории определялось значение скорости V , численно равное отношению длины прямолинейного отрезка, соединяющего эпицентры соседних во времени землетрясений списка, к интервалу времени между ними. Часто совокупности отрезков-траекторий могут рассматриваться и как «колебательные» движения эпицентров землетрясений вдоль и вкrest сейсмофокальной зоны. Для таких совокупностей траекторий определялось значение частоты ν как величины, обратной половине периода полного колебания.

Значения скоростей миграции V , рассчитанных для всех ($N=81$) последовательных пар землетрясений, и достаточно уверенно определяемых частот ($N=49$) приведены на рис. 4.3. Из данных, представленных на том рисунке, видно, что анализируемый временной интервал 1.1.1997 - 4.3.1998 гг. по характеру изменения зависимостей $V(t)$ и $\nu(t)$ достаточно четко разбивается на четыре следующих друг за другом отрезка времени. Первый (1.1.-2.12.97) и четвертый (2.1.-4.3.98) из них могут быть отождествлены с фоновой фазой сейсмического процесса, определяемой низким (фоновым) уровнем сейсмической активности $\lg \nu_{\text{фон}}[\text{час}^{-1}] = -2,6 \pm 0,3$, $N_{\text{фон}}(K \geq 12) = 22 \pm 10 \text{ год}^{-1}$ и малыми значениями скоростей миграции $\lg V_{\text{фон}}[\text{км/час}] = 0,15 \pm 0,35$, $V_{\text{фон}} \sim 1 \text{ км/час}$.

В течение второго (3-5.12.97) и третьего (5.12.97-1.1.98) отрезков времени, наоборот, очень большое ($N=64$) количество исследуемых ($K \geq 12$) землетрясений было зарегистрировано только в пределах Кроноцкой брешы при полном их отсутствии в других сейсмофокальных блоках Камчатки - северных Курил. Второй, форшоковой, фазе сейсмического процесса соответствует период «оживления» сейсмичности, в течение которого скорость миграции V и частота «колебания» эпицентров сильных толчков ν в районе будущего главного толчка резко увеличивается примерно на один - два порядка: $V \sim 10 \text{ км/час}$, $N(K \geq 12) \approx 6 \text{ день}^{-1}$.

В течение третьей, афтершоковой, фазы значения V и ν в области очага главного толчка плавно уменьшаются примерно на четыре порядка в соответствии с зависимостями, определенными методом наименьших квадратов:

$$\lg V[\text{км/час}] = (-0,94 \pm 0,12) \cdot \lg t[\text{час}] + (2,80 \pm 0,17), N=63, (4.5)$$

$$\lg \nu[\text{час}^{-1}] = (-0,72 \pm 0,15) \cdot \lg t[\text{час}] + (0,60 \pm 0,24), N=29. (4.6)$$

При этом, скорость миграции уменьшается от значения, по порядку величины близкого скорости упругих волн сразу после главного толчка $\lg V_{\text{афт}}[\text{км/час}] \approx 3,5$, $V_{\text{афт}} \approx 0,8 \text{ км/сек}$ до «фоновой» скорости в конце афтершоковой фазы.

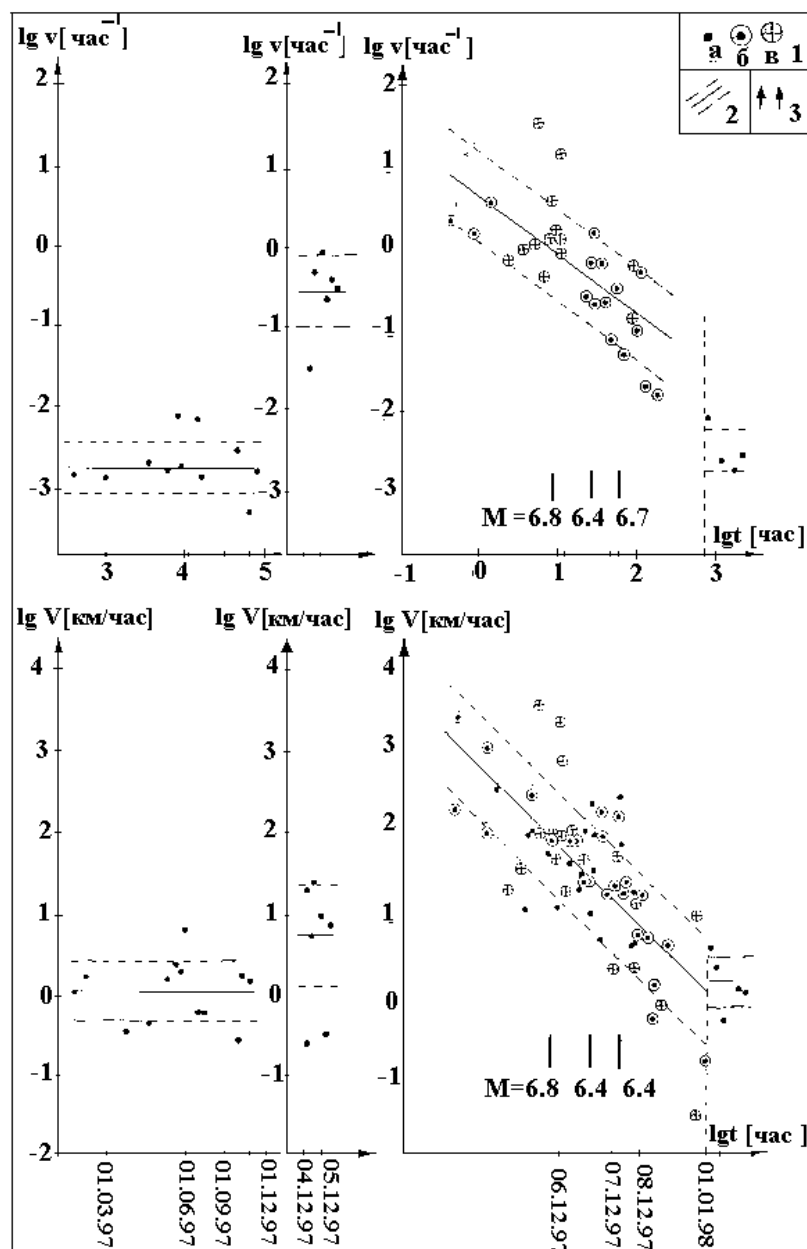


Рис. 4.3. Значения скоростей миграции V эпицентров землетрясений с $K \geq 12$ ($M \geq 5$) и частот их «колебаний» ν по данным за 1997 – 04.03.1998 гг. 1- рассчитанные значения V и ν , в том числе для миграции вдоль (б) и вкост (в) сейсмофокальной зоны в течение афтершокового периода 05.12.1997 – 01.01.1998 гг (афтершоковой фазы); 2 – рассчитанные методом наименьших квадратов прямые зависимости $\lg V(\lg t)$, $\lg \nu(\lg t)$ и среднеквадратичные отклонения; 3 – моменты наиболее сильных афтершоков с $M \geq 6.0$.

Как видим, распределение сильных землетрясений в очаге Кроноцкого землетрясения подтверждает данные С.А. Федотова о трех стадийности сейсмического процесса.

Следует отметить, что зависимости $V(t)$ и $\nu(t)$ являются подобными в течение всех трех стадий сейсмического цикла. Такое поведение зависимостей (4.5) и (4.6) показывает, что очаг Кроноцкого землетрясения в течение всех трех стадий движется как целый, «осциллирующий» характер активности указывает на колебательный или вращательный тип движения.

Противоречивость данных о периодичности сейсмического процесса. Существует две противоположные точки зрения на периодичность сейсмического процесса. С одной стороны, анализ особенностей пространственного и временного распределения землетрясений совершенно определенно указывает на существование характерных сейсмических периодов. Так, выше, для класса сильнейших сейсмических событий - как особенности взаимного распределений афтершоковых областей землетрясений в пространстве, показано существование двух характерных для сейсмического процесса временных интервалов: сейсмического цикла T_{SP} (4.3) и повторяемости T_r (4.4). Анализ региональных каталогов, каждый из которых содержит достаточно полный список землетрясений за достаточно продолжительный отрезок времени, как правило, приводит к появлению и более длинных (значительно больше $T_{SP,r}$) периодов, значения которых приводились выше.

С другой стороны, анализ большого количества исследований по повторяемости землетрясений, проведенный К. Аки и С. Ломnitz, позволил установить существование большого количества периодов, значения которых лежат в широком диапазоне от минут до многих сотен и, по-видимому, первых тысяч лет. На основании этих данных Т. Рикитакэ делает вывод о том, что “если бы все эти периодичности действительно существовали, в результате получился бы почти белый шум”. Откуда следует, что сейсмический процесс не является периодическим.

Методика исследования распределения землетрясений во времени. Общепринятая методика исследования распределения землетрясений по интервалам между ними сводится к следующему. На первом этапе исследования, путем фиксации границ магнитудного диапазона и пространственно-временной области, формируется совокупность землетрясений. На втором этапе составляется числовая последовательность, количественно характеризующая распределение следующих друг за другом землетрясений по интервалам между ними (экспериментальная последовательность). На третьем этапе для анализируемой совокупности землетрясений проводится расчет теоретической числовой последовательности, соответствующей тому или иному известному закону распределения, обычно, закону Пуассона. На четвертом этапе экспериментальная и теоретическая последовательности сравниваются между собою. Результат сравнения количественно выражается соответствующим значением доверительной вероятности P . При этом полагают, что некая закономерность в распределении землетрясений во времени существует в том случае, если значение P превышает некоторую критическую величину $P_{кр}$, которая задается из априорных соображений.

В каждом исследовании оценка статистической значимости, как правило, проводилась для одного распределения, которое на плоскости магнитуда M - время t характеризуется одной точкой с координатами M_0 и t_0 , где M_0 - фиксирует (обычно снизу, $M \geq M_0$) значение магнитуд исследуемой совокупности землетрясений, t_0 - продолжительность периода, статистическая значимость которого для такой совокупности устанавливается.

Применение такой методики, как показано выше, приводит к парадоксальному результату, который заключается в том, что для отдельных совокупностей землетрясений закономерности существуют, в то время как для всей совокупности землетрясений они отсутствуют.

Приведенные выше данные показывают, что некоторые периодичности (или квазипериодичности, т.е. почти периодичности) все же реальны. На это указывает высокое значение оправдываемости долгосрочного сейсмического прогноза, в основе которого как раз и заложены представления о цикличности сейсмического процесса. Поэтому наиболее вероятная причина такой неоднозначности заключается в существовании определенного произвола при формировании исходной выборки статистических данных. Интуитивно

ясно, что на основании существующих каталогов землетрясений всегда (или практически всегда) можно так сформировать исходные данные (в разумных пределах варьируя пространственными координатами гипоцентров и магнитудами землетрясений с учетом реальной точности определения их значений), чтобы, во-первых, выборка была статистически значимой и, во-вторых, расчетное значение соответствующей доверительной вероятности было достаточно высоким.

Видим, что противоречивость вывода о периодичности сейсмического процесса, скорее всего, может являться следствием не достаточно корректного формирования исходных совокупностей землетрясений. В результате этого при обосновании статистической значимости получаемых сейсмических периодов в некоторых случаях завышаются значения соответствующих доверительных вероятностей, что приводит к появлению “мнимых” периодов и, как следствие, к выводу о “белом сейсмическом шуме”.

Формирование совокупностей данных, кроме того, необходимо проводить с учетом условий, которые накладываются эффектами группирования землетрясений. Действительно, существование классов землетрясений (в частности, например, сильнейших) допускает наличие у всех событий одного класса, т.е. землетрясений определенного магнитудного диапазона $M \geq M_0$, тождественных свойств. Физически это означает, что в случае выявления какой-либо закономерности для совокупности землетрясений с $M \geq M_1$, $M_1 \geq M_0$, появление такой же закономерности следует ожидать и для другой совокупности землетрясений с $M \geq M_2$, $M_2 \geq M_0$, $M_2 \neq M_1$. Другими словами, статистическое исследование должно опираться на такой способ формирования совокупностей землетрясений, который является методически корректным в широком диапазоне магнитуд.

В свете сказанного представляется, что при статистических исследованиях для корректного выявления закономерностей распределения землетрясений во времени методику исследования необходимо изменить следующим образом. Все промежуточные совокупности данных должны формироваться на основании одной “генеральной” выборки, составление которой должно быть проведено с использованием максимально полного объема известных данных. Такой подход к формированию генеральной выборки, в свою очередь, позволит в широком диапазоне магнитуд и продолжительностей интервалов: $M_1 \leq M_0 \leq M_2$, $\tau_1 \leq \tau_0 \leq \tau_2$ обеспечить достаточно корректный переход от “точечного” анализа к анализу значений доверительной вероятности P на плоскости $M_0 - \tau_0$. Кроме того, для сравнения, параллельно с анализом “кумулятивных” совокупностей с $M \geq M_0$ представляется целесообразным анализировать и статистически от них независимые другие совокупности, например, “дискретные” с $M=M_0$.

При этом, методика расчета значений доверительной вероятности в каждой точке M_0, τ_0 плоскости $M_0-\tau_0$ остается прежней; она включает описанные выше четыре этапа. В качестве теоретического в расчетах будем использовать распределение Пуассона. Сравнение экспериментальных и теоретических распределений будем проводить с использованием критерия χ^2 .

При статистических исследованиях систем, состоящих из достаточно большого количества объектов, как известно, “появляются новые своеобразные закономерности”, которые “ни в какой степени не могут быть сведены к чисто механическим закономерностям. Их специфичность проявляется в том, что они теряют всякое содержание при переходе к механическим системам с небольшим числом степеней свободы” (Ландау, Лифшиц, 1964). Именно поэтому для исследования таких статистических систем разработана специальная концепция, получившая название *фазового пространства*. Каждая точка такого пространства соответствует определенному состоянию анализируемой системы. Таким образом, исследование состояния статистической системы сводится к анализу траекторий движения точек в фазовом

пространстве. Закономерное распределение точек в фазовом пространстве описывается функцией статистического распределения, которая имеет вероятностную природу.

Как видим, в случае если на плоскости M_0 - τ значения доверительной вероятности P распределены в соответствии с какими-либо закономерностями, то эти закономерности могут быть проинтерпретированы в рамках физически обоснованной концепции.

Возможность применения к сейсмостатистическим задачам принципов статистической физики в будущем может оказаться достаточно плодотворной. На настоящем уровне исследований, как представляется, практическое применение этих принципов является скорее физически правдоподобным, чем строго обоснованным.

Использование статфизического подхода, в частности, достаточно наглядно позволяет обосновать статистическую независимость разных достаточно больших по размеру сейсмических подсистем. Скажем, процессы, протекающие в пределах разных островных дуг в течение непродолжительного отрезка времени T_1 (меньшего некоего характерного интервала T_0 , $T_1 < T_0$), могут рассматриваться как статистически независимые друг от друга. Тогда, объединяя сейсмостатистические данные по n островным дугам в одну выборку, получаем эффективный ряд наблюдений для этой выборки продолжительностью $T_{\text{эфф}} = nT_1$.

Инструментальные данные о достаточно сильных ($M \geq 7$) землетрясениях имеются за период времени продолжительностью около 100 лет, в то время как продолжительность сейсмического цикла, как показано выше, составляет около $T_c \approx 200$ лет. Поэтому используя данные инструментальных наблюдений для нескольких островных дуг, в рамках предлагаемого нового сейсмостатистического подхода оказывается возможным выявлять сейсмические периоды продолжительностью T_c и более.

Особенности распределения северо-западно-тихоокеанских землетрясений во времени. Проводился сравнительный анализ двух статистически независимых совокупностей событий, которые были представлены выборками землетрясений с $M \geq M_0$ и с $M = M_0$, названных кумулятивными и дискретными соответственно. Для каждой выборки исследование проводилось на двух уровнях. На первом, в качестве исходного материала использовались инструментальные каталоги северо-западно-тихоокеанских землетрясений с $M \geq 7$, $H < 100$ км, происшедших в XX столетии. Всего таких землетрясений в 1904 - 1980 гг. произошло 264, из них 75 - в пределах сейсмофокальной зоны алеутской дуги, 95 - курило-камчатской, включая о. Хоккайдо, и 94 - о. Хонсю. Использование данных трех островных дуг, представленных 100 летним периодом наблюдений, позволяет, как представляется, выявлять периодичности с продолжительностью до 300 лет.

На втором уровне использовались данные детальных сейсмологических наблюдений о землетрясениях энергетических классов $10 \leq K \leq 14 \div 15$ ($3 \leq M \leq 7$), происшедших в 1958 - 1980 гг. в очагах сильнейших курило-камчатских событий. Общее число анализируемых землетрясений такого магнитудного диапазона составило многие сотни. Как видим, исходные сейсмологические данные являются статистически достаточно представительными.

Результаты расчетов приведены на рис. 4.4. Из данных, представленных на этом рисунке, видно, что в случае обеих совокупностей землетрясений - кумулятивных с $M \geq M_0$ ($\geq$) и дискретных с $M = M_0$ ($=$), значения доверительной вероятности в диапазонах малых $3 \leq M_0 \leq M_{01} = 4,5 - 5,0$ и больших $M_0 \geq M_{02} = 7,7$ магнитуд распределены явно не случайным образом. А именно, одинаковые значения доверительной вероятности располагаются вдоль линий (изолиний), которые не пересекают друг друга (рис. 4.4 Аа, Аб, Б, В).

Ниже установим закономерности сейсмического процесса, соответствующие такому расположению точек P . Здесь подчеркнем следующее. Кумулятивные и

дискретные совокупности можно считать статистически независимыми. Поэтому магнитуды M_{01} и M_{02} , по сути, являются особыми точками временного (t) распределения:

$$M_{t1} = 4,5 - 5,0, \quad (4.7)$$

$$M_{t2} = 7,7, \quad (4.8)$$

так как в небольших окрестностях этих точек закономерности сейсмического процесса, соответствующие изолиниям доверительной вероятности и их особенностям, могут изменяться достаточно сильно.

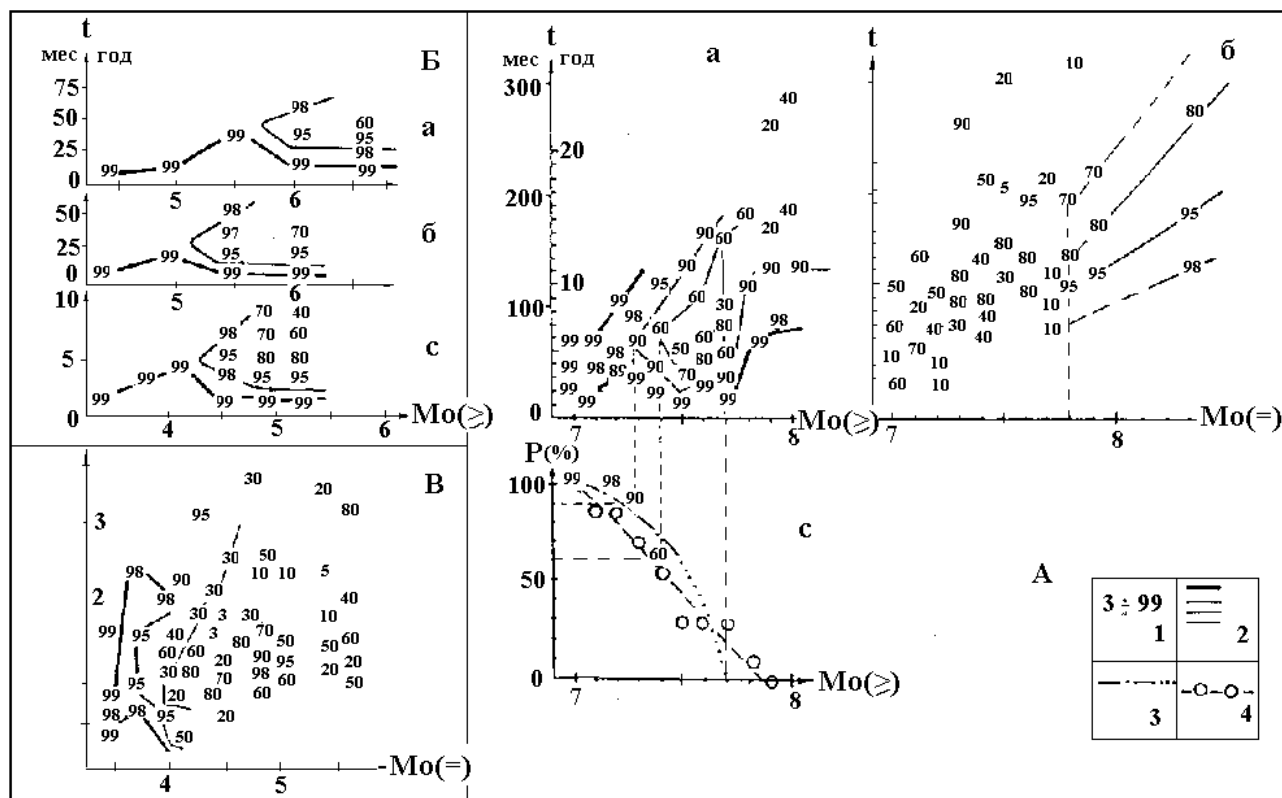


Рис. 4.4. Характеристика «Кумулятивных» ($\geq$) (А, а; Б) и «дискретных» ($=$) (А, б; В) распределений чисел землетрясений по временным интервалам между ними на двух уровнях: А – северо-западная часть Тихого океана, $M \geq 7$, 1904 – 1980 гг и Б, В – очаги Курило-Камчатских сильнейших землетрясений, $K \geq 10$ ($M \geq 3$): Итурупское 06.11.1958, $M = 8.2$, афтершоковая стадия (Б, а); Урупское 13.10.1963, $M = 8.0$, форшоковая стадия (Б, б) и Большое Камчатское 04.11.1952, $M = 8.5$, стадия стабилизации (Б, в). 1,2 – значения доверительной вероятности P и соответствующие им изолинии, «толщина» которых пропорциональна P ; 3 – график зависимости, характеризующей долю сильнейших землетрясений, имеющих форшоки и афтершоки первого года с $M \geq M_0$; 4 – график зависимости, характеризующей протяженность горизонтального участка изолинии доверительной вероятности.

Класс сильных форшоков и афтершоков. Как видно из данных, представленных на рис. 4.4Аа, каждая изолиния кумулятивного распределения может быть аппроксимирована тремя прямолинейными отрезками, «горизонтальным» ($\tau = \text{const}$), в центре, и двумя «наклонными». При этом, длины горизонтальных отрезков пропорциональны значению доверительной вероятности $\Delta M_0 = M_{t2} - M_0 \sim P$ и определяются положениями их левых концов, поскольку положение правых, не зависимо от P , фиксировано особым значением магнитуды M_{t2} (4.8).

Графически зависимость, характеризующая протяженность горизонтальных участков изолиний доверительной вероятности как функция P , в виде сплошной линии, продолжающейся точками, представлена на рис. 4.4Ас. Пустыми кружками и пунктирной линией на этом же рисунке изображен график, характеризующий долю японских, курило-камчатских и алеутских землетрясений 1904 - 1982 гг. с $M \geq M_{12} = 7,7$, имеющих форшоки и афтершоки первого года с $M \geq M_0$. Под форшоками и афтершоками понимаются землетрясения, эпицентры которых попадают внутрь очаговых областей землетрясений с $M \geq M_{12}$, границы которых изображены на рис. 4.1. Из данных, представленных на рис.3.26Ас, видно, что обе зависимости являются достаточно близкими. Следовательно, землетрясения магнитудного диапазона $7 \leq M \leq M_{12} = 7,7$, по сути, являются сильными форшоками и афтершоками землетрясений с $M \geq M_{12} = 7,7$. Нижней границей такого класса событий, как можно предположить на основании данных, представленных на рис. 4.4 Аа, Б, является особое значение магнитуды $M_{11} = 4,5-5,0$.

Т.о., показано, что длины горизонтальных отрезков изолиний пропорциональны значению доверительной вероятности P : $\Delta M_0 = M_{12} - M_0 \sim P$ и определяют долю сильнейших землетрясений, имеющих форшоки и афтершоки с $M \geq M_0$. Тем самым дана интерпретация введенной выше величины доверительной вероятности и показано, что землетрясения магнитудного диапазона $M_{11} \leq M \leq M_{12}$ являются сильными фор-афтершоками.

Квазипериодичность сейсмического процесса. Рассмотрим всю совокупность изолиний на кумулятивной плоскости $M_0^{(\geq)}$ - τ . Как видно из данных, представленных на рис. 4.4Аа, изолинии доверительной вероятности, непересекаясь между собою, при $P \rightarrow 60\%$ «непрерывно» стягиваются к замкнутой линии. Физика замкнутой линии на фазовой плоскости, как известно, заключается в том, что соответствующий этой линии процесс является периодическим. Определим продолжительность периода. Для этого, записывая математическое выражение для изолинии в виде $P(M_0, \tau) = \text{const}$, дифференцируя его, получаем, вследствие не пересечения изолиний, уравнение :

$$\frac{\partial P}{\partial M_0} \Delta M_0 + \frac{\partial P}{\partial \tau} \Delta \tau = 0,$$

которое тождественно выполняется вдоль горизонтального (т.к. $\partial P / \partial M_0 = 0$, $\Delta \tau = 0$) и правого «вертикального» (т.к. $\partial P / \partial \tau = 0$, $\Delta M_0 = 0$) прямолинейных отрезков изолиний. Следовательно, величина периода волнового движения, отражением которого на фазовой плоскости $M_0^{(\geq)}$ - τ является замкнутая изолиния, будет равна длине ее горизонтального участка ΔM_0 , умноженной на наклон левого (I) прямолинейного отрезка изолинии $a_1 = (d\tau/dM_0)_I$:

$$T_t = a_1 \cdot \Delta M_0.$$

Согласно данным, представленным на рис. 4.4Аа, значения этих величин составляют $\Delta M_0 = 7,55 \pm 0,15$ и $a_1 \approx 30 \pm 7$ год/ед.магнитуды $\neq f(P)$, откуда для величины сейсмического периода получаем следующую оценку:

$$T_t = 230 \pm 60 \text{ лет. (4.9)}$$

Эта величина близка предельному значению периода, который может быть выявлен в рамках используемой при анализе методики. Поэтому полученные данные могут рассматриваться в качестве доказательства лишь квазипериодического (или почти периодического) характера сейсмического процесса. С этим же обстоятельством, возможно, связаны и достаточно низкое значение доверительной вероятности вдоль замкнутой изолинии - $P=60\%$ и большой (около 50%) разброс экспериментальных значений повторяемостей сильнейших тихоокеанских землетрясений (рис. 4.4, табл. 4.1). Однако, возможна и другая интерпретация. А именно, периодичность - как закономерность, является характерным (адекватным) свойством сейсмического процесса;

значение же периода зависит от ряда «региональных» параметров, что и объясняет большой разброс его значений.

Таким образом, анализ свойств распределения землетрясений во времени выявил существование двух особых значений магнитуд M_{t1} и M_{t2} , которым соответствуют такие две (вообще говоря, взаимосвязанные) особенности сейсмического процесса, как его квазипериодичность и существование класса сильных фор-афтершоков.

Миграция землетрясений (Викулин, 1990, 2003). Близость значений граничных магнитуд, “отсекающих” классы сильнейших землетрясений по особенностям пространственного M_{SP} (3.20) и временного M_{t2} (3.27) распределений,

$$M_{SP} = 7,7 \pm 0,2 \approx M_{t2} = 7,7 = M_{ST} \quad (4.10)$$

указывает на то, что класс сильнейших событий является в то же время и такой группой землетрясений, очаги которых закономерным образом распределены в пространстве-времени. Данные, приведенные на рис. 4.5, показывают, что очаги сильнейших северо-западно-тихоокеанских землетрясений группируются в цепочки, в пределах которых они мигрируют в направлении с юго-запада на северо-восток со скоростью равной

$$V = 250 \pm 30 \text{ км/год.} \quad (4.11)$$

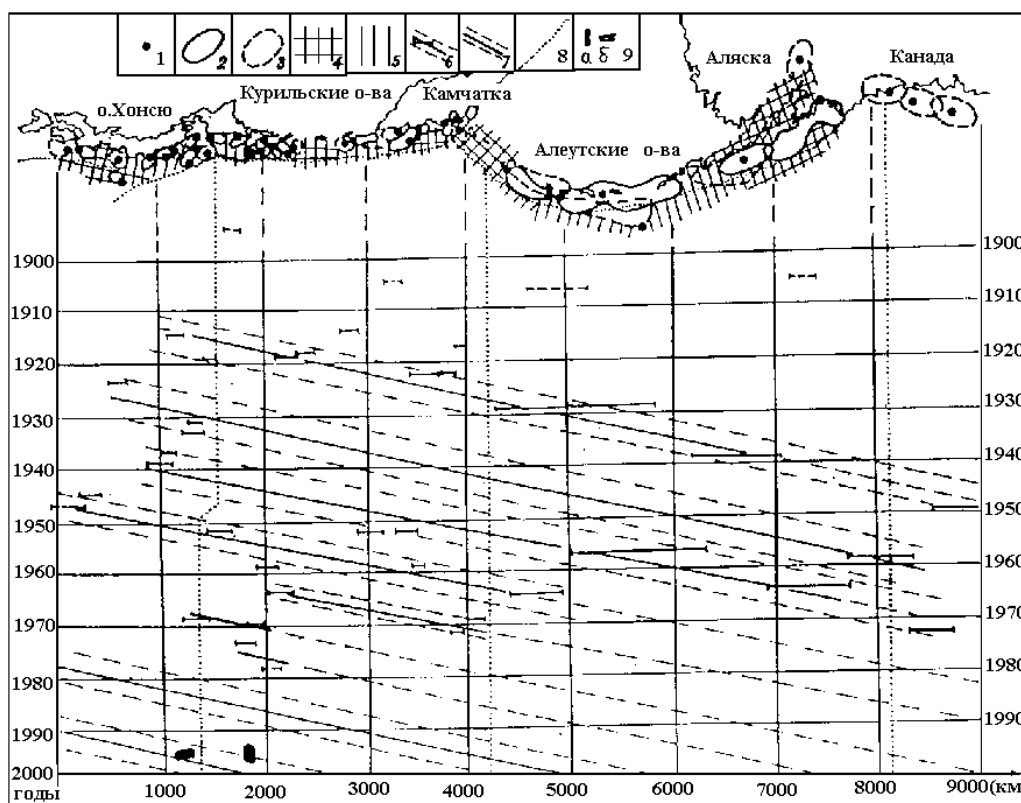


Рис. 4.5 Пространственно-временная карта очаговых областей северо-западно-тихоокеанских сильнейших землетрясений 1904 – 1986 гг. 1 – эпицентры землетрясений; 2,3 – соответственно уверенные (и менее уверенные) и вероятные границы очаговых областей землетрясений, представленные на рис. 3.16; 4 – наиболее вероятные места, в пределах которых в будущем могут располагаться очаговые области сильнейших землетрясений; 5 – менее вероятные места расположения очаговых областей таких же землетрясений; 6 – положение очаговых областей землетрясений на пространственно-временной карте и проведенные по ним миграционные цепочки; 7 – прогнозные цепочки, в пределах которых в будущем следует ожидать появления очаговых областей сильнейших землетрясений (Викулин, 1989, 1990); 8 – оси глубоководных желобов; 9 – сильнейшие землетрясения: Шикотанское 04.10.1994, $M = 8$ (а) и вблизи о. Хонсю 28.12.1994, $M = 7.9$ (б).

Близкие значения скоростей миграции и то же ее направление вдоль окраины Тихого океана в классе достаточно сильных землетрясений не зависимо от наших данных были получены другими авторами. Такие совпадения как в исходных данных (значение M_0 близко установленным нами особым магнитудам M_{SP} и M_t , «отсекающим» класс сильнейших землетрясений), так и в полученных результатах (совпадение значений скоростей миграции при том же ее направлении) подтверждают сформулированный нами выше вывод о том, что миграция сильнейших землетрясений является пространственно-временной закономерностью сейсмического процесса.

Взаимодействие землетрясений (Викулин, 1990, 2003). Исследовались особенности графика повторяемости землетрясений. При анализе использовались описанные выше две совокупности данных. Графики повторяемости, построенные по этим совокупностям данным, представлены на рис. 4.6.

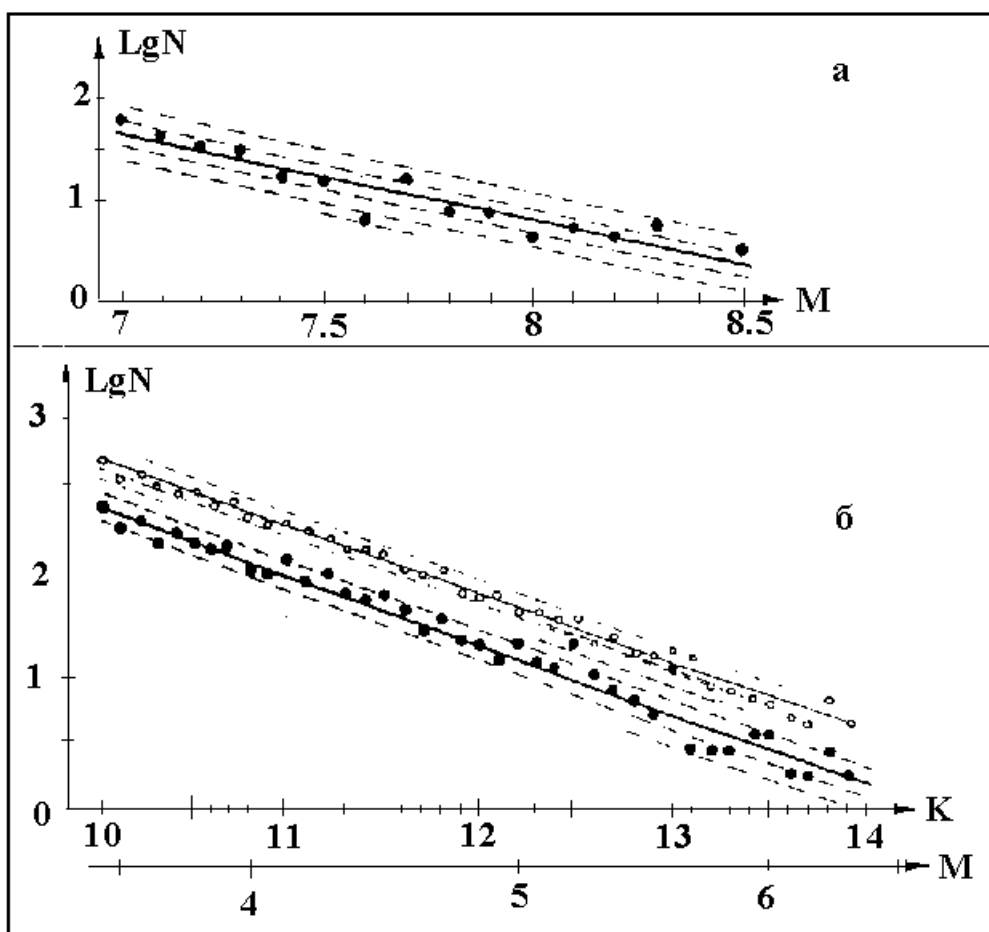


Рис. 4.6. Графики повторяемости северо-западно-тихоокеанских 1904 – 1980 гг, $M \geq 7$ (а) и Камчатских 1962 – 1980 гг, $K \geq 10.0$ ($M \geq 3.0$) (б) землетрясений. Незалитые кружки и тонкая прямая линия соответствует графику повторяемости, построенному по данным о всех Камчатских землетрясениях 1962 – 1980 гг.

Наибольшее, превышающее удвоенное среднеквадратичное отклонение от закона повторяемости, построенного по данным о северо-западно-тихоокеанских землетрясениях, имеет место в точке $M = 7,6$. Методом оценки индивидуального отклонения величины $\lg N$ можно показать, что отклонение от закона повторяемости в этой точке значимо на уровне 0,05. Как видно из данных, представленных в табл. 4.2, в малой окрестности этой же точки имеют место локальные минимумы чисел землетрясений по данным для каждой островной дуги в отдельности.

Таким образом, распределение северо-западно-тихоокеанских землетрясений с $M \geq 7$ по их сейсмическим энергиям имеет особенность в окрестности точки

$$M_E = 7,6 \pm 0,1. \quad (4.12)$$

Таблица 4.2. Числа землетрясений с $M \geq 7$, происшедших в 1904-1980 гг. в пределах северо-западной части Тихого океана.

М регион	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	ΣN
Алеутские о-ва - Аляска	20	20	8	8	5	4	0	0	2	1	2	1	1	2	0	1	75
Курильские о-ва Камчатка	36	14	16	16	6	3	4	6	3	2	1	2	2	2	0	2	95
О.Хонсю	27	11	12	7	6	8	2	10	2	4	1	2	1	1	0	0	94
Всего, N	63	45	36	31	17	15	6	16	7	7	4	5	4	5	0	3	264

Из данных, представленных табл. 4.3 и рис. 4.6, аналогичным образом сделан вывод о том, что энергетическое распределение камчатских землетрясений, происшедших в очагах сильнейших событий в течение любой стадии сейсмического цикла, имеет особенность в окрестности точки

$$K_e = 12,5 \pm 0,1, M_e = 5,3 \pm 0,1. \quad (4.13)$$

Таблица 4.3. Числа землетрясений с $K \geq 12.3$ ($M > 5.0$), происшедших в очагах сильнейших Камчатских землетрясений 04.11.1952, $M=8.5$; 04.05.1959, $M=7.6$ и 15.12.1971, $M=7.8$ в 1962-1980 гг в течение различных стадий сейсмического цикла.

Землетрясение	Временной интервал Стадия сейсмического цикла	Энергетический класс, K									
		12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.2
4.11.1952, $M=8.5$	1962-1972, афтершоки	7	1	5	6	5	3	1	7	2	0
	1973-1980, стабилизация	6	9	9	4	4	2	2	4	1	2
4.05.1959, $M=7.6$	1962-1980, афтершоки	0	2	4	1	1	2	3	3	0	1
	1962-1971, форшоки	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
15.12.1971, $M=7.8$	1972-1980, афтершоки	1	2	3	2	1	0	0	0	0	1
	Всего, N	15	14	22	13	11	7	6	14	3	4

Итак, для каждого из классов сильнейших (S-T-E) и сильных (s-t-e) землетрясений, как видно из равенств (4.10) и (4.12), с одной стороны, и (4.13) и (4.2) – с другой, были получены следующие равенства:

$$M_E = M_{ST} = 7,7 \pm 0,2, \quad (4.14)$$

$$M_e = M_{st} = 5,3 \pm 0,3, \quad (4.15)$$

которые показывают, что пространственно - временным закономерностям распределения очагов землетрясений в каждом классе событий соответствуют особенности энергетического распределения. Физически этот вывод равносильно утверждению, согласно которому очаги землетрясений в пределах каждого класса событий (сильных или сильнейших) можно рассматривать как взаимодействующие. Следовательно, соответствующие миграционные цепочки можно считать проявлением такого взаимодействия.

Сформулированный вывод о существовании взаимодействия между землетрясениями является принципиально новым физическим результатом, который основан на равенстве значений, соответствующих особенностям пространственно-временных и энергетических распределений сейсмичности.

Следует отметить, что отмечавшаяся другими исследователями ранее взаимосвязь между землетрясениями основана на доказательстве математического утверждения о

величине соответствующей статистической значимости эффекта. Очевидно, что эти результаты дополняют друг друга и могут рассматриваться как доказательство существования взаимодействия между очагами землетрясений на разных масштабных пространственно-временных и энергетических уровнях.

Феноменологическая модель сейсмического процесса (Викулин, 1990, 2003). Рассмотрим класс сильнейших тихоокеанских землетрясений. Для этого класса событий сейсмофокальную зону можно считать одномерной и эффект миграции их очагов математически можно записать следующим образом:

$$ax \pm bt = 0, V = b/a, (4.16)$$

где x – координата очага землетрясения вдоль зоны, t – время, a и b – коэффициенты, V – скорость миграции.

Изменение сейсмической активности как функции времени в пределах очага сильнейшего землетрясения, в соответствии с представлениями сейсмического цикла, имеет вид δ -функции: в течение небольшого интервала (много меньше продолжительности сейсмического цикла или квазипериода) в момент сильнейшего толчка сейсмическая активность в его очаге увеличивается на много порядков. Тогда, в соответствии с соотношением (4.16), для величины сейсмической активности $A(x, t)$ в пределах окраины Тихого океана, как функции пространственной координаты и времени, справедливо соотношение:

$$A(x, t) = \Phi(ax \pm bt), (4.17)$$

где Φ – произвольная функция.

Цикличность ($\Phi \sim \exp(i\omega t)$) и квазипериодичность ($\Phi \sim \exp(ix\omega_{sp}/U)$) сейсмического процесса накладывают следующие условия на функцию Φ :

$$\Phi \sim \exp[i(\omega t \pm x\omega_{sp}/U)], a = i\omega_{sp}/U, b = i\omega_t, V = U\omega_t/\omega_{sp}, (4.18)$$

где $\omega_t = 2\pi/T_t$, $\omega_{sp} = 2\pi/T_{sp}$, U – скорость волны. Из соотношений (4.3) и (4.9) видно, что значения «пространственного» T_{sp} (сейсмический цикл) и «временного» T_t периодов сейсмического процесса близки друг другу: $T_{sp} = 190 \pm 40 \approx T_t = 230 \pm 60$ (лет), откуда из соотношения (4.18) получаем равенство скоростей $V \approx U$.

Таким образом, полученные данные показывают, что взаимодействие в классе сильнейших землетрясений, по сути, является волновым процессом, что проявляется в виде миграции их очагов в пространстве и во времени.

Имеющиеся данные показывают, что аналогичный вывод на меньшем масштабном уровне справедлив и для класса сильных землетрясений.

Прогноз времени землетрясений и мест расположения их очагов (Викулин, 1992 а, б). Закономерное распределение землетрясений в пространстве-времени позволяет предложить и физически и математически прозрачную методику прогноза времени толчков и мест расположения их очагов. По-видимому, впервые на возможность построения прогноза землетрясений, в основе которого заложены представления об их миграции, указал М.Бот (1968). Очень близко к разработке такой методики подошел К.Моги (1988), показав, что сильнейшие землетрясения мигрируют вдоль окраины Тихого океана (рис. 4.7). Однако К. Моги не смог довести свои исследования до методических рекомендаций, по-видимому, вследствие отсутствия в то время физических механизмов, объясняющих волновую природу миграции. С использованием выявленных миграционных закономерностей автором были построены схемы долгосрочного прогноза времени землетрясений и мест расположения их очагов (рис. 4.8). При расчете прогнозных схем использовались данные о глобальной и локальной миграции. Наряду с данными о миграции могут быть использованы также и данные о повторяемости землетрясений в пределах отдельно взятых локальных регионов (сейсмофокальных блоков). В основе методики, как изначально и предполагалось М. Ботом, заложены

известные данные о положении и временах первых событий в цепочках и о направлении и величинах скоростей миграции.

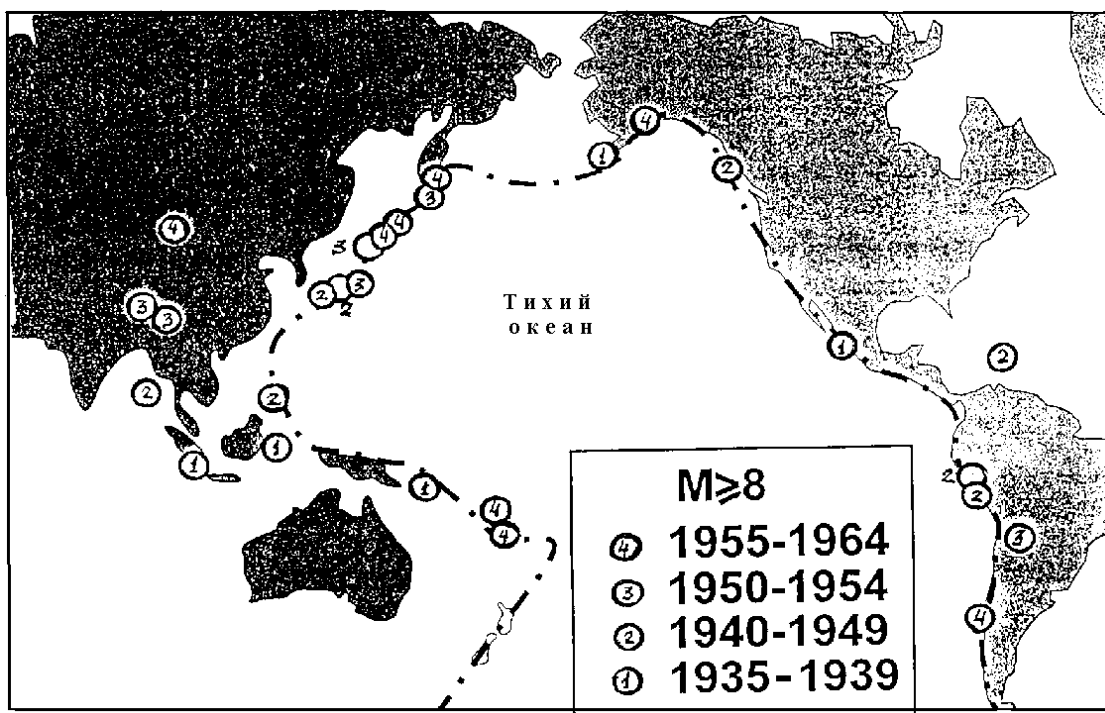


Рис. 4.7. Карта, иллюстрирующая миграцию эпицентров землетрясений 1935–1964 гг с $M \geq 8.0$ вдоль окрестности Тихого океана.

Прогнозная карта ожидаемых сильнейших ($M \geq 7,6$) землетрясений для Камчатки, построенная по описанной выше методике, приведена на рис. 4.8.

Механическая модель сейсмического процесса. Сейсмические данные. Миграционные цепочки, построенные по сильнейшим землетрясениям северо-западной части Тихого океана в XX веке (рис. 4.1), в соответствии с данными К. Mogi, представленными на рис. 4.3, могут быть продолжены на всю окраину Тихого океана ($R \sim (5-10) \cdot 10^3$ км).

Миграционный характер австралийской сейсмичности ($R \sim (0,5-1) \cdot 10^3$ км) иллюстрируется данными, представленными на рис. 4.9.

«Колебательный» характер сейсмичности на меньшем масштабном уровне в пределах одного сейсмофокального блока - очага Кроноцкого 5.12.1997 землетрясения ($R \sim 10^2$ км) - иллюстрируется данными, представленными на рис. 4.3. На еще меньшем масштабном уровне ($R \sim (1-5) \cdot 10$ км) колебательно – вращательный характер сейсмичности иллюстрируется данными, представленными на рис. 4.10.

Тектонические данные. Строение островных дуг и континентальных окраин Тихого океана указывает на то, что блоки, слагающие верхнюю часть сейсмофокальной зоны, вращаются. Так в работе (Daly, 1989) показано, что такие блоки в районе тихоокеанского побережья Эквадора вращаются по часовой стрелке. Вращение сейсмофокальных блоков центральной части Алеутской дуги также по часовой стрелке, как полагается в работе (Геологическая..., 1989), по-видимому, началось в конце миоцена - плиоцене и обусловлено наличием сдвиговой компоненты при косом поддвиге тихоокеанской плиты под северо-американскую плиту. При этом значение угла поворота для разных блоков лежат в пределах $0 - 23^\circ$ (Geist, Childs, Scholl, 1988).

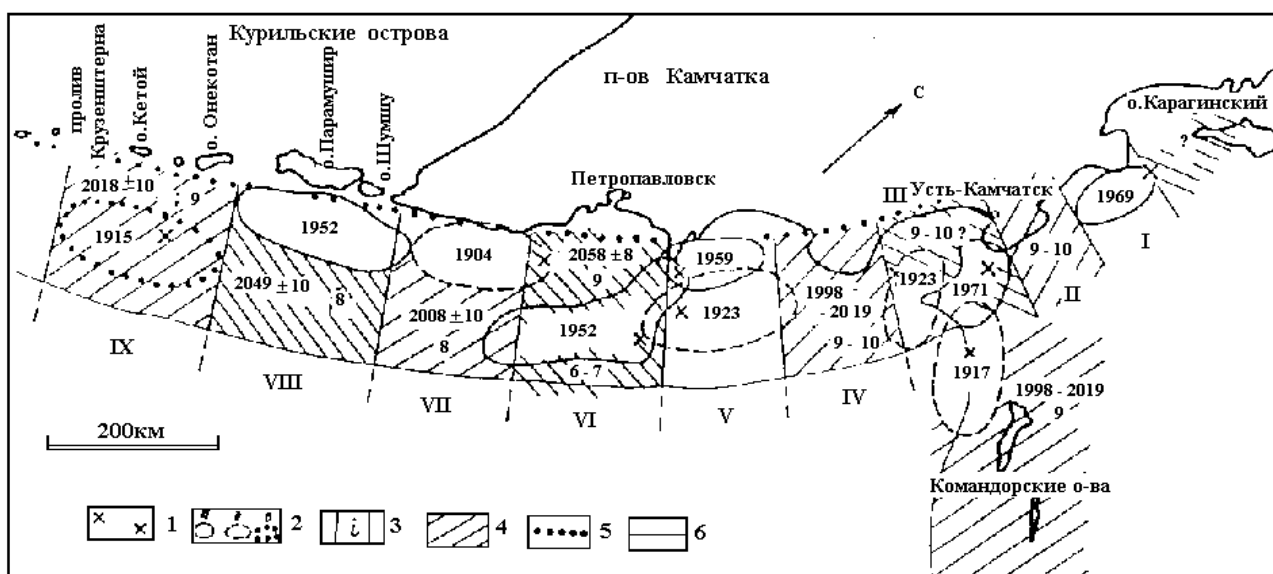


Рис. 4.8. Прогнозная карта расположения очагов сильнейших Камчатских и северо-Курильских землетрясений в будущем. 1 – эпицентры сильнейших землетрясений; 2 – уверенные (а), менее уверенные (б) и вероятные (в) границы очаговых областей сильнейших землетрясений XX в.; цифра обозначает год сильнейшего землетрясения; 3 – границы между блоками сейсмофокальной зоны, I = I – IX; 4 – места вероятного расположения очагов сильнейших землетрясений в будущем; цифрами обозначены: год ожидаемого землетрясения, временной интервал и максимальное значение балльности на берегу при землетрясении; 5 – западная граница сейсмофокальной зоны; 6 – ось глубоководного желоба.

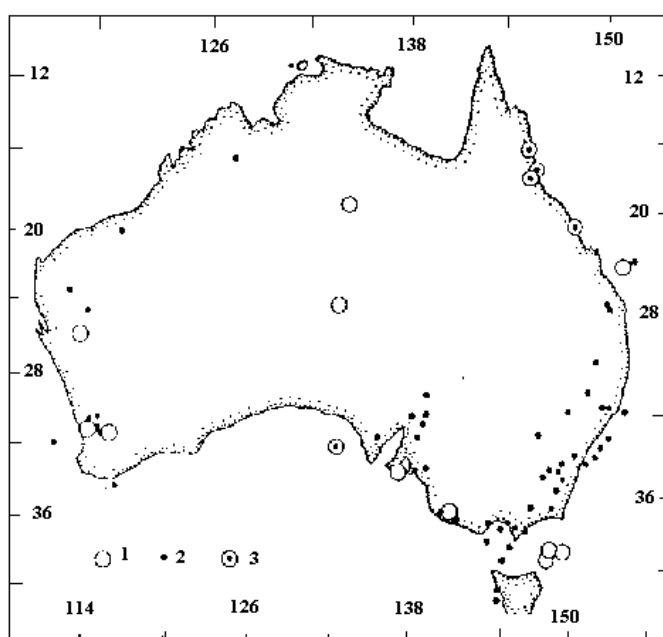


Рис. 4.9 а. Карта эпицентров сильных австралийских землетрясений в 1801 – 1989 гг. 1, 2 – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ и $4.5 \leq M < 6.0$ соответственно; 3 – эпицентры землетрясений с $M < 4.5$ в северо-восточной части материка.

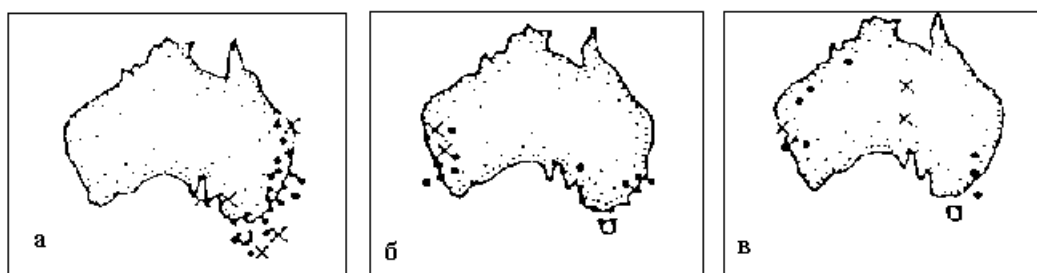


Рис. 4.9 б. Распределение эпицентров австралийских землетрясений с $M \geq 5.0$ в отрезки времени: а – 1801 – 1935 г; б – 1936 – 1973 г; в – 1974 – 1989 г.

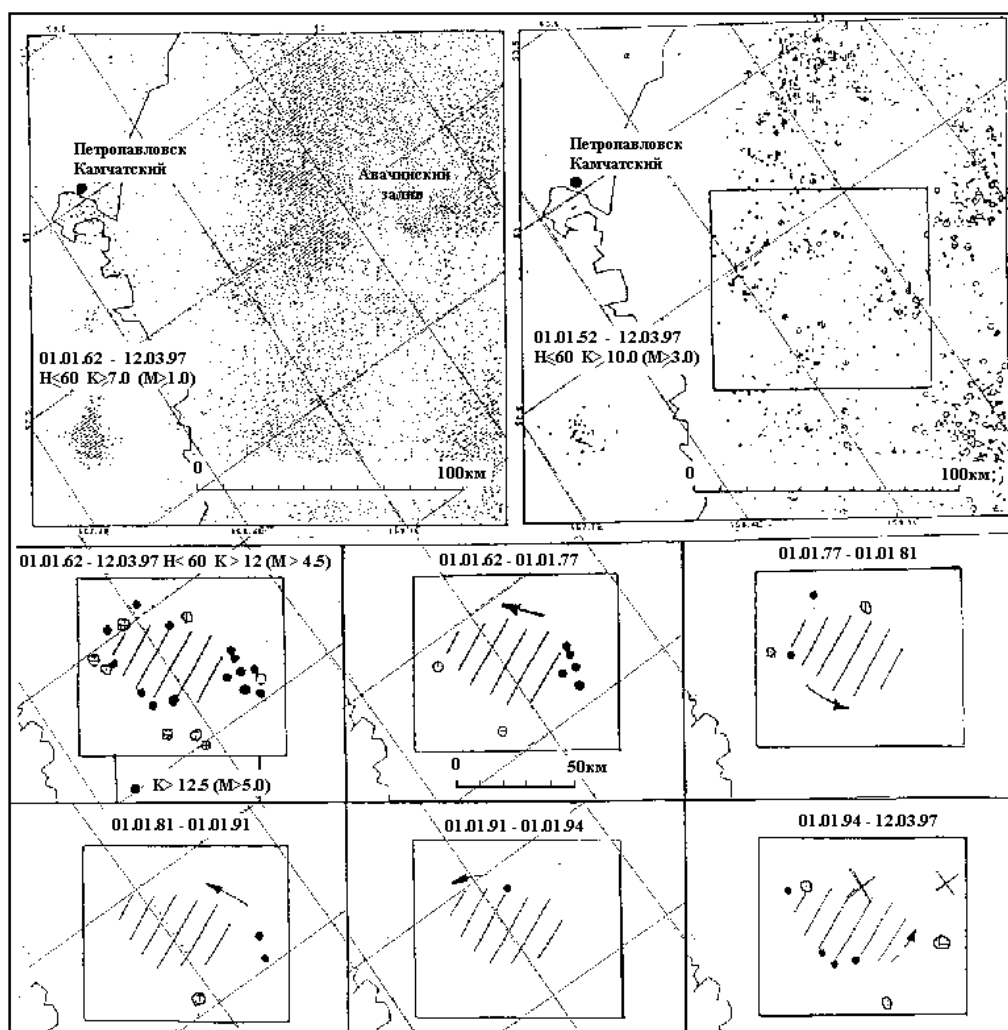


Рис. 4.10. Сейсмичность Авачинского залива (Камчатка) по данным детальных инструментальных сейсмологических наблюдений 1962 – 12.03.1997 гг. В юго-западной части залива выделяется сейсмическая по $K \geq 10.0 - 11.0$ ($M \geq 3.0 - 4.0$) дыра, вдоль границы которой имеет место «кольцевая» миграция эпицентров сильных ($K \geq 12.0$, $M \geq 4.5$) землетрясений, направление миграции обозначено стрелками. Крестами отмечены эпицентры двух наиболее сильных ($K=14.0-15.0$, $M=6.0-7.0$) землетрясений роя, происшедшего 07 - 08.03.1999 г. Эпицентры сильных землетрясений 1999г. находятся в местах, соответствующих «кольцевой» миграции.

Механизм вращения геологических блоков вблизи разлома Сан Андреас обсуждался в (Nur, Ron, Scotti, 1986).

Видим, что строение верхней части сейсмофокальной зоны допускает выполнение необходимых условий, при которых повороты слагающих ее блоков становится вполне возможным.

Геодезические данные. Анализ данных геодезических наблюдений последних 80 лет показывает, что о. Хоккайдо и другие районы японских островов, захваченные вихревыми структурами, центры которых располагаются вблизи залива Сагами (центральная часть о.Хонсю) и о.Сикоку, включая расположенные рядом о.Кюсю и юго-западную часть о.Хонсю, вращаются по часовой стрелке (Рикитакэ, 1970; Hashimoto, Tada, 1988).

Проведенные комплексные геофизические данные указывают на существование на разных масштабных уровнях одной общей особенности у сейсмотектонического процесса – наличие вращательной (вихревой) компоненты. Этот вывод позволяет высказать гипотезу относительно природы достаточно сильных землетрясений. А именно (Викулин, 1994): основой механизма такого землетрясения является вращательное движение (поворот).

Ротационная модель сейсмического процесса. Известные тектонические гипотезы, основанные на ротационном режиме Земли (Тяпкин, 1998). Исходные физические данные, постановка задачи, решение задачи, оценки; следствия модели: дальное действие и землетрясения-дуплеты, спектр волн миграции землетрясений, природа нутации полюса Земли, ротационная модель очага землетрясения, ротационная тектоника Земли (введение в проблему) (Викулин, 2003). Вывод о вращательном движении блоков, упруго связанных с окружающей их средой, приводит к задаче о поле упругих напряжений, возникающих в результате такого движения. В физике твердого тела роль и влияние ротационной компоненты уже достаточно полно исследованы (Владимиров, Романов, 1986; Лихачев, Волков, Шубегов, 1986; Лихачев, Панин, Засимчук и др., 1989). В геофизических же процессах, насколько нам известно, задача в такой постановке раньше не рассматривалась. Однако прежде чем рассматривать «локальную» задачу о поле напряжений, возникающем вокруг поворачивающегося отдельно взятого блока, имеет смысл провести обзор работ по «глобальным» полям напряжений, возникающих в Земле вследствие ее вращения.

Известные тектонические гипотезы, основанные на ротационном режиме Земли (Тяпкин, 1998; с. 181-183). Первые предложения использования в астрономии векового замедления вращения Земли для объяснения ее деформаций были высказаны еще в конце XIX – начале XX веков и связаны с именами Дж. Дарвина, Л.С. Лейбензона и др. Подробное описание этих предложений можно найти в монографии (Личков, 1960). Использование данных о перемещении оси вращения (полюсов) относительно поверхности Земли для объяснения деформаций тектоносферы относятся к более позднему времени. Важнейшие работы в этой области принадлежат F. Vening Meinez (1944) и A. Scheidegger (1958).

В настоящее время наибольшее распространение имеет ротационная гипотеза структурообразования, в основе которой лежит изменение угловой скорости вращения Земли. Определенный вклад в ее развитие внесли Л.С. Лейбензон (1965), В.А. Цареградский (1963), Г.Н. Каттерфельд (1962) и особенно М.В. Стовас (1975). Суть развиваемой ими ротационной гипотезы заключается в следующем. Изменение угловой скорости вращения Земли должно приводить к изменению ее фигуры равновесия (геоизостазии). В частности, в результате векового замедления вращения уменьшается сжатие Земли, вследствие чего полярные области поднимаются, а экваториальные –

сопряжено опускаются. Границами этих областей являются параллели $\approx 35^0$ (критические).

Разрядка указанных напряжений, по утверждению (Лейбензон, 1965), должна происходить «этапами, прерывисто». В этой работе вычислена величина необходимого удлинения суток для достижения напряжений в тектоносфере, соответствующих пределу упругости, оказавшейся равной 11 мин. Весьма примечательно, что такое удлинение суток соответствует интервалу времени порядка 35-40 млн. лет, т.е. известному тектоническому циклу второго порядка. В результате разрядки напряжений возникают линейные тектонические структуры, в частности, разломы тектоносферы преимущественно широтно-меридионального направления. Это подтверждается известными фактическими геологическими данными, что свидетельствует о реальности возникновения такого рода напряжений.

Можно ли считать эти напряжения единственными или главным источником сил, необходимых для формирования структур в тектоносфере? Наверное, нет. Поскольку разрядка подобных напряжений не может объяснить возникновения многих достаточно хорошо изученных структур различных диагональных направлений. Для объяснения возникновения такого рода структур можно попытаться совместить описанный выше эффект с перемещением оси (полюсов) вращения Земли относительно ее поверхности (Тяпкин, Стовас, 1968; Чебаненко, 1972). При одновременном изменении параметров ротационного режима Земли (угловой скорости и положения оси вращения) предполагается, что замедление вращения Земли приводит к возникновению напряжений в тектоносфере.

В процессе непрерывного изменения обоих параметров напряжения в тектоносфере достигают предела упругости, в результате чего происходит их разрядка, выражающаяся в образовании разломов тектоносферы и сопутствующих им геологических явлений. Такая модель тектонического процесса должна приводить к возникновению линейных структур, располагающихся вдоль критических палеоширот и палеомеридианов, соответствующих эпохе разрядки напряжений. По отношению к географической сетке эти структуры должны быть ориентированы под определенными углами. Последующие исследования привели к заключению, что такая модель тектонического процесса является слишком упрощенной.

Г.Д. Хизаношвили (1960) и А.В. Солнцев (1976) предложили использовать для объяснения геологических явлений разрядку напряжений, возникающих в результате перемещения оси (полюсов) вращения Земли. Показано, что такие напряжения так же, как и напряжения, обусловленные изменением угловой скорости вращения Земли, несомненно, имеют место. Вопрос о соотношении вкладов этих напряжений в формирование структур тектоносферы пока остается открытым. Он может быть решен только аналитически для соответствующих упрощенным моделям Земли. Фактические геологические данные свидетельствуют о том, что значительную роль в этом играет тектонический фактор, обусловленный перемещением полюсов Земли. Это обстоятельство послужило одной из предпосылок развития новой ротационной гипотезы структурообразования, в основу которой положено представление о возникновении напряжений за счет изменения положения оси вращения Земли относительно ее тела.

Исходные физические данные модели (Викулин, 2003). Предпосылками для включения инерционных эффектов, связанных с вращением Земли, в перечень основных параметров, определяющих течение сеймотектонического процесса, являются следующие физические данные.

Во-первых. Скорость пластического течения для твердых тел, как известно (Хирт, Лоте, 1972), пропорциональна экспоненте от сдвигового напряжения. Именно такое соотношение между скоростью пластического течения и величиной сдвигового напряжения и является одной из главных причин сильной локализации пластической

деформации. При этом небольшое увеличение напряжения приводит к росту скорости пластического течения в 10 - 100 и более раз.

Именно такой механизм течения реализуется при тектонических движениях. Действительно, при движении тектонические плиты, как панцирь покрывающие поверхность всей планеты, друг относительно друга смещаются как упругие целые образования, внутри которых отсутствуют пластические деформации. Аккомодационный слой, в пределах которого пластическая деформация оказывается достаточно большой, заключен лишь в пределах узких зон - поясах, в которых происходят землетрясения (рис. 3.1). При таком механизме соприкосновения плит упругие напряжения, появляющиеся из-за противодействия движению, быстро снижаются с удалением от их краев.

Во-вторых, зона локализации пластической деформации может не быть однородной. Экспериментальные данные показывают, что при пластической деформации образца некоторые его объемы могут двигаться как целые и, в частности, вращаться. Например, экспериментально установлено (Панин, Гиряев, Лихачев, 1984; Владимиров, Романов, 1986), что при растяжении поликристаллических образцов в области интенсивных пластических деформаций некоторые зерна поворачиваются на десятки и более градусов как целые без пластической деформации внутри. При этом установлено, что «ротации для кристаллической решетки являются столь же типичными, как и турбулентное течение для жидкости» (Панин, Гиряев, Лихачев, 1984). Вокруг таких зерен существует тонкий аккомодационный слой, в котором происходит пластическая деформация. При этом сплошность образца не нарушается, и средняя величина пластической деформации составляет несколько процентов. В определенных случаях такой поворот некоторых объемов как целых с достаточно узкой зоной высокой пластической деформации по краям становится энергетически более выгодным, чем равномерное деформирование всего образца. В силу малости размеров зерен, инерционные эффекты, связанные с их вращениями, чрезвычайно малы и в лабораторных экспериментах не отмечены.

Сейсмофокальная зона, в пределах которой осуществляется межплитовое пластическое течение на глубинах $H > 70$ км, представляет собою тонкий слой, падающий под материк под некоторым углом (рис. 3.2). В верхней своей части ($H < 70 - 100$ км), в пределах которой происходит большая часть землетрясений, и в том числе практически все сильнейшие, сейсмофокальная зона имеет блоковое (неоднородное) строение. Линейные размеры очагов сильнейших землетрясений - блоков, как можно видеть из данных, представленных на рис. 4.1, 4.2, 4.5 и 4.8, в плане составляют 50 - 200 км и 100 - 1000 км вкрест и вдоль сейсмофокальной зоны соответственно. При таких параметрах инерционные эффекты, вызванные вращением Земли, могут быть весьма значительными.

В-третьих. Инерционные силы, приводящие к повороту (вращению) относятся к объемным силам, в отличие от упругих сил, которые, по сути, являются поверхностными. Это означает, что при вращении образца напряжения, созданные внутри него в результате поворота его некоторых частей, нельзя релаксировать за счет пластической деформации. Для релаксации таких напряжений весь образец необходимо соответствующим образом поворачивать как целое. Эти данные указывают на преимущества ротационного способа накопления напряжений перед «обычным» способом, соответствующим требованиям теории упругой отдачи.

Действительно, период повторяемости сильнейших тихоокеанских землетрясений в пределах одного блока сейсмофокальной зоны, как видно из данных табл. 4.1, достаточно продолжительный, порядка 100 лет. Температура вещества, слагающего очаг землетрясения, велика: на глубинах в десятки километров она достигает сотен градусов (см. раздел VIII). При такой температуре накопление напряжений в очаге землетрясения «обычным» способом, вследствие их релаксации, может быть сильно затруднено. Инерционные же напряжения, которые могут возникнуть вследствие вращения Земли, как отмечалось выше, релаксировать за счет пластической деформации невозможно.

В-четвертых, исследование дислокационных моделей механизмов очагов некоторых сильнейших землетрясений показало их плохое соответствие модели плоской бесконечной дислокации. Так, например, механизмы очагов Калифорнийского 1906, $M=8$ и Аляскинского 1964, $M=8,3$ землетрясений наилучшим образом согласуются с сейсмологическими и геодезическими данными в рамках модели винтовой дислокации (Shamsi, Stacy, 1969).

Таким образом, в пределах сейсмических поясов Земли существуют условия, при которых может быть реализован ротационный механизм накопления деформаций. И такой механизм, как показал проведенный анализ, может оказаться более реальным, нежели общепринятая в настоящее время теория упругой отдачи.

Приведенные выше данные позволяют модель, в основе которой заложены инерционные эффекты, связанные с вращением тела, применить для описания закономерностей сейсмического процесса. В качестве вращающегося тела рассмотрим Землю, в качестве элементарных поворачивающихся объемов - блоки земной коры, слагающие сейсмические пояса.

Постановка задачи. Рассчитаем поле упругих напряжений, возникающих вокруг поворачивающегося за счет своих внутренних источников макрообъема V , являющегося частью твердого тела, вращающегося с угловой скоростью Ω .

При рассмотрении природы возникновения поля упругих напряжений в твердом теле вокруг поворачивающегося объема (блока) V необходимо учесть два обстоятельства, имеющих принципиальное значение.

Во-первых. Инерционные силы, вызванные вращением тела, всегда связаны с элементом конечного объема. Такие силы, в принципе, нельзя определить для произвольно малого объема, как это, например, делается для силы тяжести и других подобных сил. Это связано с тем, что вращательные инерционные эффекты зависят не только от массы блока, но и от ее распределения по его объему, т.е. от момента инерции I , который для точки всегда равен нулю. Момент импульса $\mathbf{M}$ блока V запишется в виде $\mathbf{M} = I \cdot \Omega$, где Ω - угловая скорость вращения объема V , равная скорости вращения тела и направленная параллельно оси его вращения.

Во-вторых. Поворот блока V происходит во вращающемся теле; связанная с ним система координат является неинерциальной. Как известно, в таких системах появляются дополнительные силы, как, например, центробежная и сила Кориолиса. Математическое описание процессов, происходящих в неинерциальных системах, в значительной степени зависит от выбора системы координат.

При этих условиях механизм появления упругих напряжений, возникающих во вращающемся твердом теле при повороте некоего объема V внутри него, можно определить следующим образом.

До поворота блок V имел момент $\mathbf{M}$, который был направлен вдоль оси Z , параллельной оси вращения тела. В результате поворота блок V поворачивается в некой плоскости на угол β относительно оси вращения тела. Если бы блок V не был бы связан с окружающей его средой, то при его повороте момент $\mathbf{M}$ изменил бы свое направление; при этом в пространстве вокруг блока никаких изменений не произошло бы. Однако в реальном случае, когда объем V упруго «сцеплен» с окружающей его средой, изменение направления момента блока приводит к появлению вокруг него упругих напряжений, которые в силу законов механики должны характеризоваться соответствующим моментом силы.

Решение задачи проведем в три этапа.

1. Рассмотрим две системы координат, которые повернуты друг относительно друга вокруг общей оси Y на угол β . Ось Z первой (исходной) системы координат параллельна оси вращения тела и направлена от южного полюса к северному, ось

$\tilde{Z}$ второй системы - параллельна моменту импульса блока V после его поворота на угол β . Начала обеих систем координат находятся в центре масс области V (рис. 4.11).

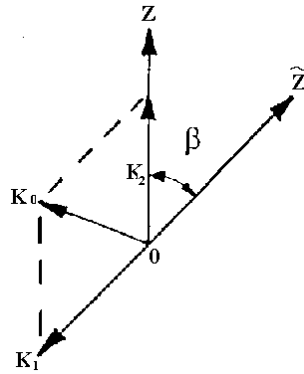


Рис. 4.11. Две системы координат, повернутых относительно общей оси на угол β . Ось Z параллельна оси вращения тела и направлена от южного полюса к северному.

Для определения величины упругих напряжений, возникающих вокруг поворачивающегося блока V, применим следующий мысленный эксперимент.

Сначала останавливаем вращение объема V, прикладывая упругие напряжения σ_1 с моментом силы $\mathbf{K}_1$, направленным в отрицательном направлении оси $\tilde{Z}$. При этом считаем, что кинетическая энергия вращения области V полностью переходит в потенциальную энергию упругих напряжений σ_1 . Затем, прикладывая упругие напряжения σ_2 с моментом силы $\mathbf{K}_2$, направленным вдоль оси Z, блок V опять раскручиваем до скорости вращения тела (рис. 4.11).

Другими словами, когда тормозим область V, ее кинетическая энергия вращения

$$W = 1/2 I \Omega^2 \quad (4.19)$$

переходит в упругую энергию, определяемую тензором напряжений σ_1 , а когда раскручиваем - мы создаем точно такую же кинетическую энергию, но за счет упругих напряжений σ_2 .

Рассмотрим случай, когда объем V представляет собою однородный шар, момент инерции которого, как известно, не зависит от выбора оси вращения. Тогда равенство кинетической и потенциальной энергий приводит к соотношению $|\mathbf{K}_1| = |\mathbf{K}_2|$. При этом разность этих векторов и является искомым моментом силы $\mathbf{K}_0$, возникающим в результате поворота блока V в неинерциальной системе: $\mathbf{K}_0 = \mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1$. Его модуль получаем из теоремы косинусов:

$$|\mathbf{K}_0| = 2 |\mathbf{K}_1| \sin \beta / 2. \quad (4.20)$$

2. Искомое поле упругих деформаций $\mathbf{U}$ удовлетворяет уравнению упругого равновесия:

$$\text{grad div } \mathbf{U} - a \cdot \text{rot rot } \mathbf{U} = 0, \quad (4.21)$$

с нулевыми граничными условиями на бесконечности:

$$\mathbf{U} \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty, \quad (4.22)$$

с действующей на объем V силой, равной нулю:

$$\mathbf{F}_i = \oint \sigma_{ij} dS_j, \quad (4.23)$$

и моментом силы, не зависящим от размера блока V:

$$\mathbf{K}_i = \oint n_k e_{ikl} \sigma_{lj} dS_j = 0, \quad (4.24)$$

где $a = (1 - 2\nu) / (2(1 - \nu))$, ν - коэффициент Пуассона, R_0 - радиус области V.

Решением задачи (4.21) - (4.24) в сферической системе координат (r, φ, υ) с началом r = 0 в центре шарового объема V в области r ≥ R₀, являются поля смещений U и напряжений σ

$$U_r = U_\theta = 0, U_\varphi = -3Ar^2 \sin \nu, \quad (4.25)$$

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 3/2 Ar^3 \sin \nu, \quad (4.26)$$

где G - модуль сдвига, A - константа, которая будет определена ниже. Остальные компоненты тензора напряжений равны нулю.

Подставляя (4.26) в (4.24) для момента силы, который создает найденное упругое поле, получаем выражение:

$$K_{1z} = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sigma_{r\varphi} r^3 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = 3\pi^2 AG. \quad (4.27)$$

Остальные компоненты момента силы, вследствие выбора системы координат, равны нулю K_{1x} = K_{1y} = 0 (рис. 4.9).

3. Плотность энергии упругих деформаций записывается следующим образом: $W = \sum \{ \lambda / 2 (\varepsilon_{ij} \delta_{ij})^2 + G \varepsilon_{ij}^2 \}$, где λ - модуль всестороннего сжатия, ε_{ij} - деформация и δ_{ij} - символ Кронекера. Интегрируя это выражение по всему объему тела и считая его несжимаемым, получим следующее выражение для величины упругой энергии, созданной моментом силы **K**₁:

$$W = 9/2 A^2 G \int_{R_0}^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^{-4} \sin \vartheta dr d\vartheta d\varphi = 4\pi A^2 G R_0^{-3}. \quad (4.28)$$

Приравнивая полученную упругую энергию кинетической (4.19) и учитывая, что момент инерции шара равен I = 8/15 π ρ R₀⁵, где ρ - плотность вещества, получаем следующее выражение для величины искомой константы A:

$$A = R_0^4 \Omega \sqrt{\frac{\rho}{15G}}. \quad (4.29)$$

Таким образом, с учетом (4.20) для искомых решений окончательно получаем следующие соотношения. Для момента силы упругого поля вокруг блока, направленного перпендикулярно плоскости его поворота:

$$K = -6\pi^2 \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \beta / 2, \quad (4.30)$$

величины упругой энергии:

$$W = 16/15 \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta / 2, \quad (4.31)$$

поля смещений:

$$U_r = U_\theta = 0, U_\varphi = -3\Omega R_0^4 r^{-2} \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \vartheta \sin \beta / 2 \quad (4.32)$$

и напряжений:

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 3/2 \Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \vartheta \sin \beta / 2. \quad (4.33)$$

Появление в соотношениях (4.30) - (4.33) множителя sin β/2, в соответствии с теоремой косинусов, по сути, является тривиальным «геометрическим» следствием решаемой задачи.

Как видим, полученные решения задачи о поле упругих напряжений вокруг поворачивающегося объема V действительно определяются величиной угловой скорости, с которой вращается тело, что и объясняет название модели, данное ей авторами – ротационная модель.

Следует отметить, что при форме блока, близкой эллипсоидальной или овальной, конечные формулы существенным образом не изменяются; в них, как показывают оценки, появляются коэффициенты порядка единицы.

Оценки. Модельные параметры примем следующими: плотность среды - $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, модуль сдвига - $G = 10^{11} \text{ н/м}^2$, угловая скорость вращения Земли - $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$, радиус элементарного шарового сейсмофокального блока, по объему равновеликого среднему очагу в классе сильнейших курило-камчатских и японских землетрясений, имеющих овальную (эллиптическую) форму - $R_0 = (3/4 \times L/2 \times D/2 \times H)^{1/3} \approx 40 - 100 \text{ км}$. Здесь $L = 150 - 200 \text{ км}$ - протяженность вдоль сейсмофокальной зоны (длина), $D = 75 - 100 \text{ км}$ - «ширина» (размер вкрест зоны) и $H = 50 - 100 \text{ км}$ - «толщина» очага сильнейшего землетрясения - элементарного сейсмофокального блока. При таких значениях модельных величин любые три параметра из четырех: смещение $U \sim 10 \text{ м}$, сброшенное напряжение $\sigma \sim 100 \text{ бар}$, сейсмический момент $M_0 \sim 10^{28-30} \text{ дин-см}$, выделенная сейсмическая энергия $W \sim 10^{16-18} \text{ Дж}$, как легко можно убедиться, автоматически получаются из соотношений (4.30) - (4.33). (Одно из таких значений требуется для определения модельного параметра $\sin\beta/2$). Эти значения достигаются при углах поворота блока по порядку величины равных $\beta_0 \approx 10^{-4} \text{ рад}$. $\approx 10^{-3} \text{ град}$, что при повторяемости сильнейших землетрясений одно в 100 лет соответствует скорости поворота блока, равной 10^{-4} град/год .

Следует отметить, что по порядку величины с примерно такой же скоростью вращается Исландия, протяженность которой, как и «элементарного» сейсмофокального блока, составляет около 200 км. Действительно, в соответствии с вихревой гипотезой, Исландия, вследствие вращения Земли, поворачивается по часовой стрелке; в результате чего в течение нескольких десятков тысяч лет линии трещинных извержений в ее южной части изменили свою ориентацию примерно на 7° с ССВ $25-27^\circ$ в верхнем плейстоцене на ССВ $18-20^\circ$ в послеледниковую эпоху (Мелекесцев, 1979).

Таким образом, проведенные оценки показали, что применение ротационной модели к расчету параметров очага сильнейшего землетрясения физически обосновано. Более того, сама возможность комплексного самосогласованного аналитического описания нескольких физических величин в рамках одной модели без использования дополнительных данных (в том числе, и данных инструментальных сейсмологических наблюдений о параметрах очагов землетрясений) указывает на ее определенные преимущества перед другими моделями очага тектонического землетрясения.

Следствия модели. Дальнодействие и землетрясения - дуплеты (Викулин, Иванчин, 1996, 1997, 1998; Викулин, Чернобай, 1986; Викулин, Викулина, 1986). Для определения величины энергии взаимодействия поворачивающихся блоков воспользуемся известной закономерностью, согласно которой упругая энергия (в рамках закона Гука) пропорциональна квадрату деформации. Тогда, записывая величину деформации какой-либо части твердого тела в виде суммы деформаций, создаваемых в этой части каждым из блоков в отдельности, получим выражение, в котором «перекрестное» слагаемое и определяет величину энергии взаимодействия блоков друг с другом.

Для модели двух блоков полную упругую энергию можно записать в виде:

$$W = G \int (a + b)^2 dV = G \left\{ \int a^2 dV + \int b^2 dV + 2 \int abdV \right\},$$

где a и b - тензоры упругой деформации, созданные в результате поворота первой и второй областями соответственно, интегрирование проводится по всему объему тела. Первые два слагаемые в правой части суть собственные упругие энергии, каждая из которых вычисляется с помощью соотношения (4.20), третье слагаемое и определяет энергию взаимодействия областей

Полагая блоки шаровыми с радиусами R_1 и R_2 , записывая выражение для тензоров a и b через соответствующие им смещения (4.25), подставляя их в выражение для полной упругой энергии с учетом (4.19) и производя вычисления соответствующих интегралов, для энергии взаимодействия двух поворачивающихся областей получим следующее выражение:

$$W_{\text{int}} = 3/2\pi\rho\Omega^2 R_1^4 R_2^4 l^{-3} \cos\phi, \quad (4.34)$$

где ϕ - угол между направлениями моментов сил полей напряжений, создаваемых вокруг каждого из блоков, l – расстояния между их центрами. Для модели двух равновеликих блоков ($R_1 \approx R_2 = R_0$), центры масс которых расположены на расстоянии примерно четырех радиусов ($l = 4R_0$), при принятых выше значениях модельных параметров для энергии взаимодействия блоков из соотношения (4.34), получаем *минимальную* оценку, для случаев параллельной ($\phi = 0$) и антипараллельной ($\phi = \pi$) ориентации блоков близкую энергии, сбрасываемой в очаге сильнейшего землетрясения: $W_{\text{int}} \sim 10^{16-17}$ Дж.

Полученный результат показывает, что согласно ротационной модели энергия взаимодействия двух сейсмофокальных блоков может достигать величины упругой энергии, сбрасываемой при отдельном сильнейшем землетрясении. Другими словами, упругие поля, описывающие взаимодействие блоков в рамках ротационной модели, можно считать дальнедействующими. Действительно, полагая, что отношение величин энергии взаимодействия (4.34) и ротационной энергии (4.31) порядка единицы $W_{\text{int}}/W \approx 1$, для расстояния между такими взаимодействующими блоками получаем:

$$l \approx R_0(\sin\beta/2)^{1/3} \approx 10 \cdot R_0, \quad (4.35)$$

где величина угла поворота блока была принята равной $\beta \approx 10^{-3}$ град., когда в соответствии с соотношениями (4.30) – (4.33) напряжения, согласно теории упругой отдачи, достигают критических значений.

Такое взаимодействие, если оно реализуется в природе, должно приводить к тому, что сильнейшие землетрясения в обоих блоках должны либо происходить одновременно либо не происходить вовсе. Действительно, если в одном из таких блоков накопилась достаточная для сильнейшего землетрясения энергия, то в результате «параллельного» ($\phi=0$) взаимодействия такой же по величине энергией должен обладать и взаимодействующий с ним второй сейсмофокальный блок. В случае же «антипараллельного» ($\phi=\pi$) расположения моментов блоков энергия их взаимодействия, наоборот, компенсирует энергию, накапливаемую в готовящемся очаге. Имеющиеся сейсмологические данные, как нам представляется, подтверждают такой вывод модели. Покажем это.

В сейсмологической практике известны случаи, когда в течение небольшого интервала времени практически одновременно происходят два достаточно сильных землетрясения с близко расположенными очагами - так называемые дуплеты. Сильнейшие землетрясения - дуплеты происходят достаточно редко. В пределах северо-западной окраины Тихого океана нам известны следующие такие события, отмеченные независимо друг от друга разными исследователями на основании анализа макросейсмических данных, данных о цунами и инструментальных сейсмологических наблюдений: 31.1.1605, $M=7,9$ в районе желоба Нанкай (Соловьев, Го, 1974), 4.11.1952, $M=8,5$ в районе Северных Курил - Южной Камчатки (Попов, 1961; Викулин, Чернобай, 1986а); 13.10.1963, $M=8,0$ на Южных Курилах (Викулин, Чернобай, 1986а). Реконструкция сейсмического процесса позволила сделать вывод о том, что землетрясения - дуплеты, близкие тем, которые отмечены в 1605 и 1952 гг., происходили 28.10.1707, $M=8,4$ в пределах желоба Нанкай (Викулин, Викулина, 1989) и 17.10.1737, $M=8,4$ на северных Курилах - южной Камчатке (Викулин, 1992). Кроме того, в работе (Викулин, 1992) было отмечено, что сильнейшие землетрясения - дуплеты на Камчатке, возможно, происходили и в 1790 и 1792 гг. Данные о расположении очагов сильнейших камчатских и нанкайских землетрясений по результатам работ (Викулин, 1990, 1996; Викулин, Викулина, 1989; Викулин, Гусяков, Титов, 1992) представлены на рис. 3.16 и 3.17.

Приведенные данные показывают, что сильнейшие землетрясения - дуплеты редко, но все же происходят. Можно выделить два района - желоб Нанкай и северные Курилы - южная Камчатка, в каждом из которых такие события отмечены, по-видимому, как минимум дважды. При этом, как было показано в работах (Викулин, 1990, 1992; Викулин,

Викулина, 1989), с точки зрения пространственно-временных закономерностей (миграция, не пересечение очагов и повторяемость в одном месте) эти толчки - дуплеты являются вполне «обычными» событиями.

Из данных, представленных на рис. 4.1 и 4.2 также видно, что расстояние между очагами в дуплете примерно равно протяженности очага одного отдельно взятого толчка и составляет $l \approx 4R_0$. По данным японских источников (Соловьев, Го. 1974) два толчка 31.1.1605 г. произошли «практически одновременно». Анализ инструментального сейсмограммного материала показал, что при каждом их событий в 1952 и 1963 гг. толчки происходили с интервалом $\Delta t = 4 - 5$ сек (Викулин, Чернобай, 1986а,б). При этом было отмечено, что второй толчок в каждом дуплете никак не мог быть следствием «перераспределения напряжений после первого толчка», так как скорость передачи «упругой» информации при этом должна была бы существенно превысить значение скорости продольных волн: $\Delta L/\Delta t \approx (20 - 50)$ км/сек $> V_{P, \max} \approx 8 - 10$ км/сек (Викулин, Чернобай, 1986).

Как видим, параметры реальных очагов толчков - дуплетов близки параметрам рассмотренной выше модели двух взаимодействующих блоков. Поэтому фактические данные по сильнейшим землетрясениям - дуплетам, на наш взгляд, подтверждают теоретический вывод ротационной модели о существовании сильного взаимодействия с положительной $(-\pi/2 < \phi < \pi/2)$ энергией.

На существование сильного взаимодействия с отрицательной $(\pi/2 < \phi < 3/2\pi)$ энергией, по-видимому, указывают сейсмологические данные для района центральных Курил протяженностью 250 - 300 км. Действительно, в пределах этого участка сейсмофокальной зоны, заключенного между оо. Симушир и Кетой, в пределах которого не перекрываясь могли бы разместиться 3 - 5 очагов сильнейших землетрясений, в течение последних 200 - 250 лет не было отмечено ни одного такого землетрясения (Новый каталог..., 1977) при их средней для окраины Тихого океана повторяемости в одном месте, равной одному событию в 100 ± 50 лет (табл. 4.1, рис. 4.1, 4.2 и 4.5).

Таким образом, сейсмологические данные и данные о цунами, полученные на материале Камчатки и Японии в течение последних нескольких сотен - тысячи лет, достаточно убедительно доказали, что между очагами сильнейших землетрясений - сейсмофокальными блоками существует дальное действие, которое количественно может быть описано с помощью модельных соотношений (4.34) и (4.35).

Спектр волн миграции землетрясений. Дальнедействующий характер взаимодействия очагов сильнейших землетрясений позволяет перейти к рассмотрению цепочки сейсмофокальных блоков. Рассмотрим случай равномерного движения равновеликих шаровых блоков в цепочке. Уравнение движения блока в такой цепочке можно записать в виде: $I d^2\beta/dt^2 = K_1 + K_2$, где β - угол, на который повернулся блок, $I = 8/15\pi R_0^5$ - его момент инерции, K_1 - момент силы поля упругих напряжений, появляющегося вокруг блока в результате его поворота, значение которого определяется соотношением (4.30), K_2 - момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с остальными блоками цепочки.

Из самых общих соображений ясно, что величина момента K_2 должна быть пропорциональна как упругой энергии рассматриваемого блока, равного $V d^2\beta/dx^2$, так и упругой энергии, соответствующей всем остальным блокам цепочки. В качестве последней выбираем величину, равную средней линейной плотности упругой энергии цепочки блоков W . Здесь $V = 4/3\pi R_0^3$ - объем блока, x - координата вдоль цепочки. Таким образом, момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с другими блоками цепочки, можно записать в виде $K_2 = \zeta W V d^2\beta/dx^2$, где ζ - безразмерный коэффициент, определяющий «однородность» цепочки блоков; в случае нашей задачи положим $\zeta = 1$.

Окончательно, уравнение движения для блока с координатой z в момент времени t можно записать в следующем виде: $\partial^2 \theta / \partial x^2 - c_0^2 \partial^2 \theta / \partial t^2 = k_0^2 \sin \theta$, или в безразмерных координатах $\xi = k_0 x$, $\eta = c_0 k_0 t$:

$$\partial^2 \theta / \partial \xi^2 - \partial^2 \theta / \partial \eta^2 = \sin \theta, \quad (4.36)$$

где $\theta = \beta/2$,

$$k_0^2 = \frac{3\pi\Omega}{WV} \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{4/3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}}, \quad (4.37)$$

$$c_0^2 = \frac{WV}{I}. \quad (4.38)$$

Здесь, как и принято выше, $V = 4/3 \pi R_0^3$ - объем блока, $I = 8/15 \pi \rho R_0^5$ - его момент инерции и W - линейная плотность выделяемой в цепочке упругой энергии, k_0 и c_0 - характерные для сейсмического процесса волновое число и скорость.

Анализ показывает (Викулин, 1990; Николаевский, 1996), что физически оправданным является равенство $\lambda_0 \approx 2R_0$, где $\lambda_0 = 2\pi/k_0$ - длина волны (солитона). В таком случае для характерной скорости сейсмического (сейсмотектонического) процесса получается соотношение:

$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (4.39)$$

подставляя в которое значения параметров модели получаем:

$$c_0 \approx 1 \text{ см/сек.} \quad (4.40)$$

Уравнение (4.36) получило название синус-Гордона (СГ), решениями которого среди прочих, как известно (Давыдов, 1982), являются локализованные волны - солитоны и экситоны (рис. 4.12). При этом скорость U_0 - «предельная» скорость солитонного решения, является характерной скоростью процесса, описываемого СГ уравнением (4.36).

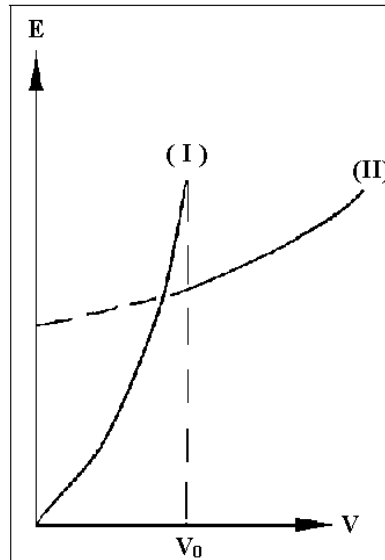


Рис. 4.12. Волновые решения уравнения синус – Гордона: I – солитоны, II – экситоны, V_0 – характерная скорость процесса (Давыдов, 1982).

Из (4.38) – (4.40) следует, что численное значение характерной скорости сейсмического процесса, описываемого уравнением СГ, равно:

$$U_0 = c_0 \approx 1 \text{ см/сек.} \quad (4.41)$$

Известный фактический материал по скоростям миграции сейсмичности вдоль тихоокеанской сейсмофокальной зоны собран в работе (Викулин, 2000) и представлен на рис. 4.13. Из данных, представленных на этом рисунке, видно, что все поле скоростей V в диапазоне семи порядков на плоскости $M_0 - \lg V$, где M_0 – наименьшие значения магнитуд

в анализируемых выборках землетрясений, разбивается на две неперекрывающиеся друг друга области, вытянутые в разных направлениях. Область с большим наклоном (I) представлена данными, характеризующими миграцию в больших пространственно-временных пределах, включая сейсмический пояс в целом – глобальную миграцию; область с меньшим наклоном (II) характеризует миграцию форшоков и афтершоков в очагах землетрясений – локальную миграцию. Полагая, что магнитуда землетрясения с величиной сбрасываемой упругой энергии E определяется соотношением Гутенберга-Рихтера $\lg E[\text{дж}] = 1,8M + 4,4$, представленные на рис. 4.11 зависимости оказались возможным переписать как

$$E_1 \approx V_1^5, V_1 < V_0, \quad (4.42)$$

$$E_2 \approx V_2^2, V_2 > V_0, \quad (4.43)$$

где

$$V_0 = (10^2 - 10^3) \text{ км/год} \approx 1 \text{ см/сек}. \quad (4.44)$$

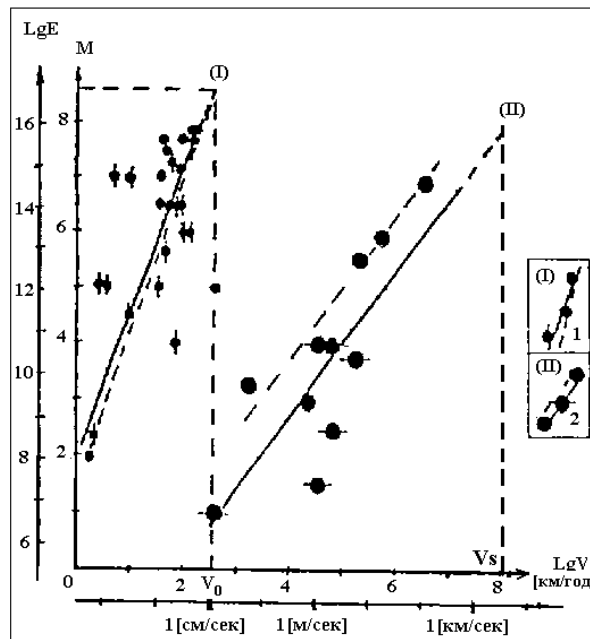


Рис. 4.13. Значения скоростей миграции тихоокеанских землетрясений вдоль сейсмофокальной зоны и определенные по ним зависимости $M_0(V)$. 1,2 – «солитонная» и «экситонная» зависимости; пунктиром проведены такие же зависимости, полученные в работе (Викулин, Иванчин, 1998) с использованием примерно в два раза меньшим количеством данных, не отмеченных «усами»; V_0 – характерная скорость миграции землетрясений; V_1 – предельное значение скорости экситонных решений.

Данные для других сейсмических поясов планеты в совокупности с данными о волновых движениях земной коры соответствуют полученным соотношениям (4.42) – (4.43).

Таким образом, видим, что смысловые равенства

$$U_0 \approx c_0 \approx V_0$$

подтверждают вывод феноменологической модели о том, что миграция очагов землетрясений, по сути, является отражением волновой природы сейсмического процесса, дополняют этот вывод – такой процесс описывается в рамках нелинейного уравнения СГ и его характерная скорость определяется численными равенствами

$$c_0 \approx V_0 \approx 1 \text{ см/сек}.$$

При этом солитонная ветвь решения должна описывать уединенные (тектонические) волны; предельное (при $M_0 \rightarrow M_{\max}$) же экситонное решение должно описывать процесс

выделения упругой энергии при сильнейшем землетрясении, так как соответствующая предельная скорость экситонов V_I удовлетворяет равенству

$$V_I \approx V_S,$$

где $V_S \approx 4$ км/сек - скорость поперечной упругой сейсмической волны в земной коре, которая близка скорости «вспарывания».

Природа нутации полюса Земли (Викулин, Кролевец, 2001). Земля испытывает свободную прецессию. В геофизической литературе ее обычно называют свободной нутацией Эйлера, или по имени ее первооткрывателя в 1891 г. - чандлеровское колебание полюса. Такие колебания возникают в следствие того, что ось вращения Земли слегка наклонена к оси наибольшего момента инерции. Полный момент количества движения планеты остается постоянным и по величине и по направлению, а Земля движется так, что полюс описывает на ее поверхности круг с центром в точке пересечения оси наибольшего момента инерции с поверхностью Земли. Ось вращения Земли практически фиксирована в пространстве и чандлеровские колебания полюса выражаются в периодических вариациях широты с периодом 430 - 435 суток и переменной амплитудой, составляющей, в среднем, $0'',14$ (Манк, Макдональд, 1964). Прецессия полюса происходит в сторону, обратную вращению Земли.

Проблема возбуждения и затухания чандлеровских колебаний является дискуссионной. Большинство исследователей считают, что требуемая добротность чандлеровских колебаний может быть обеспечена за счет процессов, протекающих в ядре и мантии (Манк, Макдональд, 1964; Магницкий, 1965). Согласно (Молоденский, 1953; Парийский, 1963; Магницкий, 1965), данные по колебаниям Чандлера подтверждают и уточняют модель Земли с жидким ядром. В работе (Авсюк, 1996) показывается, что энергетика чандлеровских колебаний может быть объяснена движениями твердого ядра Земли, вызываемыми возмущениями в системе Солнце – Земля – Луна. Однако, обосновать конкретный механизм, использующий взаимосвязь такого рода, будет достаточно сложно по “частотным” соображениям: величина периода такого движения ядра на несколько порядков превышает период чандлеровских колебаний. Некоторые исследователи полагают, что эта проблема не может быть решена за счет процессов, протекающих в мантии (Rochester, Smylie, 1965), атмосфере (Munk, Hassan, 1961) и магнитосфере (Стейси, 1972). Более того, согласно (Стейси, 1972), механизм возбуждения и затухания колебаний полюса до сих пор остается невыясненным. По-видимому, по этой причине в литературе, насколько нам известно, не обсуждался вопрос о взаимосвязи нутации полюса с другими собственными колебаниями планеты.

Пожалуй, у большинства исследователей не вызывает сомнений вопрос о том, что колебания Чандлера “определяются внутренним (по отношению к Земле - авт.) перераспределением момента количества движения; внешние воздействия несущественны” (Стейси, 1972).

В качестве основы одной из возможных моделей, с помощью которой можно было бы объяснить возбуждение чандлеровских колебаний, как и других собственных колебаний планеты, неоднократно предлагалось использовать процессы в очагах сильных землетрясений (Манк, Макдональд, 1964; Стейси, 1972; Chao, Gross, 1995). По-видимому, априори предполагая существование тесной взаимосвязи между этими планетарными явлениями, в атласе (Котляр, Ким, 1994) на графическом представлении временных рядов вариаций параметров вращения Земли представлены и сильные сейсмические события. Однако, последующие исследования и расчеты, выполненные в рамках известных модельных представлений, не подтверждали правильность такого подхода (Манк, Макдональд, 1964; Стейси, 1972).

На наш взгляд, такой на первый взгляд противоречивый ход событий может являться следствием того, что имеет место дефицит механических моделей, описывающих сейсмичность как динамический процесс планетарного масштаба. Покажем, что в рамках

ротационного подхода природа чандлеровских колебаний находит свое естественное объяснение.

Закон дисперсии для экситонных решений уравнения СГ (4.36), как известно (Давыдов, 1976; 1982; Филиппов, 1990), записывается в виде $\omega^2 = \omega_0^2(1 + \lambda_0^2/\lambda^2)$, $\lambda_0 = 2\pi c_0/\omega_0$, где значения длин волн, частот и скоростей определяется из соотношений (4.37) – (4.40). В рамках ротационной модели такой закон дисперсии объясняется сильными нелинейными свойствами цепочки блоков – их дальнедействующим взаимодействием друг с другом, что приводит к существованию моды с частотой ω_0 , реализующейся при большой длине волны (при $\lambda \rightarrow \infty$), когда все блоки цепочки движутся как единое целое, без ее деформации. При этом пружины, моделирующие взаимодействие блоков друг с другом, настолько слабо должны деформироваться, что их как бы и не должно быть вовсе. Такое движение соответствует повороту всего сейсмофокального объема тихоокеанского кольца, как целого, в плоскостях, перпендикулярных сечению кольца, когда $\lambda \rightarrow \infty$ равносильно $\lambda \rightarrow \Lambda$, где $\Lambda \approx 4 \cdot 10^4$ км - протяженность кольца.

Такое вращательное движение сейсмофокального кольца, расположенного в пределах переходной зоны и упруго связанного как с тихоокеанской плитой, так и с окружающими ее материковыми плитами, очевидно, должно сопровождаться вертикальными (относительно поверхности Земли) колебаниями некоего объема тороидальной формы и, следовательно, вследствие изменения формы Земли, должно приводить к прецессии полюса планеты с частотой ω_0 (Викулин, 1997).

Покажем, что прецессия полюса с «нулевой» частотой ω_0 и является колебаниями, соответствующими максимуму на частоте Чандлера f_{ch} .

Будем считать, что: 1) Параметры колеблющейся кольцевой области одинаковы на всем ее протяжении вдоль окраины Тихого океана. 2) Кольцевая область имеет тороидальную форму и расположена в плоскости кольца, имеющего субмеридиональное простираие. 3) Кольцо расположено на расстоянии $R_\perp = R_3 \cos \varphi$ от центра Земли, R_3 – ее радиус, $\varphi \approx 50^\circ$ – половина угла, под которым кольцо “видно” из центра Земли: вдоль меридиана – от Алеутских о-вов - Аляски, $\varphi = 50-60^\circ N$ на севере до линии, соединяющей о.Веллингтон ($\varphi = 50^\circ S$, $\lambda = 75^\circ W$) с о-вами Окленд ($\varphi = 60^\circ S$, $\lambda = 170^\circ E$) на юге; вдоль экватора – от Соломоновых о-вов ($\lambda = 160^\circ E$) на востоке до Центральной Америки ($\lambda = 80^\circ W$) на западе. Тогда изменение момента инерции Земли вследствие таких колебаний составит $\Delta I = \Delta(R_\perp^2 m) = 2R_\perp dm = 2R_3 dm \cos \varphi$, где $d = \delta H$ - амплитуда колебаний кольцевого объема с вертикальным размером H , m - масса колеблющегося объема.

Имеющиеся сейсмологические (с) данные позволяют определить период «нулевых» колебаний сейсмофокального кольца. При протяженности элементарного сейсмофокального блока $L_0 = 150-300$ км ≈ 250 км и предельном значении скорости таких волн $c_0 \approx 200$ км/год (Николаевский 1996; Викулин, 1997) для периода нулевых колебаний всего кольца как целого из соотношений получаем $T_{0,c} \approx 1,2$ года.

Согласно геодезическим (г) данным, полученным на геодинимическом полигоне вблизи Петропавловска-Камчатского в течение непрерывных наблюдений, проводимых уже более двадцати лет (Бахтиаров, Левин, 1991), изменение длин базовых линий l_i происходит с характерным периодом $T_2 = 1-1,5$ года при амплитуде изменения длин линий $\delta_2 = \Delta l_i / l_i = (1 \div 5) \cdot 10^{-6} \approx 3 \cdot 10^{-6}$.

Петропавловск-Камчатский расположен в непосредственной близости от сейсмофокального объема, удаление базовых линий от которого не превышает 100 км. Поэтому полученные в работе (Бахтиаров, Левин, 1991) геодезические данные указывают на то, что амплитуда вертикальных колебаний сейсмофокального объема и прилегающей к нему части вблизи Камчатки с периодом T_2 (4.4), по всей видимости, имеет тот же порядок величины. Тогда полагая, что сечение колеблющегося кольцевого объема тороидальной формы составляет $H \cdot D \approx (300 \div 400) \cdot (300 \div 400)$ км², $m = \rho H D \Delta$, $\rho \approx 3$ г/см³ - плотность, $\delta \approx \delta_2$, для величины изменения момента инерции Земли получим значение ΔI_2

$= 10^{36} - 10^{37} \text{ г}\cdot\text{см}^2$, что, в свою очередь, согласно (Стейси, 1972), должно вызвать нутацию полюса с периодом T_z и с амплитудой $\Delta\alpha_z = \Delta I/(C - A) \approx 10^{-6} \text{ рад}$. Здесь: $C - A = 2,6 \cdot 10^{42} \text{ г}\cdot\text{см}^2$ - разность между полярным и экваториальными моментами инерции Земли.

Таким образом, проведенный анализ показал, что значения модельных и экспериментально измеренных величин близки параметрам, характеризующим колебания Чандлера: $T_{0,c} \approx T_z \approx T_{ch}$, $\Delta\alpha_z \approx \Delta\alpha_{ch}$. Как видим, «нулевые» колебания окраины Тихого океана, имеющие сейсмотектоническую природу, могут рассматриваться в качестве возможной причины, приводящей к нутации полюса Земли на частоте Чандлера. Другими словами, в рамках ротационной модели сейсмического процесса чандлеровское колебание полюса следует считать в большей степени взаимосвязанным с процессами взаимодействия сейсмофокальных блоков в цепочке, чем с процессами в очаге отдельно взятого землетрясения пусть даже с предельной магнитудой и протяженным очагом.

Ротационная модель очага землетрясения. В случае цепочки неравномерно поворачивающихся блоков с трением их движение описывается т.н. возмущенным уравнением СГ (Викулин, Быков, Лунева, 2000):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta + \alpha \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \mu \delta(\xi) \sin \theta, \quad (4.45)$$

где α - коэффициент трения, μ - параметр, характеризующий вынуждающую силу, вызывающую неоднородное вращение блока, $\delta(\xi)$ - дельта функция. В отличие от невозмущенного уравнения (4.36) уравнение (4.45) не имеет аналитического решения.

Уравнение (4.45) решалось численно (Викулин, Быков, Лунева, 1998; 2000) с использованием методов Маклафлина-Скотта и Рунге-Кутты. Начальные условия $x_0 = 0$, $t_0 = 0$, $u_0 = 10^{-10}$ ($u = V/c_0$ - безразмерная скорость) выбирались таким образом, чтобы скорость деформирования не превышала значения $\dot{\theta}_0 \leq 10^{-13} \text{ с}^{-1}$, что близко средней скорости деформации в сейсмоактивных (Радионых, Сизов, Цветков, 1986) и вулканических (Мелекесцев, 1979) областях и заметно отличается от глобальной средней скорости деформации (вращения отдельных блоков) в различных регионах Земли, оцениваемой величиной $5,5 \cdot 10^{-16} \text{ с}^{-1} \approx 1-2 \text{ град/млн. лет}$ (England, Molnar, 1997). Следует отметить, что значение скорости 10^{-13} с^{-1} по порядку величины близко теоретической оценке величины угла $\beta_0 \approx 10^{-2-3} \text{ град.}$, на который в рамках ротационной модели поворачивается «элементарный» сейсмофокальный блок между двумя последовательными во времени сильнейшими землетрясениями с очагами в его пределах.

Все блоки имели шаровую форму одинакового радиуса $R_0 = 10^5 \text{ м}$.

Решения для расстояния X , пройденного волной, величины ее скорости $V = dX/dt$ и величины угловой скорости поворота блока (скорости деформации) $\dot{\theta} = d\theta/dt$ при значениях параметров $\alpha \approx 0,1 - 1$ и $\mu \approx 10^{-4} - 10^{-2}$, близкими для реальных разломов (Кулагин, Маламуд, Старков, Кулагина, 1980), как функции времени приведены на рис. 4. 14. Из данных, приведенных на этом рисунке, видно следующее. Зависимости $X(t)$ представляют собою монотонные функции, имеющие «излом» в точках t_x и затем плавно выходящие на асимптотику X_a . Зависимости $V(t)$ имеют точки t_{Vmax} , в которых скорость волны достигает своего максимального значения V_{max} , после чего плавно выходит на асимптотику V_a . Зависимости $\dot{\theta}(t)$ имеют два четко выраженных максимума $\dot{\theta}_{max1}(t_{\theta max1}) < \dot{\theta}_{max2}(t_{\theta max2})$, которые разделены минимумом $\dot{\theta}_{min}(t_{\theta min}) \ll \dot{\theta}_{max1}$, $t_{\theta max1} < t_{\theta min} < t_{\theta max2}$; затем зависимость $\dot{\theta}(t)$ плавно выходит на асимптотику $\dot{\theta}_a$, $\dot{\theta}_{min} < \dot{\theta}_a < \dot{\theta}_{max1}$.

Анализ численных решений уравнения (4.10) показывает следующее (Викулин, Быков, Лунева, 2000). Во-первых, скорости $V_a \div V_{max} = (10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-2}) \text{ м/с} \approx 1 \div 10^3 \text{ км/год}$ изменяются в значительных пределах и включают весь диапазон, изменения значений скоростей уединенных волн миграции и деформации (рис. 4.9). Во-вторых, значения

максимумов скоростей деформации составляют $(0,02-3,1) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и согласуются с наблюдениями в очагах сильных землетрясений (Кулагин, Маламуд, Старков, Кулагина, 1980). При этом минимальные значения $\dot{\theta}_{\min}$ фиксируются на уровне $10^{-9} - 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, на котором изменение скорости деформирования практически не влияет на прочность горных пород.

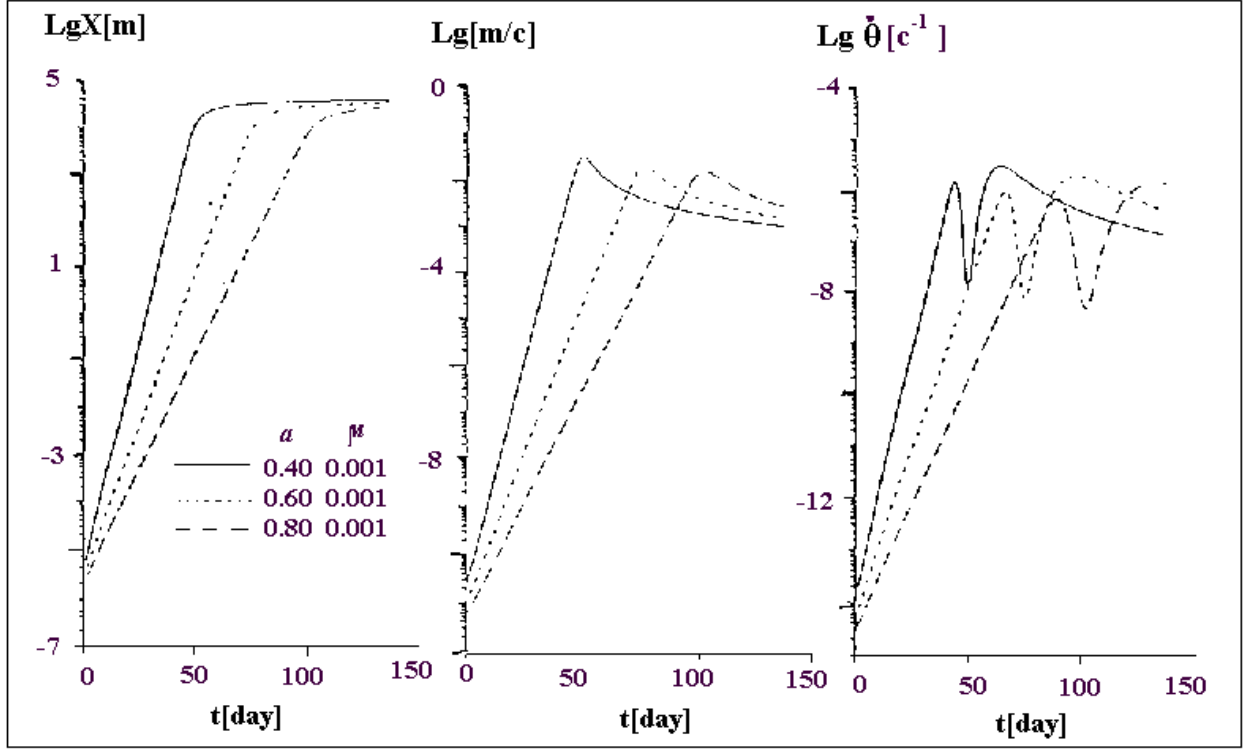


Рис. 4.14. Решения уравнения (3.1.1) для расстояния X , пройденного волной, величины ее скорости $V=dX/dt$ и величины угловой скорости поворота блока (скорости деформации) $\dot{\theta} = d\theta/dt$ при значениях параметров $\alpha \approx 0.1 - 1.0$ и $\mu \approx 10^{-4} - 10^{-2}$.

Как видим, модельные решения не противоречат физическим условиям, определяющим течение сейсмического процесса. Следует отметить, что значения $V_{\max}$ не зависят от величины начальной скорости u_0 и с увеличением последней достигаются при меньших временах $t_{V_{\max}}$.

Из данных, представленных на рис. 4.14, также видим, что в отличие от равномерного движения блоков, описываемого уравнением СГ (4.36), для которого скорости V и $\dot{\theta}$ являются постоянными, решения уравнения (4.45) являются функциями времени. Более того, все три решения $X(t)$, $V(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ обнаруживают такие свойства, которые позволяют установить физически прозрачные взаимосвязи между движениями сейсмофокальных блоков и распространением тектонических волн.

Во-первых, все три зависимости при малых временах изменяются по одному экспоненциальному закону

$$X \approx X_0 e^{at}, V = V_0 e^{at} \approx a X_0 e^{at}, \dot{\theta} = \dot{\theta}_0 e^{at} \quad (4.46)$$

и при больших временах - выходят на асимптотику. Причем выход кривых $V(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ на асимптотику происходит также примерно по одному и тому же закону. Эти данные указывают на то, что распространение тектонической волны, описываемое зависимостями $X(t)$ и $V(t)$, и движение сейсмофокального блока, характеризуемое зависимостью $\dot{\theta}(t)$, по сути, представляют одно явление - процесс их взаимодействия. При этом, значение X_a оказывается близким размеру модельного блока R_0 :

$$X_a \approx 10^5 \text{ м} = R_0, \quad (4.47)$$

что позволяет конкретизировать взаимодействие и интерпретировать его как результат «захвата» тектонической волны сейсмофокальным блоком (Викулин, 1999).

Во-вторых, особые, мини-максные моменты времени для всех трех решений, т.е. моменты, характеризующие как движение блока, так и распространение волны, оказываются близкими друг другу:

$$t_X \approx t_{Vmax} \approx t_{\theta min} = \tau_0 \quad (4.48)$$

и (при постоянных ρ , G , R_0 и Ω для всех блоков цепочки) полностью определяются значениями параметров α и μ :

$$\tau_0 = \tau_0(\alpha, \mu). \quad (4.49)$$

Эти данные позволяют предположить, что взаимодействие тектонической волны с сейсмофокальным блоком в окрестности точки τ_0 имеет такую особенность, которую аналитически можно описать с помощью параметров α и μ .

В-третьих, отношение продолжительностей максимумов $\Delta t_{\theta max1,2}$ и их амплитуд $\dot{\theta}_{max1,2}$ во всем исследуемом диапазоне параметров α и μ не зависят от их значений, т.е. являются постоянными величинами:

$$\Delta t_{\theta max2}/\Delta t_{\theta max1} = 6 \pm 2, \quad (4.50)$$

$$\dot{\theta}_{max2}/\dot{\theta}_{max1} = 2 - 2,5. \quad (4.51)$$

Эти данные позволяют предположить, что первый ($t < \tau_0$) и второй ($t > \tau_0$) максимумы функции $\dot{\theta}(t)$ соответствуют разным стадиям взаимодействия. Назовем их соответственно первой и второй стадиями взаимодействия.

Сейсмический цикл (Викулин, 1999). Из опытов по деформированию горных пород (Соболев, 1993) следует, что «пикообразные выбросы скорости деформаций соответствуют ускорению деформации» и сбросу нагрузки. Таким образом, полученные выше результаты оказывается возможным проинтерпретировать следующим образом: особенностью взаимодействия, по сути, является высвобождение накопленных напряжений или землетрясение, которое происходит в результате локализации неустойчивой деформации в момент времени τ_0 . Следовательно, первой и второй стадией взаимодействия тектонической волны с сейсмофокальным блоком, по сути, должны являться форшоковая и афтершоковая стадии сейсмического цикла. Покажем это.

Особенности распределения форшоков и афтершоков в очагах сильнейших курило-камчатских и японских землетрясений исследовались в работе (Викулин, Викулина, Митякин, 1991; Викулин, 2003). Из этих данных можно видеть, что интервалы времени, в течение которых форшоки и афтершоки происходят относительно сильнейших толчков, соотносятся в пропорции $\Delta t_a/\Delta t_\phi = 69/11 = 6,3$, близкой отношению продолжительностей максимумов скорости деформации $\dot{\theta}$ (4.50). В то же время, при равенстве, в среднем магнитуд наиболее сильных форшоков и афтершоков $M_\phi = M_a$, их числа, а, следовательно, и суммарные сейсмические энергии E_ϕ и E_a , выделяемые в течение форшоковой и афтершоковой стадий в очагах сильнейших землетрясений, соотносятся между собою в пропорции $N_a/N_\phi = E_a/E_\phi = 2,3$, близкой отношению величин максимумов скоростей деформации $\dot{\theta}$ (4.51). На наш взгляд, приведенные данные о форшоках и афтершоках в очагах сильнейших землетрясений и результаты проведенного сравнительного анализа, являются сильным аргументом в пользу сформулированного выше предположения о том, что первый и второй максимумы на кривой $\dot{\theta}(t)$, по сути, соответствуют форшоковой и афтершоковой стадиям сейсмического процесса.

Таким образом, показано, что ротационная модель, в принципе, позволяет количественно описать такие важные свойства сейсмического процесса, как его форшоковую и афтершоковую стадии и заключенную между ними «особенность» - сильнейшее землетрясение.

Ротационная тектоника Земли (введение в проблему). Роль ротационных эффектов. Проблема вращательных движений в плитовой тектонике не нова. Например, в рамках вихревой гипотезы тектоническая история Земли складывалась следующим образом (Мелекесцев, 1979): «Вращением древнего Гондванского циклонического вихря по часовой стрелке возможно объяснить и «разбегание» ... «осколков» Гондванны: Африки, Австралии, Южной Америки Индии. В связи с тем, что Антарктида оказалась в центре вихря, она практически не переместилась по горизонтали, так и оставшись в околополярной области Южного полушария. Вращением вихря хорошо объясняется и аппроксимация древних зон расколов, ограничивавших Антарктиду, логарифмической спиралью, рассчитанной О.Г.Сорохтиным (1974)».

Возможность объяснения в рамках ротационной модели широкого спектра геофизических явлений, данное выше, указывает на то, что поворот блоков земной коры и верхней литосферы за счет внутренних источников - главное допущение ротационной модели, является вполне оправданным. Очевидно, что такой механизм должен иметь место и на других планетах солнечной системы.

Величина угловой скорости вращения планеты, если не во всем, то во многом, определяет характер и интенсивность протекания на ней геофизических процессов. Это утверждение, несомненно, справедливо для верхних слоев планеты - ее гидросферы, атмосферы и прилегающего космического пространства. Действительно, самые быстровращающиеся планеты, период вращения которых составляет около 10 часов, кроме большого количества спутников содержат долгоживущие системы колец (Сатурн) и планетарных атмосферных вихрей (Юпитер). Наиболее крупный из вихрей - Большое красное пятно Юпитера, по размерам значительно превосходящий нашу Землю, наблюдается уже в течение трех столетий и представляет собою дрейфующую уединенную волну (солитон) Россби, свойства которой обусловлены силой Кориолиса (Незлин, 1986).

На Земле также установлено существование долгоживущих движений в экваториальной части мирового океана и топографических вихрей в его прибрежной зоне (Ефимов, Куликов, Рабинович, Файн, 1985; Коняев, Сабинин, 1992; Рогачев, 2003), которые относятся к классу волн Кельвина, Стокса, Россби и др. (Ефимов, Куликов, Рабинович, Файн, 1985) захваченных вращением Земли при наличии неоднородностей рельефа. Интенсивность таких волновых движений на Земле значительно меньше аналогичных на Юпитере.

Данные о какой-либо деятельности циклонического характера на имеющей атмосферу Венере, период вращения которой достаточно велик и составляет 243 дня, нам не известны.

Имеются данные о «вихревом» характере движений, происходящих и в веществе твердой сферы вращающихся планет. К их числу относятся растрескавшаяся «ледяная шапка» на полюсе Марса, рис. 1.8 (период вращения, как и у Земли, около суток) и вскрытые эрозией вулканические породы Ичинского вулкана на Камчатке (рис. 1.4). В обоих случаях наблюдаются «циклонические» структуры, имеющие явно выраженный вид раскручивающихся спиралей. На существование такого же типа движений в твердой мантии Земли указывают и так называемые вихревые структуры (Мелекесцев, 1979; см. так же рис. 1.5, 1.6, 1.8). На планетах, скорость вращения которых много меньше земной, например, Венере и Луне, вихревые структуры отсутствуют (Мелекесцев, 1979; Maps..., 1989).

На «вихревой» характер движения твердой части поверхности планет указывают также данные о выявленных на их поверхностях структурах, имеющих кольцевую форму - так называемые кольцевые структуры. Генетические типы таких структур характерны для основных элементов строения Земли - платформ, щитов, складчатых поясов; их размеры колеблются от сотен метров до 2 - 3 тысяч километров. Большая часть выявленных кольцевых структур возникло в результате тектонического развития Земли в течение

последних 3 млрд лет, остальные, в основном, имеющие сравнительно небольшие размеры, образовались вследствие падения метеоритов. Кольцевые структуры выявлены и на поверхности Меркурия, Марса, на большинстве спутников Юпитера; на Венере и Луне кольцевые структуры развиты в меньшей степени (Мелекесцев, 1979; Кац, Козлов, Полетаев, Сулиди-Кондратьев, 1989) и они, по сути, являются другими образованиями, имеющими метеоритное или вулканическое происхождение (Галкин, 1978; Мелекесцев, 1979; Maps..., 1989).

Имеющиеся данные позволяют предположить, что кольцевые структуры на Земле «группируются» в цепочки и, возможно, в другие более сложные по геометрии образования. К их числу, например, можно отнести цепочку гигантских морфоструктур, протянувшихся вдоль всей восточной окраины Азиатского континента от Индонезии до Аляски (Мелекесцев, 1979; Кулаков, 1986). Вращающиеся согласно геодезическим данным по часовой стрелке о. Хоккайдо (Hashimoto, Tada, 1988) и другие вихревые структуры Японских островов, оси которых расположены вблизи залива Сагами (центральная часть о.Хонсю) и о. Сикоку (Рикитаке, 1970; Мелекесцев, 1979), являются составной частью этого образования. Такая цепочка морфоструктур, в свою очередь, по-видимому, может являться частью другого более протяженного образования, объединяющего кольцевые структуры окраины всего Тихого океана и Альпийско - Гималайской системы до Океании включительно в два пояса, которые ортогонально друг другу протягиваются по поверхности Земли вдоль двух кругов большого радиуса (Шейдеггер, 1987).

На существование волновых движений в пределах земной коры и верхней мантии в зонах стыка плит, как показано выше в настоящей работе, указывают данные о волнах миграции очагов землетрясений, распространяющихся вдоль сейсмически активных поясов и имеющих тектоническую природу. По-видимому, с волновыми движениями такой же природы связаны и долговременные в геологическом смысле повороты «элементарных» (с размерами в первые сотни километров) сейсмофокальных блоков, выявленные на примере Алеутских островов и Эквадора (Geist, Childs, Scholl, 1988; Daly, 1989; Геологическая..., 1989).

Тектоническая жизнь Земли, связанная с относительным перемещением плит вдоль ее поверхности, достаточно активна в течение последних геологических эпох (десятков и, возможно, сотен, миллионов лет). Поступательное движение вдоль поверхности вращающейся планеты всегда (кроме исключительных случаев) имеет ротационную составляющую. Вихревые компоненты, соответствующие всем движущимся тектоническим объектам, как и в случае шельфовых волн в мировом океане (Ефимов, Куликов, Рабинович, Файн, 1985, с. 185), могут «захватываться» волновыми свойствами межплитных зон и «конденсироваться» в их пределах; при этом, в протяженных зонах может происходить их резонансное усиление и перераспределение между разными типами волновых движений, что в свою очередь может приводить в том числе и к перестройке всего тектонического процесса на планете.

По-видимому, в рамках такого механизма, использующего представления о взаимодействующих плитах, движущихся вдоль поверхности вращающейся планеты, следует пытаться находить объяснение закономерностям, как пространственного распределения кольцевых структур, так и их генезиса. На это указывают данные работы (Hashimoto, Tada, 1988), согласно которым вращение о. Хоккайдо ни в какой мере не связано с процессами накопления и высвобождения сейсмической энергии при сильнейших ($M = 7,5 - 8,3$) землетрясениях, очаги которых в 1940 - 1973 гг. располагались вокруг него. В таком случае мощность механизма, обеспечивающего такое взаимное движение плит, проявляющееся в виде цепочек кольцевых морфоструктур, намного (по-видимому, в $1/\eta \sim 10^2 - 10^6$ раз; η - сейсмический коэффициент полезного действия) должна превышать мощность сейсмического процесса. Такой вывод находится в хорошем согласии с данными о движении поверхности коры при землетрясении 1.9.1923 г. с $M=8,2$

в Канто, при котором в пожаре, возникшем в Токио, сгорело около 140 тысяч человек. Действительно, очаг этого землетрясения (рис. 1.7) располагался в центральной части вихревой структуры и в результате подвижек при землетрясении до 4 м и более повернулся на угол $3 \cdot 10^{-5}$ рад (Ли Сы-Гуан, 1958; Мелекесцев, 1979), величина которого близка значению согласно ротационной модели (см. с. 115).

Как видим, ротационный принцип в условиях вращающейся планеты в течение геологических времен может играть исключительно важную роль в ее жизни.

Однако тектоническая оценка ротационного принципа может быть проведена с несколько других позиций.

Рассмотрим проблему поворота макрообъемов упругой литосферы на вращающейся планете с более общих позиций. Как известно, литосферные плиты, как панцирь покрывающие планету, друг относительно друга поворачиваются, что и находит свое отражение в процессах, протекающих в районах сейсмических поясов Земли. Такое движение плит, согласно «ротационного» принципа, вследствие вращения Земли должно приводить к появлению вокруг них (как и вокруг поворачивающихся «элементарных» блоков) полей упругих напряжений, имеющих соответствующим образом направленные моменты сил. По-видимому, именно такие поля напряжений, являющиеся «общими для разных точек земного шара» и приводят к модуляции высокочастотных сейсмических шумов (Рыкунов, Хаврошкин, Циплаков, 1979; Салтыков, 1995). Для решения тектонической задачи в такой постановке, очевидно, необходимо рассмотреть задачу о поле напряжений вокруг поворачивающейся «элементарной» плиты на поверхности вращающегося шара с соответствующими граничными условиями. С физической точки зрения, с учетом полученных в настоящей работе результатов, постановка такой задачи вполне закономерна. Решение такой задачи, по всей видимости, может рассматриваться как теоретическая основа тектонической истории планеты.

О скоростях движения тектонических плит (Викулин, Тверитинова, 2004).
Введение. Исследования сейсмичности позволили установить наличие пропорциональной зависимости между скоростями миграции землетрясений и их магнитудами, т. е. величинами сейсмических энергий, выделяемых в их очагах (рис. 4.13). Эту зависимость оказалось возможным проинтерпретировать в виде ротационнообусловленных волновых движений планетарного масштаба (4.36) – (4.44).

Сейсмичность тесно взаимосвязана с процессами, которые протекают в областях стыка тектонических плит и которые являются прямым результатом их взаимодействия. Закономерности перемещения тектонических плит и их взаимодействия в последнее время все чаще описывают в рамках волновых геодинамических моделей, учитывающих особенности вращения планеты. В блоковой геофизической среде мерой тектонической активности может являться, например, параметр, величина которого определяется скоростями движения плит и их размерами. Поэтому можно предположить, что и значения скоростей геологических процессов, протекающих в пределах границ тектонических плит, пропорциональны их размерам.

Исходные данные. Достаточно полная подборка данных о скоростях геологических процессов приведена в работе (Кукал, 1987). Достаточно подробные данные о параметрах зон субдукции содержатся в работе (Гатинский, Рундквист, Владова и др., 2000). Данные о скоростях раскрытия современных океанов и рифтовых зон Земли по нашим определениям приведены в (Викулин, Тверитинова, 1004). При расчетах нами использовались также данные о протяженностях зон и скоростях спрединга океанического дна, приведенные в работах (Хейрцлер, Диксон, Херрон и др., 1974, с.50; Ле Пишон, 1974, с.95).

Таким образом, при анализе нами использовалась $N_{\Sigma} = 61$ пара данных о протяженностях границ тектонических плит и скоростях геологических процессов, протекающих в их пределах. Все эти данные использовались нами для статистического анализа, который проводился на плоскости с осями логарифм скорости ($\lg V$ [мм/год]) –

логарифм протяженности зоны ($Lg L$ [км]). Прямолинейные зависимости между логарифмами протяженностей зон и логарифмами скоростей $Lg L (\pm s_0) = (a \pm s_a) \cdot Lg V + (b \pm s_b)$ определялись методом наименьших квадратов, где «a» и «b» - коэффициенты, s_0 , s_a , s_b – дисперсии точек и коэффициентов.

Все данные в совокупности, являющиеся своеобразной интегральной мерой тектонической активности процессов субдукции, рифтинга и спрединга, представлены на рис. 4.15. Определенная по ним зависимость $Lg L(Lg V)$ имеет вид:

$$Lg L (\pm 0,42) = (0,11 \pm 0,15) \cdot Lg V + (3,42 \pm 0,26). \quad (4.52)$$

Видно, что точки на рис. 4.15 располагаются в пределах области по форме, близкой к круговой, значение дисперсии s_0 составляет около половины порядка, при этом значение дисперсии s_a больше значения коэффициента «a». Поэтому можно принять, что зависимость (4.52), статистически мало значима. Другими словами, по всей совокупности данных зависимость между протяженностью зоны и скоростью протекающего в ее пределах геологического процесса не выявляется.

Из всей совокупности анализировались только данные по размерам зон и скоростям субдукции ($N=32$). Соответствующая прямолинейная зависимость имеет вид:

$$Lg L (\pm 1,22) = -(0,16 \pm 0,70) \cdot Lg V + (3,66 \pm 1,22). \quad (4.53)$$

Видно, что полученная зависимость также статистически не значима: значения всех дисперсий s_0 , s_a , s_b составляет примерно порядок и более. Рассмотрение более детальных и, по-видимому, более однородных данных, представленных в (Хейрцлер, Диксон, Херрон и др. 1974; Харленд, Кокс, Ллевеллин и др., 1985), также указывают на отсутствие статистически значимой связи между протяженностью зоны и скоростью субдукции:

$$Lg L (\pm 0,27) = (0,18 \pm 0,56) \cdot Lg V + (2,93 \pm 1,04). \quad (4.54)$$

Сравнение зависимостей (4.53) и (4.54) показывает, что скорость субдукции, по-видимому, можно считать независимой от протяженности поддвигаемой плиты и, в среднем, равной:

$$V = 60 \pm 30 \text{ мм/год}, 875 < L \text{ [км]} < 13600. \quad (4.55)$$

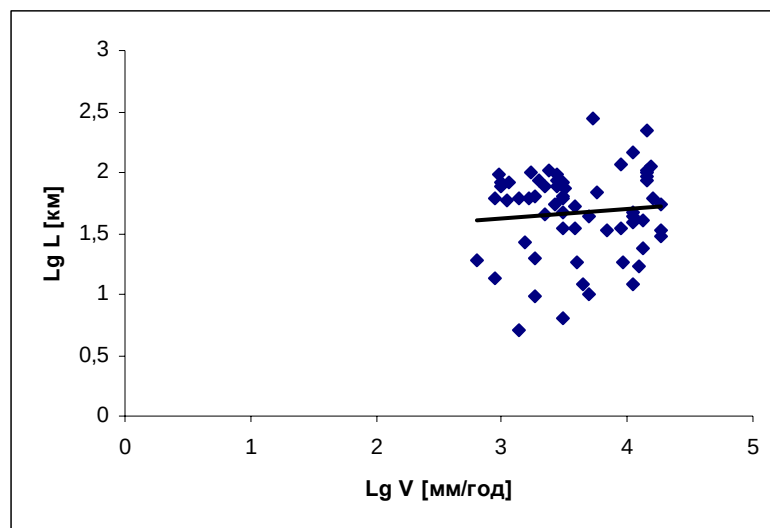


Рис. 4.15. Данные, характеризующие зависимость между протяженностями зон и скоростями субдукции, рифтинга и спрединга ($N=61$). Выражение для проведенной прямой линией зависимости $Lg L(Lg V)$ дается соотношением (4.52).

Из данных, представленных на рис. 4.16 ($N=29$), видно, что зависимость только между протяженностями раздвигаемых плит и скоростями рифтинга и спрединга можно представить в виде:

$$Lg L (\pm 0,33) = (0,43 \pm 0,15) \cdot Lg V + (3,17 \pm 0,26). \quad (4.56)$$

Анализ показывает (табл. 4.4), что зависимости между протяженностями зон и скоростями рифтинга и спрединга выявляются и по частичным выборкам, представленным датированными данным за $\tau = 5, 27, 33$ и 150 (144-163) млн. лет.

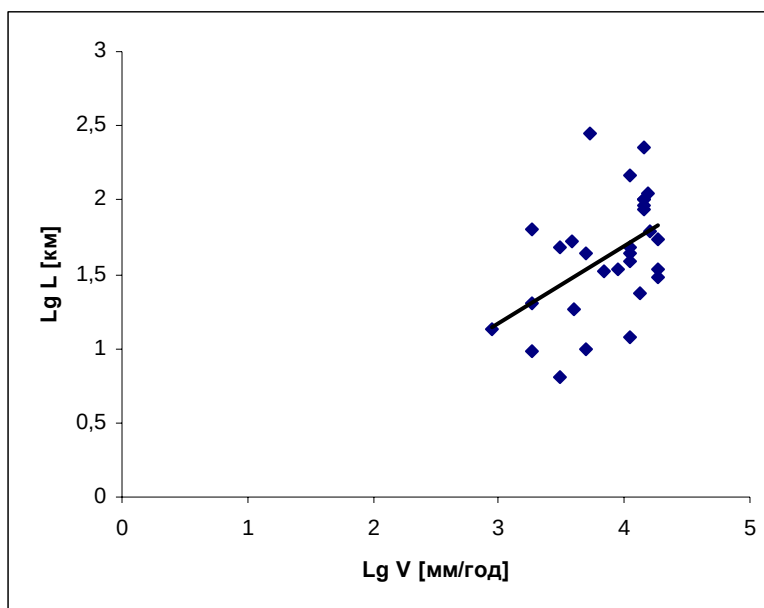


Рис. 4.16. Данные, характеризующие зависимость между протяженностями зон и скоростями рифтинга и спрединга ($N=29$). Выражение для зависимости $LgL(LgV)$, проведенной прямой линией, дается соотношением (4.56).

Таким образом, проведенный статистический анализ показал, что в течение последних 150 (144-163) млн. лет протяженности зон рифтинга и спрединга, с одной стороны, и скорости раздвигания плит в их пределах – с другой, можно считать пропорциональными. На основании данных табл. 4.4 в первом приближении можно принять:

$$Lg L \approx Lg V \quad \text{или} \quad L \approx V. \quad (4.57)$$

Таблица 4.4. Параметры зависимостей $LgL(LgV)$, характеризующих протяженности зон как функции скоростей спрединга для разных геологических отрезков времени.

N п. п.	Число данных, N	Временной интервал $T_1 - T_2$, [млн. лет]	Продолжи- тельность интервала, τ , [млн. лет]	$LgL (\pm s_0) = (a \pm s_a) \cdot LgV + (b \pm s_b)$, L [км], V [мм/год]
1	7	5 – 0	5	$LgL (\pm 0,38) = (0,77 \pm 0,38) \cdot LgV + (2,38 \pm 0,62)$
2	2	163 – 144	19	$LgL = 0,77 LgV + 1,27$
3	5	65 – 38	27	$LgL (\pm 0,37) = (0,69 \pm 0,49) \cdot LgV + (2,85 \pm 0,75)$
4	9	38 – 5; 98 – 65	33	$LgL (\pm 0,31) = (0,54 \pm 0,25) \cdot LgV + (3,09 \pm 0,42)$
5	2	144 – 98	46	$LgL = 0,80 LgV + 0,84$
6	4	150 - 0	150 (144 – 163)	$LgL (\pm 0,07) = (0,55 \pm 0,19) \cdot LgV + (3,08 \pm 0,33)$
	Всего: 29		Средние, n=6: n=4:	$0,7 \pm 0,3$ $0,3 \pm 0,1$ $2,9 \pm 0,5$

Обсуждение результатов. 1. Приведенные данные характеризуют движения в пределах рифтинг – спрединговых зон, расположенных в разных частях Земли. Поэтому, во-первых, сам факт существования зависимости (4.57) указывает на планетарный

масштаб механизма, обеспечивающего протекание рифтинг – спрединговых процессов. Во-вторых, время действия такого механизма никак не меньше интервала длительностью 150 (144-163) млн. лет, данные для которого имеются в нашем распоряжении. Что можно сказать о природе такого механизма, который на планетарном уровне регулирует интенсивность геологических движений в пределах рифтинг - спрединговых зон Земли?

Следует отметить, что само существование зависимости типа (4.57), в настоящее время представляется проблематичным. Действительно, согласно данным работы (Кукал, 1987; с. 40) «между протяженностью зоны субдукции и скоростью этого процесса какой-либо закономерной связи не отмечается». Полученные нами для зон субдукции данные (4.53) – (4.55) подтверждают этот вывод. И в то же время в работе (Жарков, 1983; стр. 257) отмечается, что «скорости плит коррелируются с относительной протяженностью границ субдукции, т.е. чем больше относительная длина границ поглощения плит, тем больше их скорость». В работе (Айзекс, Оливер, Сайкс, 1974; с. 164-165) отмечается, «что длина зон глубоких землетрясений может быть мерой величины поддвига, происходящего в последние несколько миллионов лет». И этот вывод авторы иллюстрируют зависимостью $Lg L \approx Lg V$, по сути, близкой зависимости (4.57).

2. Полученная в результате статистического анализа данных зависимость между протяженностью зоны L и скоростью V ее расширения (4.57) накладывает вполне определенные условия на энергетику механизма, «обеспечивающего» протекание процессов рифтинга и спрединга. Действительно, полагаем, что кинетическая энергия движущейся плиты равна $E = mV^2/2$, где $m = \rho DS$ и V – масса и скорость движения плиты, ρ , D – ее плотность и «толщина», $S \approx L^2$ – ее площадь и L - протяженность «раздвигаемой» стороны. Тогда величина приращения энергии dE вследствие увеличения протяженности зоны dL и изменения ее скорости движения dV с точностью до первого порядка малости получим: $dE = 2E_0(dL/L + dV/V)$. Откуда, учитывая (4.57) и интегрируя, для кинетической энергии плиты протяженностью L получаем:

$$E = 4E_0 Lg(L/L_0), \quad (4.58)$$

где $E_0 = \rho D L_0^2 V_0^2 / 2$ – кинетическая энергия плиты, L_0 - ее протяженность и V_0 - скорость ее движения в момент начала рифтинг – спредингового процесса.

Из полученного соотношения следует, что необходимым условием выполнения установленного соотношения между протяженностью зоны и скоростью ее движения (4.57) является увеличение со временем энергии рифтинг – спредингового процесса, происходящего по логарифмическому закону (4.58). При этом при увеличении протяженности зоны на порядок (два порядка) механизм должен быть способен увеличить энергию процесса в 4 раза (почти в 10 раз). И увеличить только кинетическую энергию, без учета энергетических затрат, связанных с разрывом сплошности литосферы при увеличении протяженности рифтинг – спредингоой зоны и с преодолением трения при движении плиты.

3. В работе (Жарков, 1983; стр. 256-259) на основании данных в (Forsyth, Uyeda, 1975), формулируется вывод о том, что «скорости плит коррелируются с величиной среднего полярного расстояния плиты». (Здесь под скоростью понимается величина, осредненная по площади плиты). При этом, подчеркивая реальность данных о существовании течений в мантии, в (Жарков, 1983) делается вывод о том, «что движение литосферы...*увлекает* (курсив – А.В.) за счет сил вязкого трения подстилающую ее астеносферу». Эти данные позволяют предположить, что механизмы, в соответствии с полученными соотношениями (4.57) и (4.58) обеспечивающие движение литосферных плит, имеют собственную (внутреннюю) ротационную природу, не зависящую от движений в мантии.

4. В первом разделе книги и многочисленных статьях сборника (Викулин, 2004), отмечалось, что земную кору, литосферу и более глубокие оболочки планеты следует рассматривать как такие среды, которые являются структурно упорядоченными и в пространстве и во времени. В таком случае полученные в настоящей работе данные

должны в первую очередь «стыковываться» с результатами сейсмологических исследований, которые являются прямым следствием тектонических движений.

Выше, в этом разделе, было показано, что совокупность достаточно сильных землетрясений, происходящих в пределах сейсмически активных поясов Земли, может рассматриваться как волновой процесс, свойства которого определяются угловой скоростью вращения планеты. При этом полагалось, что сейсмофокальные блоки поворачиваются за счет своих внутренних источников. В рамках такого ротационного подхода установлено существование двух видов волновых решений, имеющих тектоническую природу.

Факт наличия у тектонических плит вращательного движения, кроме приведенных выше данных, подтверждают и следующие данные.

Во-первых, в течение последних нескольких тысяч лет линии трещинных извержений в южной части Исландии изменили свою ориентацию примерно на 7° с ССВ $25-27^\circ$ в верхнем плейстоцене на ССВ $18-20^\circ$ в послеледниковую эпоху (Мелекесцев, 1979). При протяженности Исландии около 200 км такой разворот линий трещинных извержений равносителен вращению острова с угловой скоростью порядка $(10^{-3}-10^{-2}) \text{ год}^{-1}$ или линейной скоростью движения его окраины $(10 - 100) \text{ см/год}$.

Во-вторых, самая большая по размеру кольцевая «дислокационная» структура Земли – окраина тихоокеанской плиты - испытывает периодические повороты по и против часовой стрелки при амплитуде угла вращения около 10 градусов (Берсенов, 1964), что приводит к смещениям, достигающим нескольких сотен километров (Маслов, 1996). При этом периодам 30-23, 16-13, 6-0 млн. лет тому назад отвечает субширотное сжатие или вращение по часовой стрелке, периодам 22-17, 12-7 млн. лет – субширотное растяжение или вращение против часовой стрелки (Jackson, Shaw, Bargar, 1975; Takeuchi, 1986). Согласно этим данным, в течение последних нескольких десятков млн. лет величины угловой скорости вращения тихоокеанской плиты и линейной на ее окраине составляют $(10^{-5}-10^{-4}) \text{ год}^{-1}$ и $(1 - 10) \text{ см/год}$.

Скорости миграции сильнейших землетрясений вдоль окраины Тихого океана ($R \sim 10^4 \text{ км}$) составляют, в среднем, 1 см/сек (4.40), (изменяясь в пределах $10^{-2} \text{ см/сек} - 10^2 \text{ м/сек}$ (рис. 4.13)), что соответствует средней угловой скорости около 10^{-2} год^{-1} (Викулин, 2003). Примерно с такой же скоростью мигрируют эпицентры землетрясений вдоль окраины австралийского континента (рис. 4. 9, $R \sim 10^3 \text{ км}$) и вокруг сейсмической дыры в Авачинском заливе на Камчатке (рис. 4.10, $R \approx 20 \text{ км}$).

В-третьих, на факт вращения плит, в том числе и тихоокеанской, и крупных блоков указывают и данные прямых геодезических (Рикитаке, 1970; Сато, 1984) и геодинамических (Давыдов, Долгих, Запольский, Копвилем, 1982) измерений. Как видим, имеются весьма веские основания предположить, что именно повороты плит, и являются причиной горизонтальных смещений вдоль известных систем разломов планеты, скорости которых (Кукал, 1987; с. 15), как правило, не выходят за определенные выше значения скоростей движения для окраин Исландии, австралийского континента и Тихого океана.

Как видим, скорости поступательных движений плит, с одной стороны, и линейных перемещений вдоль границ плит в результате их вращений – с другой, действительно имеют один порядок по величине. Поэтому можно принять, что полученное соотношение (4.57) характеризует одновременно оба типа движений, происходящих в пределах рифтинг-спрединговых зон.

Таким образом, установленное соотношение (4.57), определяющее наличие пропорциональной зависимости между протяженностями зон и скоростями рифтинг – спрединговых движений в их пределах, в принципе, может быть согласовано с представлениями ротационного волнового подхода к описанию сеймотектонического планетарного процесса. В рамках такой концепции, как нам представляется, в будущем окажется возможным дать физическую интерпретацию геологическим волновым движениям (Гущенко, Копп, Корчемагин и др., 2003; Тверитинова, 2004), в том числе (при

«включении» в рассмотрение вертикальных движений земной коры) и пульсациям Земли (Милановский, 1995).

Ротационная гипотеза. В заключение сформулируем гипотезу, которая логически вытекает из результатов, приведенных выше.

Выше было получено решение, соответствующее такой неустойчивости сейсмотектонического процесса, которое приводит к образованию дисклинации и, как следствие, к генерации упругих волн, вызывающих землетрясения. При этом в ротационную модель не закладывались никакие критические условия (критерии) разрушения вещества. Поэтому *существование неустойчивости в системе взаимодействующих сейсмофокальных блоков*, как было сформулировано в предыдущем разделе, согласно представлениям ротационной модели, очевидно, должно быть заключено в самой природе сейсмотектонического процесса.

Во-вторых, в работе установлено существование следующих констант: χ , M_f и R_0 , φ^* . Первые две, по сути, характеризуют процесс взаимодействия тектонической волны с блоком, вторые - скорее, само вещество, его «структуру» и дисклинационную природу. При этом, константы между собою взаимосвязаны аналитическими выражениями, имеющими вполне определенный физический смысл. Таким образом, можно предположить, что *существует взаимосвязь между дисклинационной, моментной природой вещества сейсмофокальной зоны и ротационной природой сейсмотектонического процесса*.

Сформулированная гипотеза позволит уточнить наши представления о физике сейсмотектонического процесса, протекающего не только на Земле, но и на других планетах. Действительно, если гипотеза справедлива, то на Меркурии (период обращения около двух месяцев) и тем более на Венере (период обращения около 250 дней) сейсмотектонические процессы в соответствии с представлениями ротационной модели должны протекать с меньшей интенсивностью, чем на Земле и Марсе. Данные по кольцевым структурам Венеры (Mars..., 1989; Мелекесцев, 1979) подтверждают такую гипотезу.

К выводу о значительном влиянии ротации Земли на геологические, тектонические и геофизические процессы не зависимо друг от друга пришло много исследователей. В научной литературе систематически появлялись статьи с предложениями использовать ротационный режим Земли, точнее его вариации, для объяснения первичного тектогенеза. Назовем только несколько работ, опубликованных в 60-70^х гг. прошлого столетия: П.Н.Кропоткина и Ю.А. Трапезникова (1963), Г.Ф.Лунгерсгаузена (1963), М.В.Стоваса (1975) и др. В 1960 г. Н.М.Страхов (1960; с. 24), касаясь перемещения оси вращения Земли, писал: "В настоящее время эти перемещения являются уже не домыслом, не смелой догадкой, как это было до недавнего времени, не умозрительной концепцией, которую можно игнорировать при чисто эмпирическом изучении земной коры; теперь - это факт. Как всякий достоверно установленный к тому же, достаточно крупный факт его нельзя больше игнорировать при изучении тектогенеза; он должен привлечь к себе внимание исследователей".

Достаточно полно и последовательно ротационная гипотеза образования земных структур разработана К.Ф. Тяпкиным (1998). Сущность разработанной им гипотезы сводится к следующему.

При перемене положения оси вращения Земли ее фигура должна меняться, приспособляясь к новым условиям ротационного режима.

Из анализа астрономических и палеомагнитных данных перемещения оси вращения следует, что траектория движения полюса представляет собой сложную кривую, характеризующуюся поступательным движением по поверхности Земли с наложенным на него близкими к круговым циклическими движениями с периодами разных порядков. Циклические составляющие самого высокого порядка имеют средний

радиус около $0'',1$, а период – около 1 года (колебания Чандлера). Циклические составляющие первого порядка для фанерозоя имеют средний радиус около 15^0 , а период – эру, галактический год (около 220 млн. лет). По внешнему виду траектория движения полюса должна напоминать систему удлиненных циклоид.

Напряжения, возникающие в тектоносфере в результате изменения положения оси вращения Земли, могут быть определены путем решения соответствующей задачи механики.

В рамках описанного подхода автору такой ротационной гипотезы удастся «увязать» в единую стройную концепцию геологические аспекты жизни Земли (геосинклинали и платформы, океаны и континенты), предложить возможные причины перемещения ее полюсов и объяснить наблюдающиеся на ее поверхности системы разломов и блоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Авсюк Ю.Н.** Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН. 1996. 188 с.
2. **Айзекс Б., Оливер Дж., Сайкс Л.** Сейсмология и новая глобальная тектоника // Новая глобальная тектоника. М.: Мир. 1974. С.133–179.
3. **Бахтияров В.Ф., Левин В.Е.** Светодальномерные измерения из обсерватории Мишенная. Анализ результатов наблюдений // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С.85-89.
4. **Берсенов И.И.** Осевое вращение Земли как одна из причин геотектогенеза // Строение и развитие земной коры. М.: Наука. 1964. С.194–200.
5. **Бот М.** О проблеме предсказания землетрясений // Предсказание землетрясений, М.: Мир. 1968. С. 9 - 20.
6. **Викулин А.В.** О природе Австралийских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. №2. С. 99 - 108.
7. **Викулин А.В., Кролевец А.Н.** Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика, 2001, №6. С. 996 – 1009.
8. **Викулин А.В.** Миграция очагов сильнейших Камчатских и Северо-Курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология, 1992, №1, С. 46 - 61.
9. **Викулин А.В.** Прогноз времени сильнейших землетрясений у берегов Камчатки и Северных Курил // Вулканология и сейсмология, 1992, №1, С. 62 - 69.
10. **Викулин А.В.** Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл АН СССР, 1990, Т.310, №4, С. 821 - 824.
11. **Викулин А.В.** Сейсмический цикл как результат взаимодействия тектонической волны и сейсмофокального блока // Строение и эволюция Востока Азии. II Косыгинские чтения. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН. 1999. С.301-306.
12. **Викулин А.В.** Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2001, с.205-224.
13. **Викулин А.В.** Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ. 2003. 151 с.
14. **Викулин А.В.** (ред.) Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ. 2004. 297 с.
15. **Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н.** Ротационная геодинамическая модель // Методы изучения, строение и мониторинг литосферы. Новосибирск: Из-во СО РАН НИЦ ОИГГМ. 1998. С.163-165.
16. **Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н.** Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // Вычислительные технологии. 2000. Т.5. № 1. С.31-39.
17. **Викулин А.В., Викулина С.А.** Закономерности размещения очаговых областей

- сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР. 1989. Препринт № 5. 44 с.
18. **Викулин А.В., Викулина С.А., Митякин В.П.** Сценарий возможного сейсмического воздействия на Петропавловск-Камчатский в результате катастрофического землетрясения. М.: ИЛ АН СССР. 1991. 55 с.
 19. **Викулин А.В., Гусяков В.К., Титов В.В.** О природе максимального цунами // Вычислительные технологии. 1992. Т.1. № 3. С.131-134.
 20. **Викулин А.В., Иванчин А.Г.** Ротационная модель сейсмического процесса // Българско геофизично списание. 1996. Т. XXII. № 3. С.36-43.
 21. **Викулин А.В., Иванчин А.Г.** Модель сейсмического процесса // Вычислительные технологии. 1997. Т.2. № 2. С.20-25.
 22. **Викулин А.В., Иванчин А.Г.** Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. 1998. Т.17. № 6. С.95-103.
 23. **Викулин А.В., Сеньюков С.Л.** Миграция форшоков и афтершоков в очаге Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 с $M=7,5-7,7$ // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Из-во Камч. госуд. акад. рыбпромысл. флота, 1998, С. 80 - 88.
 24. **Викулин А.В., Чернобай И.П.** Механизм очага Урупского (1963 г.) и Большого Камчатского (1952 г.) землетрясений // Динамические процессы в дискретных геофизических системах. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР. 1986 а. С.58-66.
 25. **Викулин А.В., Чернобай И.П.** О некоторых особенностях двух сильнейших Курило-Камчатских землетрясений // Физические поля и свойства горных пород Северо-Востока СССР. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР. 1986 б. С.44-59.
 26. **Владимиров В.И., Романов А.Е.** Дисклинация в кристаллах. Л.: Наука. 1986. 224 с.
 27. **Галкин И.Н.** Геофизика Луны. М.: Наука. 1978. 176 с.
 28. **Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Власова Г.Л., Мирлин Е.Г., Миронов Ю.В., Рожкова В.В., Соловьев А.А.** Зоны субдукции: действующие силы, геодинамические типы, сейсмичность и металлогения // Вестник ОГГТГН РАН. № 2(12)'2000 Т.1. http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/2-2000/subduction.htm#begin
 29. **Геологическая история территории СССР и тектоника плит** (ред. Л.П.Зоненшайн, Е.И.Приставакина). М.: Наука, 1989, 206 с.
 30. **Голицын Б.Б.** Лекции по сейсмометрии. Российская АН. СПб. 1912.
 31. **Гущенко О.И., Копп М.Л., Корчемagin В.А., Леонов Ю.Г. и др.** Продольные волны дизъюнктивных деформаций юго-восточной части Русской плиты и ее горного обрамления // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы. Материалы XXXVI Тектонического совещания. Т. 1. М.: Геос. 2003. С.173–176.
 32. **Гутенберг Б., Рихтер К.Ф.** Магнитуда, интенсивность, энергия и ускорение как параметры землетрясений. (I). (II) // Слабые землетрясения. М.: Из-во Иностр. лит-ры. 1961. С. 45-71. С. 72-119.
 33. **Давыдов А.С.** Теория твердого тела. М.: Наука. 1976. 640 с.
 34. **Давыдов А.С.** Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // Успехи физических наук. 1982. Т.138. Вып.4. С.603-643.
 35. **Давыдов А.В., Долгих Г.И., Запольский А.М., Копвилем У.С.** Регистрация собственных колебаний геоблоков с помощью лазерных деформографов // Тихоокеанская геология. 1988. № 2. С.117–118.
 36. **Жарков В.Н.** Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
 37. **Ефимов И.И., Куликов У.А., Рабинович А.Б., Файн И.В.** Волны в пограничных областях. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 280 с
 38. **Касахара К.** Механика землетрясений. М.: Мир, 1985, 264 с.
 39. **Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И., Сулиди-Кондратьев Е.Д.** Кольцевые структуры Земли: миф или реальность. М.: Наука. 1989. 190 с.
 40. **Коняев К.В., Сабинин К.Д.** Волны внутри океана. С-П.: Гидрометеиздат. 1992. 272

- с.
41. **Котляр П.Е., Ким В.И.** Положение полюса и сейсмическая активность Земли. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН. 1994. 126 с.
 42. **Кропоткин П. Н., Трапезников Ю.А.** Вариации угловой скорости вращения Земли, колебаний полюса и скорости дрейфа геомагнитного поля, и возможная связь с геотектоническими процессами // Изв. АН СССР, сер. геологич. Ж. 1963. № II. С. 32-50.
 43. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
 44. **Кулагин В.К., Маламуд А.С., Старков В.И., Кулагина М.В.** Долгосрочные предвестники серии сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физ. Земли. 1980. № 9. С.110-117.
 45. **Кулаков А.П.** Морфоструктуры Востока Азии. М.: Наука. 1986. 176 с.
 46. **Кукал З.** Скорость геологических процессов. М.: Мир. 1987. 246 с.
 47. **Ландау Л.Д., Лифшиц И.М.** Статистическая физика. М.: Наука. 1964. 568 с.
 48. **Ле Пишон Кс.** Спрединг океанического дна и дрейф континентов // Новая глобальная тектоника. М.: Мир. 1974. С.93–132.
 49. **Лихачев В.А., Волков А.Е., Шудегов В.Е.** Континуальная теория дефектов. Л.: Изд-во Ленингр.ун-та. 1986. 232с.
 50. **Лихачев В.А., Панин В.Е., Засимчук Е.Э.** и др. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации. Киев: Наукова думка. 1989. 320с.
 51. **Лобковский Л.И.** Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988, 254 с.
 52. **Лунгерсгаузен Г.Ф.** О периодичности геологических, явлений и изменений климатов прошлых геологических эпох // Проблемы планетарной геологии. Москва, Гоегеолтехиздат. 1963. С.7-49.
 53. **Манк У., Макдональд Г.** Вращение Земли. М.: Мир. 1964. 384 с.
 54. **Маслов Л.А.** Геодинамика литосферы тихоокеанского подвижного пояса // Хабаровск-Владивосток: Дальнаука. 1996. 200 с.
 55. **Медведев С.В.** Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. С. 151 – 162.
 56. **Мелекесцев И.В.** Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы глубинного вулканизма. М.: Наука. 1979. с.125-155.
 57. **Милановский Е.Е.** Пульсации Земли // Геотектоника. 1995. № 5. С.3–24.
 58. **Могги К.** Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988, 384 с.
 59. **Молоденский М.С.** Упругие приливы, свободная нутация и некоторые вопросы строения Земли // Труды Геофиз. Ин-та АН СССР. 1953. № 19. С.3-52.
 60. **Незлин М.В.** Солитоны Россби (экспериментальные исследования и лабораторная модель природных вихрей типа Большого Красного Пятна Юпитера) // УФН. 1986. 150. Вып.1. С.3-60.
 61. **Новая** глобальная тектоника. М.: Мир. 1974. 472 с.
 62. **Новый** каталог сильных землетрясений на территории СССР (ред. Н.В.Кондорская, Н.В.Шебалин). М.: Наука. 1977. 536 с.
 63. **Панин В.Е., Гиряев Ю.В., Лихачев В.А.** Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск : Наука. 1984. 229с.
 64. **Парийский Н.Н.** Земные приливы и внутренне строение Земли // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1963. № 2. С.193-215.
 65. **Попов Г.И.** Об условиях образования цунами. М.: Из-во АН СССР. 1961. 59 с. (Бюлл. Совета по сейсмологии. № 9).
 66. **Проблемы** сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН. 2000. 318 с.
 67. **Рикитаке Т.** Геофизические и геологические данные о Японской островной дуге и ее обрамлении // Окраины континентов и островные дуги. М.: Мир, 1970. С.216–236.
 68. **Рогачев К.А.** Вихри в океане // Природа. 2003. №2. С. 45-49.

69. **Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М.** Основы геомеханики. М.: Недра. 1986. 301 с.
70. **Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б.Ю Цыплаков В.В.** Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Изв. АН СССР. Физ. Земли. 1979. № 11. С.72-77.
71. **Салтыков В.А.** Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // Докл. РАН. 1995. 341. № 3. С.406-407.
72. **Сато Х.** Повторные геодезические съемки // Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра. 1984. С.108–120.
73. **Соболев Г.А.** Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 314 с.
74. **Соловьев С.Л. Го Ч.Н.** Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М.: Наука. 1974. 312 с.
75. **Сорохтин О.Г.** Глобальная эволюция Земли. М.: Наука. 1974.
76. **Стовас М.В.** Избранные труды. М.: Недра. 1975. 155 с.
77. **Страхов Н.М.** Типы климатической зональности в послепротерозойской истории Земли и их значение для геологии //Изв. АН СССР. Серия геологич. 1960. № 3. С. 23-85.
78. **Тверитинова Т.Ю.** Волновая тектоника и вергентность структур сжатия Земли // Вихри в геологических системах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ. 2004. С. 112-118.
79. **Тяпкин К.Ф.** Физика Земли. Киев: Вища школа. 1998. 312 с.
80. **Федотов С.А.** О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды ИФЗ АН СССР. 1965. №203 (36). С. 66 - 93.
81. **Федотов С.А.** О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968, С. 121 - 150.
82. **Филиппов А.Т.** Многоликий солитон. М.: Наука. 1990. 288 с.
83. **Харленд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г., Пиктон К.А.Г., Смит А.Г., Уолтерс Р.** Шкала геологического времени. М.: Мир. 1985. 139 с.
84. **Хейцлер Дж., Диксон Г., Херрон Е., Питман В., Ле Пишон Кс.** Морские магнитные аномалии, инверсии геомагнитного поля и движения океанического дна и континентов // Новая глобальная тектоника. М.: Мир. 1974. С.38–57.
85. **Хирт Д., Лоте Й.** теория дислокаций. М.: Атомиздат. 1972. 539с.
86. **Шейдеггер А.** Основы геодинамики. М.: Недра. 1987. 384 с.
87. **Chao B. F., Gross R.S.** Changes in Earth's rotational energy induced by earthquakes // Geophys. Int. 1995. 122. P.776-783.
88. **Daly M.C.** Correlation between Nazka-Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador // Tectonics, 1989, 8, N4, P. 769 - 790.
89. **Enfland P., Molnar P.** The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults // Geophys. J. Int. 1997. 130. N 3. P. 551-582.
90. **Gordon** solution dynamics // Wave Motion. 1983. 5. N 1. P.49-58.
91. **Geist E.L., Childs J.R., Scholl D.W.** The origin of basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif // Tectonics, 1988, 7, N2, P. 327 - 341.
92. **Forsyth D., Uyeda S.** On the relative importance of the driving forces of plate motion // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1975. V.43. P. 163-200.
93. **Jackson E.D., Shaw H.R., Bargar K.E.** Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain // Earth Planet Sci.Lett. 1975. V.26. P.145–155.
94. **Hashimoto M., Tada T.** Horizontal Crustal movements in Hokkaido and its tectonic implications // Jour. Seismol. Soc. Jap., 1988, 41, N1, P. 29 - 38.
95. **Maps** of part of the Northern hemisphere of Venus. Miscellaneous investigations series / Published by the U.S. Geological Survey. 1989.
96. **Munk W.H., Hassan E.S.M.** Atmospheric ecitation of the Earth's wobble // Geophys. J.

- Roy. Astron. Soc. 1961. 4. P.339.
97. **Nur A., Ron H., Scotti O.** Fault mechanics and the kinematics of block rotation // *Geology*, 1986, 14, P. 746 - 749.
98. **Takeuchi A.** Pacific swing: Cenozoic episodicity of tectonism and volcanism in Northeastern Japan // *Memoir of the Geological Society of China*. 1986. N 7. P.233–248.

V. ПЛОТНОСТЬ, СИЛА ТЯЖЕСТИ И ДАВЛЕНИЕ ВНУТРИ ЗЕМЛИ

Исторические предпосылки создания теории определения плотности (Буллен, 1978).

Плотность пород земной коры и средняя плотность Земли. Определение плотности вещества внутри Земли с помощью уравнения Роша, Адамса - Вильямсона и способом Буллена; соответствующие им плотностные модели. Основы способа расчета силы притяжения на различных глубинах по радиусу Земли и ее гравитационная модель (Магницкий, 1965).

Основы способа расчета давления, его величины и характера изменения по радиусу Земли. Значение данных о плотности, силе притяжения и давлении для изучения состояния вещества и процессов во внутренних зонах Земли (Магницкий, 1965).

Модель геоизостазии (Тяпкин, 1998).

Принцип минимизации – основной закон эволюции планет (Кузнецов, 2000).

Исторические предпосылки создания теории определения плотности (Буллен, 1978; с. 77). Во всей теории, описывающей распределение плотности Земли, наиболее твердо установлены соотношения

$$g = GM / R^2, dm = 4\pi r^2 \rho dr,$$

основанные только на законе всемирного тяготения и сферической симметрии. Здесь g – ускорение свободного падения, G – гравитационная постоянная, M – масса Земли, R – ее радиус и ρ – ее плотность. Гидростатическое соотношение

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{dP}{dr} = g\rho$$

также надежно в пределах довольно тщательно установленных ограничений, P – давление.

Эти три соотношения дают одно из первых основных уравнений, найденное Лапласом

$$\frac{dP}{dr} = -4\pi G \rho r^{-2} \int_0^r \rho q^2 dq,$$

которое связывает радиус планеты с плотностью и давлением в ее недрах. Именно эти уравнения с учетом дополнительных предположений о состоянии вещества и были положены впоследствии в основу исследований зависимости плотности вещества планеты (модели Эндема, Роша, Дарвина, Лежандра-Лапласа, Радо и всех последующих).

Плотность пород земной коры и средняя плотность Земли. Данные о скоростях сейсмических волн, полученные в сейсмологии, не позволяют найти отдельно распределение плотности ρ , модуля сжатия K и модуля сдвига μ . По полученным выше формулам (3.19) можно найти лишь отношения этих величин.

Для раздельного нахождения этих величин необходимы дополнительные условия.

В качестве таких данных используются в первую очередь значения массы M и C – момента инерции Земли или связанной с ними величины $I_2 = \frac{HC}{Ma^2}$, где H – постоянная прецессии (см. (2.23), (2.26)).

К упомянутым величинам можно присоединить еще плотность ρ_0 самых верхних слоев Земли. К сожалению, установить ρ_0 довольно трудно в силу сложности строения земной коры и большого разброса плотностей горных пород. Так как верхние части

мантии Земли, как мы видели, по своим свойствам представляются более однородными, то обычно в качестве ρ_0 берут плотность вещества мантии непосредственно под границей Мохоровичича.

Определение плотности вещества внутри Земли с помощью уравнения Роша, Адамса - Вильямсона и способом Буллена; соответствующие им плотностные модели. Основы способа расчета силы притяжения на различных глубинах по радиусу Земли и ее гравитационная модель (Магницкий, 1965; с. 246-254). Таким образом, любой закон изменения плотности с глубиной должен подчиняться, по крайней мере, трем, достаточно жестким условиям:

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 &= 3,3 - 3,5 \text{ г/см}^3, \\ 4\pi \int_0^r \rho r^2 dr &= M, \\ C &= \frac{8\pi}{3} \int_0^r \rho r^4 dr. \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

Кроме того, Радо ввел еще очевидное условие:

$$\frac{d\rho}{dr} \geq 0, \quad (5.2)$$

т.е. плотность не должна уменьшаться с увеличением глубины.

Два условия (5.1) и (5.2) позволили Радо, не прибегая к каким-либо гипотезам или дополнительным данным, вычислить для каждой глубины допустимые пределы для плотности.

Пусть ρ - истинный закон изменения плотности, а δ - какой-либо другой закон, предполагаемый нами, но подчиняющийся условиям (5.1). Тогда имеем:

$$\left. \begin{aligned} 4\pi \int \delta r^2 dr &= M, \\ \frac{8\pi}{3} \int_0^r \delta r^4 &= C. \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Вычитая, находим:

$$\int (\rho - \delta) r^2 dr = 0. \quad (5.4)$$

Так как r^2 знак не меняет, то каков бы ни был закон изменения δ , существует, по крайней мере, одно значение $r = r_1$, при котором $(\rho - \delta)$ меняет знак.

Аналогично находим:

$$\int_0^r (\rho - \delta)(r^4 - r_1^2 r^2) dr = 0. \quad (5.5)$$

$(\rho - \delta)$ меняет знак при $r = r_1$, но в этой же точке меняет знак и $(r^4 - r_1^2 r^2)$, следовательно, подинтегральное выражение (5.5) не меняет знака при $r = r_1$. Таким образом, существует еще одно значение $r = r_2$, при котором $(\rho - \delta)$ меняет знак.

Наложим на δ условие Радо (5.2) в виде $\frac{d\delta}{dr} = 0$ везде, кроме точки r_3 , где δ может меняться скачком.

Таким образом, принимаем закон плотности

$$\delta = \delta_l \text{ при } r \leq r_3,$$

$$\delta = \delta_2 \text{ при } r \geq r_3.$$

Значения δ_1 и δ_2 сразу определяются из условий (5.3).

На рис. 5.1. ломаная линия 2-2 представляет закон изменения плотности δ , линия 1-1 - истинный ход плотности δ с глубиной. Из данных, представленных на рис. 5.1,

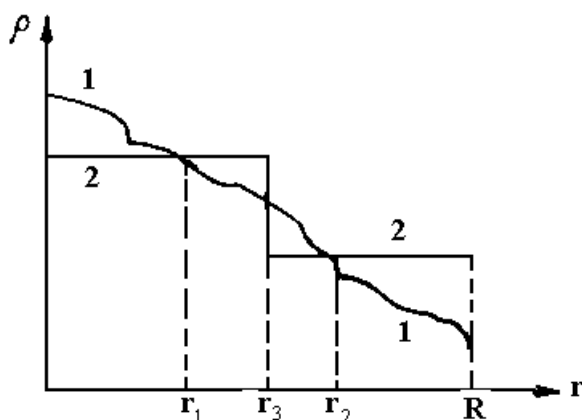


Рис. 5.1.

и условия (5.2) видно, что при $r = r_3$ кривая δ обязательно пройдет между значениями $\delta = \delta_1$ и $\delta = \delta_2$. Следовательно, δ_1 и δ_2 будут пределами для плотности Земли на расстоянии r_3 от центра.

К сожалению, пределы Радо еще очень широки и потому не могут дать существенных сведений о плотности внутри Земли.

Для сужения пределов изменения плотности М.С. Молоденским было предложено вместо условия Радо (5.2) ввести условие (Молоденский, 1953; Молоденский, Еремеев, Юркина, 1962):

$$-\frac{d\rho}{dr} \geq \frac{g\rho^2}{K}. \quad (5.6)$$

Условие (5.6) вытекает из следующего. С одной стороны, по закону Гука $d\rho/\rho = dP/K$, с другой - $dP = -g\rho dr$. Вместе эти два уравнения для однородного вещества дают:

$$-\frac{d\rho}{dr} = \frac{g\rho^2}{K}. \quad (5.7)$$

Поскольку в Земле возможна дифференциация вещества с концентрацией более тяжелых компонент к центру, то равенство должно быть в общем случае заменено неравенством (5.6).

Взяв в качестве предельного случая (5.7), можно, учитывая (5.3), методом численного интегрирования вычислить кривые, удовлетворяющие условию

$$-\frac{d\delta}{dr} = \frac{g\delta^2}{K}.$$

Если теперь на рис. 5.1 заменим прямые $\delta = \delta_1$ и $\delta = \delta_2$, полученными кривыми, то найдем новые пределы плотности. На рис. 5.2 пунктиром приведены пределы плотности по Молоденскому. Эти пределы дают и максимально возможный скачек плотности на границе земного ядра в $4,6 \text{ г/см}^3$. Однако, пределы могут несколько расшириться, если допустить, что температура может отклоняться от адиабаты.

Если бы скачек плотности на границе ядра равнялся предельному, то верхний и нижний пределы плотности по Молоденскому совпали бы, тогда был бы получен закон изменения плотности с глубиной. Этот закон для плотности дан на рис. 5.2 точечным пунктиром.

Формула 5.6 в случае химически однородного вещества может быть положена в основу определения закона изменения плотности Земли с глубиной (Williamson, Adams, 1923).

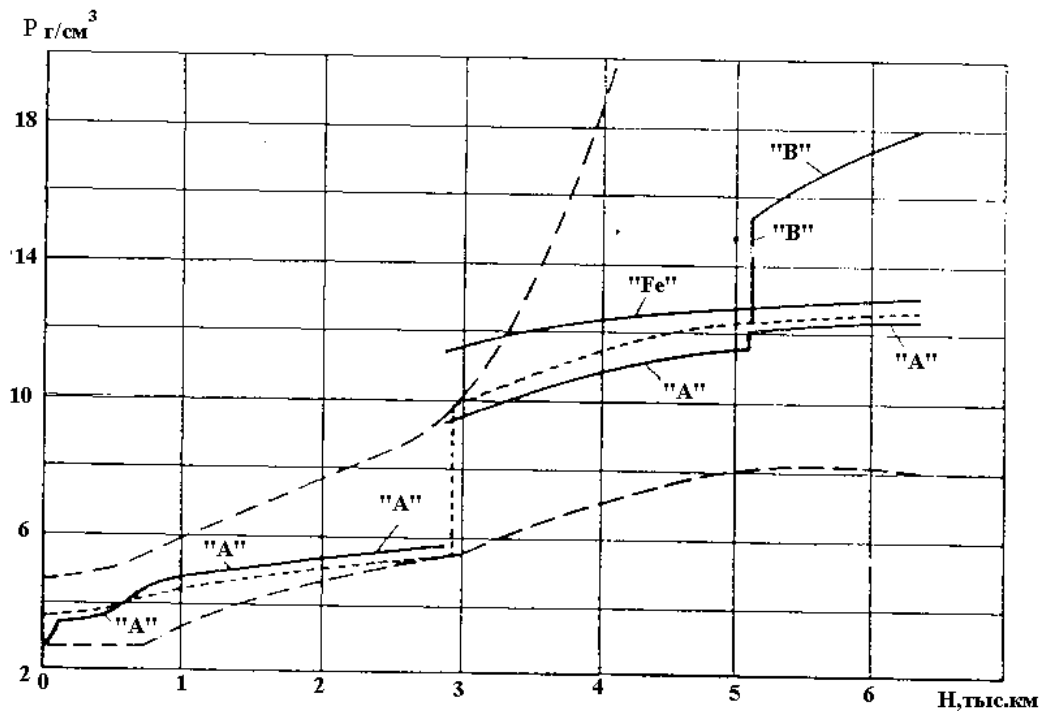


Рис. 5.2.

Для Земли однородного состава изменение плотности с глубиной можно записать в следующем виде $\frac{d\rho}{dr} = \left(\frac{d\rho}{dr}\right)_s + \left(\frac{d\rho}{dr}\right)_{\tau'}$. Здесь $\left(\frac{d\rho}{dr}\right)_s$ - адиабатическое изменение плотности; $\left(\frac{d\rho}{dr}\right)_{\tau'}$ - изменение плотности за счет того, что истинный температурный градиент в Земле отличается от адиабатического на величину τ' .

Но из (5.7) имеем $\left(\frac{d\rho}{dr}\right)_s = -\frac{g\rho}{K_s/\rho} = -\frac{g\rho}{F}$, так как, в соответствии с соотношением (3.19), величины $K_s/\rho = F = V_p^2 - 4/3V_s^2$, полученные из сейсмических данных, соответствуют адиабатическим условиям.

Если α - коэффициент объемного расширения, то приращение плотности при температурном градиенте τ' будет $d\rho = \alpha\rho\tau'dr$, $(d\rho/dr)_{\tau'} = \alpha\rho\tau'$.

Таким образом,

$$\frac{d\rho}{dr} = -\frac{g\rho^2}{K_s} + \alpha\rho\tau'. \quad (5.8)$$

Для большей части Земли, за исключением самых верхних ее частей, адиабатический градиент τ' невелик. В жидком ядре $\tau' = 0$. Таким образом, в первом приближении выражение (5.8) можно заменить через (5.7). Если учесть возможность изменения химического состава по глубине, то вместо (5.7) следует взять (5.6). От неравенства (5.6) можно перейти к равенству

$$-\frac{d\rho}{dr} = \chi(r)\frac{g\rho^2}{K_s}. \quad (5.9)$$

Здесь $\chi(r)$ - функция, учитывающая отклонение от однородности, т.е. учитывающая возможное изменение химического состава вещества Земли с глубиной и возможное появление фазовых переходов под действием давления и температуры.

В настоящее время имеется много решений уравнения (5.9) при разных предположениях относительно $\chi(r)$. Рассмотрим только те решения, которые с учетом последних данных можно считать наиболее удовлетворительными.

Самое простое предположение относительно $\chi(r)$ состоит в том, чтобы считать Землю однородной и $\chi(r) = 1$ везде, кроме границы земного ядра, где, как указывают данные сейсмологии, механические характеристики вещества Земли меняются скачком при переходе от мантии к ядру.

Обозначим через m массу части Земли, заключенной внутри радиуса r : $m = 4\pi \int \rho(r')^2 dr'$. На расстоянии r от центра Земли имеем $g = fm/r^2$. Теперь (5.9)

примет вид:

$$-\frac{d\rho}{dr} = f \frac{m\rho}{r^2 F}. \quad (5.10)$$

Вместе с тем

$$dm/dr = 4\pi r^2 \rho. \quad (5.11)$$

Уравнения (5.10) и (5.11) решаем методом численного интегрирования. В качестве начальных условий берем $m(R) = M$, $\rho(R) = \rho_0$.

Скачек на границе ядра при $r_1 = 0,55R$ определим из уравнения $\frac{8\pi}{3} \int_0^R \rho r^4 dr = C$.

Полученное таким образом распределение ρ позволяет найти момент инерции C_1 ядра. На рис. 5.3 дана зависимость момента инерции ядра от ρ_0 .

Так как момент инерции сферы с постоянной плотностью определяется соотношением $C_1 = 0,40m_1 r_1^2$, то из рис. 5.3 следует, что при сделанных выше предположениях ρ_0 не может быть меньше $3,7 \text{ г/см}^3$. В противном случае C_1 ядра будет больше $0,40m_1 r_1^2$, т.е. плотность в ядре должна убывать с глубиной, что с физической точки зрения невероятно, так как привело бы к неустойчивости ядра.

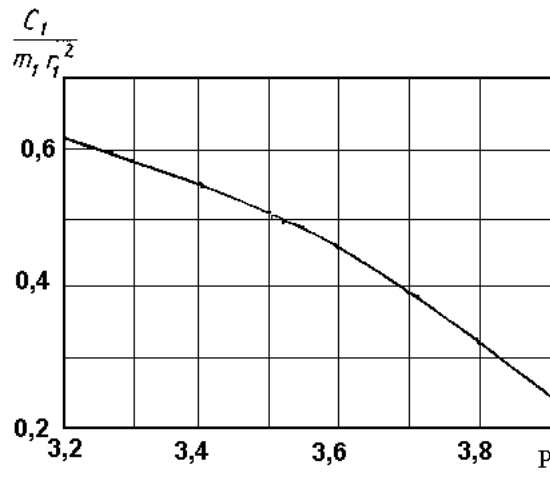


Рис. 5.3.

Однако значение $\rho_0 = 3,7 \text{ г/см}^3$ кажется неправдоподобно большим, если учесть все данные, положенные в основу условий (5.1).

Таким образом, приходится сделать вывод о невероятности предположения о том, что $\chi(r) = 1$ везде, кроме границы ядра.

Приведенные выше данные показывают, что отклонения от однородности следует искать, в первую очередь, в мантии Земли, и именно в слое С. Действительно, как следует из данных, характеризующих отношение сжимаемости к плотности, как

функции глубины (определяемые на основании данных о скоростях), слой С не может быть однородным или должен содержать полиморфные переходы.

К аналогичному выводу приводит следующее рассуждение.

Имеем $K_S = F\rho$. Дифференцируем по давлению p :

$$\frac{dK_S}{dp} = \frac{dF}{dp} \rho + F \left[\left(\frac{d\rho}{dp} \right)_S + \left(\frac{d\rho}{dp} \right)_{\tau'} \right]. \quad \text{Примем во внимание } \left(\frac{d\rho}{dp} \right)_S = \frac{\rho}{K_S} = F^{-1},$$

$$\left(\frac{d\rho}{dp} \right)_{\tau'} = \alpha \rho \tau', \text{ следовательно, } \left(\frac{d\rho}{dp} \right)_{\tau'} = -\frac{\alpha \tau'}{g}.$$

Учитывая приведенные соотношения, получим:

$$\frac{dK_S}{dp} = 1 - \frac{1}{g} \frac{dF}{dr} - \frac{\alpha F \tau'}{g}. \quad (5.12)$$

Так как g в мантии почти не меняется, то, опуская в (5.12) член с τ' , можно вычислить по сейсмическим данным:

$$\frac{dK_S}{dp} = 1 - \frac{1}{g} \frac{dF}{dr}. \quad (5.13)$$

На рис. 5.4 пунктиром показаны значения dK_S/dp по скоростям таблиц Джеффриса - Буллена, точечным пунктиром то же по данным Гутерберга. Сплошная линия - теоретическое значение dK_S/dp для однородной Земли. Из данных, представленных на рис. 4.4, видно, что слой D (900 - 2900 км) имеет однородный состав и температурный градиент в нем близок к адиабатическому. В слое С и, по-видимому, в слое В, хотя и в меньшей степени, условие однородности нарушено.

Основываясь на привлеченных соображениях, разумно считать, что в слое С $\chi(r) \neq 1$. К сожалению, вид функции $\chi(r)$ в слое С неизвестен. В качестве приближения можно

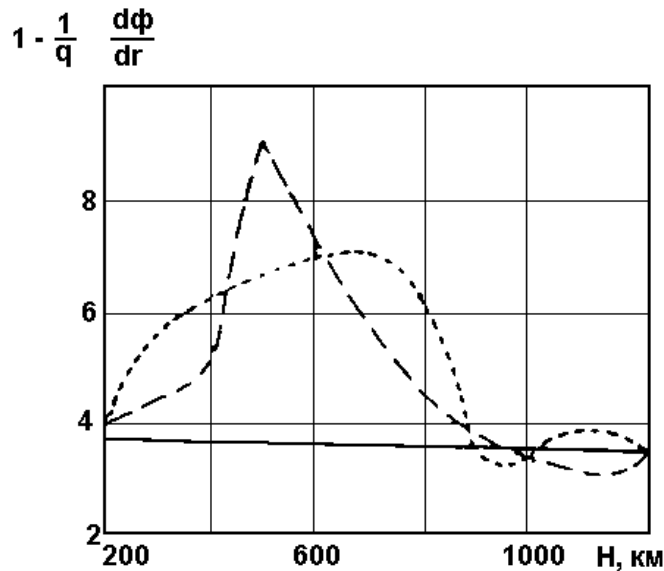


Рис. 5.4

предположить скачек плотности на глубине 500 км, однако, это вводит еще одно неизвестное - величину скачка, для определения которого требуется новое условие. Но все условия уже использованы. Поэтому решение ведется методом подбора и результат может содержать известную долю неопределенности, особенно в отношении плотности центральных частей Земли.

На рис. 5.2 сплошной линией А показан закон изменения плотности, полученный таким образом, при этом скачек на глубине 500 км в соответствии с сейсмологическими данными заменен плавной интерполяционной кривой в виде полинома второй степени.

Везде, кроме слоя С и границы ядра, Земля считается однородной. Момент инерции ядра при этом составляет $C_I = 0,387 m_I r_I^2$. Полученная схема строения Земли известна как модель "А" Буллена (Буллен, 1978). По существу с ней совпадает и модель Земли Гутенберга (Гутенберг, 1963). Основная разница между ними в том, что при примерно тех же плотностях, как и в модели "А", в модели Гутенберга предполагается изменение скоростей сейсмических волн на глубине в соответствии со скоростным разрезом по Гутенбергу, а не по Джефису - Буллену, как в модели "А" Буллена.

Знание плотности позволяет по формулам (3.19) получить значения упругих модулей K и μ для каждой глубины. На рис. 5.5 приведены значения K_S и μ для модели "А" Гутенберга - Буллена.

Из данных, представленных на рис. 5.5, следует, что при переходе к ядру K меняется почти непрерывно, что представляется несколько неожиданным, если учесть, что плотность меняется при этом скачком на значительную величину.

Тем не менее, была предложена модель Земли, основанная на постулате о непрерывности K_S . Предполагалось также, что плотность на глубине уже 200 км может быть достаточно велика. В итоге была получена модель Земли, названная модель "В" по Буллену.

Плотность в модели "В" практически совпадает с плотностью по Молоденскому, показанной на рис. 5.2. Только во внутреннем ядре в случае модели "В" имеем увеличенную плотность - кривая "В" на рис. 5.2.

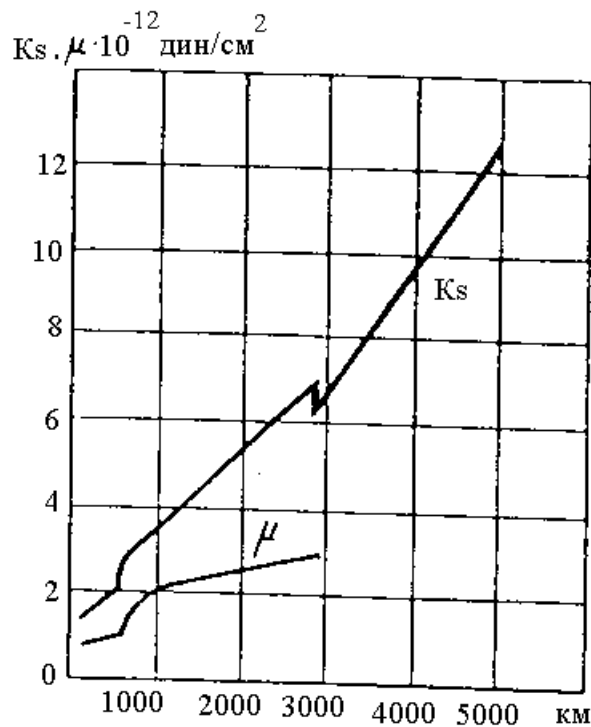


Рис. 5.5

Для плотности внутри Земли, кроме формул (5.10) и (5.11), можно получить прямую зависимость от скачка скоростей сейсмических волн, если предположить, что упругие модули зависят только от плотности:

$$\frac{V_P V_S^2}{(V_P V_S^2)_0} = \frac{\rho_0}{\rho} e^{3\gamma_0(1-\rho_0/\rho)}. \quad (5.14)$$

Сопоставление с моделью "А" Буллена дает полную согласованность с (5.14), применяемой в отдельности к каждому из слоев В, С, D.

Конечно, такое сопоставление не может быть доказательством справедливости принятой модели Земли.

Для оценки близости к истине той или иной модели Земли необходимо привлечение нового экспериментального материала. Такими новыми материалами в последние годы оказались данные наблюдений за собственными колебаниями земного шара. Именно эти сведения позволили отклонить ряд неудачных моделей Земли. В последние годы после камчатского 1952 г., чилийского 1960 г., аляскинского 1964 г. и других сильных землетрясений были измерены периоды более чем 100 тонов собственных колебаний Земли. Значения периодов наблюдавшихся волн, в общем, хорошо согласуются с расчетными для модели "А" Гутунберга - Буллена. И данные о таких периодах позволяют существенно улучшить модель строения Земли.

Основы способа расчета давления, его величины и характера изменения по радиусу Земли. Значение данных о плотности, силе притяжения и давлении для изучения состояния вещества и процессов во внутренних зонах Земли (Магницкий, 1965; с. 246-254). Если известен закон изменения плотности для Земли, то вычисление хода g и p не представляет труда, так как:

$$g(r) = f \frac{4\pi}{r^2} \int_0^r \rho(r')^2 dr', \quad (5.15)$$

$$dp = -g\rho dr. \quad (5.16)$$

На рис. 5.6 кривые 1 и 2 показывают изменение g и p внутри Земли в зависимости от плотности Земли, соответствующей модели "А" Буллена - Гутенберга. Из данных, представленных на этом рисунке, видно, что g на протяжении всей мантии Земли примерно постоянно.

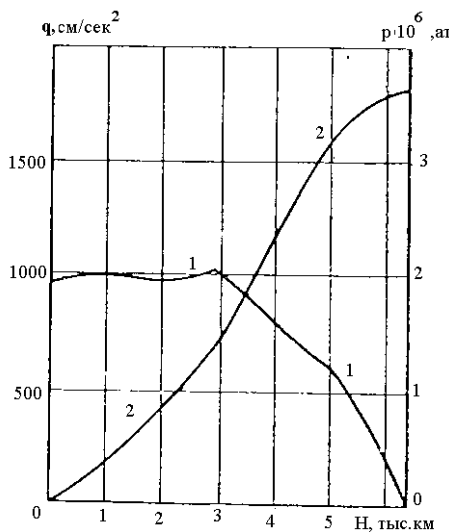


Рис. 5.6.

Новая модель геостазии (Тяпкин, 1998; с. 178-180). «Особенностью классических моделей изостазии является замена равновесного состояния Земли равновесным состоянием земной коры (литосферы). Эта замена, как полагает автор новой модели, отвечала уровню знаний о строении нашей планеты, когда земную кору представляли «плавающей» в субстрате (магме). В настоящее время накоплены данные, выводы из которых противоречат основным положениям классических моделей изостазии. Остановимся на некоторых из них.

Исходя из современных представлений о строении Земли, нельзя считать правомерной замену ее равновесного состояния равновесным состоянием земной коры. Такая замена представляет собой искусственное обособление одной части планеты от

тесно связанной с ней остальной ее части. При изучении равновесного состояния Земли ее надо рассматривать как единую систему.

Принятие первого тезиса неизбежно влечет за собой принятие второго, сущность которого заключается в следующем. До тех пор, пока решались частные геодезические задачи на ограниченных территориях или изучались особенности геологического строения отдельных районов, пренебрежение изменением ротационного режима Земли в какой-то мере можно было считать оправданным. (Здесь К.Ф. Тяпкин не точен. Как показано в четвертом разделе, учет вращения отдельно взятого блока приводит к принципиально новым выводам, например, появлению новой модели очага, напряжения в которой являются дальнодействующими. И такой эффект дальнодействия в силу тех или иных обстоятельств действительно можно не заметить, осуществляя исследования только на ограниченных по площади территориях. - А.В.) Но коль скоро ставится задача изучения равновесного состояния планеты в целом, определяемого ротационным режимом Земли (положением оси вращения, угловой скоростью и др.), не учитывать его изменения, по-видимому, нельзя. (Здесь К.Ф. Тяпкин опять не точен. Вращение Земли в классических теориях всегда учитывалось, так как равновесная форма планеты принималась в виде эллипсоида, что соответствует вращающейся планете. - А.В.).

Введем понятие равновесного состояния Земли в целом, назвав его *геоизостазией*. Геоизостазии должно соответствовать такое состояние Земли, которое она приняла бы, если бы слагающий ее субстрат в пределах каждой оболочки стал жидким, не смешиваясь. В этом случае нашу планету можно было бы охарактеризовать совокупностью уровенных поверхностей, представляющих собой систему сфероидов со все уменьшающимися коэффициентами сжатия, в формировании которых участвуют массы всей Земли, включая гидросферу и атмосферу. Строго говоря, в достижении геоизостазии должны участвовать и все физические поля Земли.

Рассмотрим условия достижения геоизостазии. В качестве условия равновесия Земли эквивалентного заокну Паскаля, использовавшемуся в классических моделях изостазии земной коры (литосферы), с учетом малости величины параметры сжатия ϵ , можно принять равенство веса секторов Земли, вырезанных одинаковыми центральными телесными углами $\Delta\Omega$. Количественно это условие соответствует интегральному выражению:

$$\Delta\Omega \int_0^{\infty} \rho(r)g(r)r^2 dr = const, \quad (5.17)$$

где $\rho(r)$ - изменения плотности в пределах изучаемого сектора Земли, например, задаваемого соотношениями (5.1) и (5.2), (5.1) и (5.7) или зависимостями, представленными на рис. 5.2; $g(r)$ - ускорение свободного падения в точках сектора на расстоянии r от центра Земли, например, задаваемого соотношением (5.15).

Выражение (5.17) можно представить также в виде трех интегралов

$$I_1 + I_2 + I_3 = const, \quad (5.18)$$

где

$$I_1 = \Delta\Omega \int_0^{R_i} \rho(r)g(r)r^2 dr, \quad I_2 = \Delta\Omega \int_{R_i}^{R_e} \rho(r)g(r)r^2 dr, \quad I_3 = \Delta\Omega \int_{R_e}^{\infty} \rho(r)g(r)r^2 dr,$$

где R_i, R_e - внутренний и внешний радиусы мантии Земли.

Парактически исходя из представлений о квазизидком внешнем ядре, величину I_1 можно считать постоянной. Справедливость этого утверждения непосредственно вытекает из известной теоремы: в случае равновесия жидкости уровенные поверхности являются в то же время и поверхностями равного давления (Михайлов, 1939). При решении вопроса о равновесном состоянии мантии Земли значениями интеграла I_3 , характеризующими атмосферное давление на земной поверхности, в связи с их

малостью по сравнению с I_2 можно пренебречь. С учетом приведенных замечаний выражение (5.17) принимает вид:

$$\Delta\Omega \int_{R_i}^{R_g} \rho(r)g(r)r^2 dr = const. \quad (5.19)$$

Вторым условием достижения геоизостазии примем равенство потенциала в каждой точке Земли его теоретическому значению, соответствующему введенному определению геоизостазии. Практически выполнение этого условия удобнее проверять на поверхности Земли, а вместо значений потенциала воспользоваться отметками геоида R_g и сфероида R_c . Разность этих отметок ζ можно принять в качестве критерия уравниваемости Земли. В частности, согласно введенному определению геоизостазии геоид можно признать находящимся в состоянии равновесия при условии выполнения равенства:

$$\zeta = R_g - R_c = 0. \quad (5.20)$$

В самом деле, если бы геоид стал жидким, т.е. ослабилась бы взаимосвязь между слагающими его твердыми частицами, то он принял бы фигуру равновесия – сфероид. Однако, поскольку существуют отклонения геоида от сфероида, обусловленные неоднородностями строения Земли, то должны существовать и напряжения, стремящиеся выровнять эти неоднородности, привести их в соответствие с фигурой ее равновесия. При этом, естественно, закон распределения напряжений будет определяться функцией отклонения геоида от соответствующего ему сфероида.

Приняв за критерий уравниваемости Земли величину отклонения геоида от сфероида ζ , можно определить *направленность* геологического развития тектоносферы. Она должна быть такой, чтобы «утяжелять» области с отрицательными значениями ζ и «облегчать» области с положительными значениями ζ . Назовем возможные физико-геологические процессы, участие которых в достижении геоизостазии наиболее вероятно.

Утяжеление отдельных областей Земли может быть осуществлено в результате следующих физико-геологических процессов: подъема блоков тектоносферы, приводящих к увеличению отметок геоида, заполнения опущенных участков геоида водой; оледенения участков земной поверхности; «пропитывания» гранитной оболочки более тяжелыми базальтоидами и гипербазитами (дайкообразование); образования траппов (платобазальтов); возможного перемещения глубинных границ вверх вследствие фазовых переходов вещества в мантии типа базальт $\leftrightarrow$ эклогит.

Разгрузка отдельных областей Земли может быть осуществлена в результате протекания следующих процессов: опускания блоков тектоносферы, приводящего к уменьшению отметок геоида; денудация выступающих блоков тектоносферы или таяния на них льда, возникшего в предыдущую эпоху оледенения; заполнения верхних частей блоков тектоносферы легкими магматическими образованиями кислого состава (гранитизация); возможного перемещения глубинных границ вниз вследствие фазовых переходов вещества в мантии типа базальт $\leftrightarrow$ эклогит.

Перечисленные выше процессы реализуются в рамках законов, установленных на основании принципа наименьшего действия (Клушин, 1963). В частности, в этой работе показано, что в пределах достаточно крупных секторов Земли местные изменения их радиусов должны обязательно сопровождаться вертикальным перераспределением плотности. Физическим законом, регулирующим перераспределение плотности в пределах секторов Земли, вырезанных телесными углами $\Delta\Omega$, является закон сохранения момента количества движения. В его интегральное выражение входит расстояние участвующих масс от центра планеты r в четвертой степени. Следовательно, наиболее существенным значением момента количества движения

обладают массы геосфер, удаленных от центра больше, чем на 0,8 радиуса Земли. В частности, момент количества движения Земли почти наполовину определяется массами, сосредоточенными в интервале глубин от 0 до 800 км, соответствующем *тектоносфере*».

Принцип минимизации – основной закон эволюции планет (Кузнецов, 2000; с. 86-89, 324-332). «Всем известно, что Земля, как и другие планеты, имеет форму шара. Однако мало кто обращает внимание на этот общеизвестный факт, который, тем не менее, указывает на то, что и Земля, и планеты, подвержены действию принципа минимизации гравитационной энергии. Выполнение этого принципа выражается как требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара.

Обратим внимание на ряд моментов, в той или иной степени связанных с гравитационной энергией и принципом её минимизации у Земли и планет. Во-первых, при оценке величины гравитационной энергии необходимо учитывать теорему вириала. Во-вторых, принцип минимизации “заставляет” планеты стремиться к гидростатическому равновесию. Пути достижения этой цели известны, это геодинамика, сейсмичность и вулканизм. В-третьих, действие принципа минимизации автоматически приводит к гравитационной дифференциации вещества планеты и т.д.

Теорема вириала. В самогравитирующей системе, состоящей из большого числа элементов, в отсутствие радиальных движений, полная кинетическая энергия E и потенциальная энергия P связаны между собой соотношением, называемым теоремой вириала:

$$2E + P = 0 \quad (5.21)$$

Поскольку полная энергия системы равна сумме кинетической и потенциальной, из 5.21 вытекает:

$$E = -1/2P.$$

Именно такую энергию необходимо затратить, чтобы разъединить систему на отдельные “частицы” на бесконечно большие расстояния.

Гравитационная энергия Земли рассчитывается из теоремы вириала следующим образом (Магницкий, 1965) ... Будем считать, что m_i и m_k - массы материальных точек на расстоянии r_{ik} , тогда потенциальная энергия системы точек (частиц) выражается как:

$$E = -G \sum m_i m_k / r_{ik}, \quad (5.22)$$

при этом за нуль принята энергия при бесконечном расстоянии между точками. Перегруппируем слагаемые в 5.22:

$$-E = 1/2 m_1 G (m_2 / r_{12} + m_3 / r_{13} + \dots + m_n / r_{1n}) + \dots \quad (5.23)$$

Если перейти от системы частиц в (5.22) объемному распределению масс с плотностью ρ , то получим:

$$E = -1/2 \int W \rho dV. \quad (5.24)$$

Для однородной сферы потенциал W на расстоянии l от центра будет:

$$W = 2\pi G \rho (R^2 - l^{2/3}), \quad (5.25)$$

после подстановки (5.25) в (5.24) получаем:

$$E = -3/5 GM^2 / R. \quad (5.26)$$

Гравитационная энергия Земли:

$$E \approx -2,25 \cdot 10^{39} \text{ эрг.}$$

Роль землетрясений в минимизации гравитационной энергии. Рассмотрим результаты работ, посвященных роли сильных землетрясений в изменении гравитационной энергии Земли (Chao, Gross, 1987; Chao, Gross, 1995; Chao et al., 1995). Авторы этих работ считают, что землетрясения, кроме энергии диссипации, выделившейся при разрушении, переносят значительное количество энергии и перераспределяют её между вращением Земли, упругим полем, гравитационным полем

и теплом. Авторы вычислили косейсмическое изменение глобальной гравитационной энергии, индуцированной 11015 большими землетрясениями, которые произошли с 1977 по 1993 гг., и полагают, что эти землетрясения привели за это время к весьма заметному (около 2×10^{12} Вт) уменьшению величины гравитационной энергии Земли. Это значительно больше, чем та доля энергии, которая пошла за это время на увеличение скорости вращения Земли (6.7×10^9 Вт) и больше энергии сейсмических волн (4.7×10^9 Вт).

Принято считать, что энергия землетрясения идет частично на разрушение, частично на нагрев, частично излучается в виде сейсмической волны. Это именно так, по мнению B.F. Chao и R.S. Gross, если не учитывать, что Земля самогравитирующая, вращающаяся система. Учет последнего обстоятельства приводит к необходимости принимать во внимание изменение статического поля деформаций Земли. Интегрированное по всему земному шару перераспределение масс, связанное с этим полем смещений, изменяет как момент инерции Земли, и скорость её вращения, так и гравитационное поле, и гравитационную энергию Земли. Изменение гравитационной потенциальной энергии равно работе, выполненной против силы тяжести веществом Земли при смещении $u(r)$:

$$\Delta E = - \int \rho(r)u(r)g(r)dV, \quad (5.27)$$

где $\rho(r)$ - плотность, $g(r)$ - ускорение силы тяжести, интегрирование выполняется по объему Земли V .

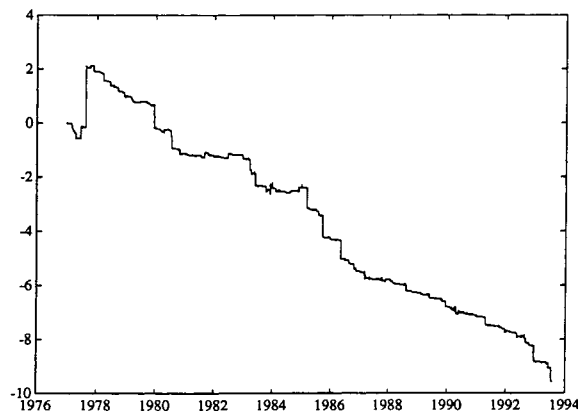


Рис. 5.7. Уменьшение кумулятивной гравитационной энергии Земли индуцированное 11015 землетрясениями в течение 1977 – 1993 г.г. (Chao, Gross, 1995)

B.F. Chao и R.S. Gross использовали данные Гарвардского каталога о величинах тензора сейсмического момента центраида ряда землетрясений с магнитудой больше 5, произошедших с 1977 по 1993 г.г. Обнаружилось, что землетрясения имеют неслучайное поведение, характеризуемое тенденцией к уменьшению гравитационной энергии Земли.

(Другими словами, одним из результатов, полученных B.F. Chao и R.S. Gross, по мнению В.В. Кузнецова, является утверждение о взаимосвязанности всех землетрясений планеты с магнитудами $M > 5$; при этом, механизм, объединяющий такую взаимосвязь, приводит к уменьшению гравитационной энергии Земли. Такой вывод является сильным аргументом, подтверждающим главное допущение в модели, разрабатываемой С.В. Мишиным (1993, с. 106): «землетрясение – это перемещение блока горных пород и удар при его остановке»; подробнее см. выше в разделе III, на с. 72 – А.В.)

На рис. 5.7 показано кумулятивное изменение гравитационной энергии, обусловленное 11015 большими землетрясениями. То, что землетрясения стремятся уменьшить гравитационную энергию Земли, подтверждает тот факт, что именно сила тяжести является их причиной и управляющим механизмом. B.F. Chao и R.S. Gross

вычислили, пользуясь данными Гарвардского каталога, изменение кумулятивной энергии этих землетрясений в течение этого же периода времени (рис. 5.8). Оба рисунка находятся в хорошем согласии, из них видно, что увеличение энергии сейсмических волн землетрясений, за один и тот же промежуток времени, примерно на три порядка меньше, чем убыль гравитационной энергии Земли. Основной вывод В.Ф. Чао и Р.С. Гросс состоит в том, что землетрясения «делают» Землю более компактной и, как ни странно, более напряженной.

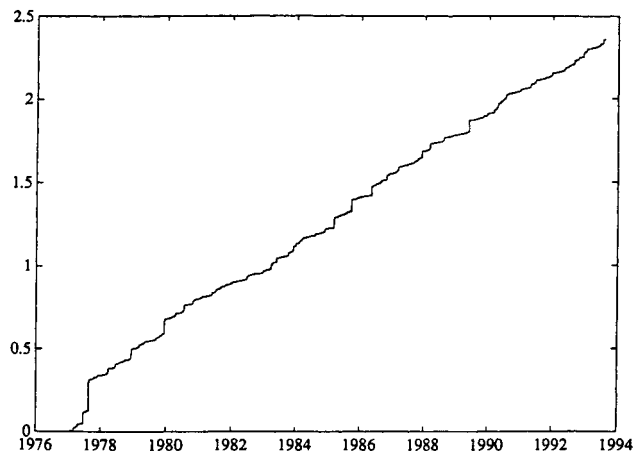


Рис. 5.8. Увеличение кумулятивной энергии сейсмических волн индуцированное 11015 землетрясениями в течение 1977 – 1993 г.г. (Chao, Gross, 1995).

Оценим порядок величины гравитационной энергии, теряемой Землей благодаря “работе” землетрясений. В год это составляет примерно 10^{27} эрг, или, иначе (хотя эта оценка большого смысла не имеет), землетрясениям потребовалось бы примерно 10^{12} лет для полной диссипации всей гравитационной энергии Земли. “Потери” гравитационной энергии примерно в 10 раз меньше теплового потока Земли.

Высота геоида. Представим потенциал силы тяжести Земли в виде суммы двух потенциалов (Серкеров, 1990):

$$W(x, y, z) = U(x, y, z) + T(x, y, z), \quad (5.28)$$

где U - потенциал силы тяжести, T - потенциал масс, на который потенциал силы тяжести Земли отличается от потенциала сфероида, т.е. T - это часть потенциала силы тяжести реальной Земли, связанная со значениями аномалий силы тяжести на поверхности Земли. Потенциал T называется возмущающим потенциалом. Тогда уравнение:

$$W(x, y, z) = U(x, y, z) + T(x, y, z) + C, \quad (5.29)$$

где C - постоянная, $T(x, y, z)$ - уравнение геоида, а $U(x, y, z) = C_1$, - уравнение нормального сфероида (C_1 - константа, соответствующая сфероиду).

Поверхность, ортогональная силе тяжести (а не силе притяжения), поверхность постоянного потенциала силы тяжести (хотя сама сила тяжести на нем не постоянна), поверхность, совпадающая со средним уровнем океана, называется геоидом. При движении тела вдоль поверхности геоида сила тяжести не совершает работы.

Геоид - ортогональная силе тяжести поверхность, всегда горизонтальна. При наличии аномальных глубинных масс, направления силы тяжести в разных точках поверхности не будут взаимно параллельны и ортогональная к ним поверхность будет отличаться от плоскости. В этом случае наблюдаются изменения формы геоида – т.н. ундуляции. Высота ундуляции геоида ζ показывает, насколько локальная поверхность геоида, отличается от геометрической плоскости. Как правило, изменение силы тяжести

Δg коррелирует с ζ . Рассмотрим пример. На глубине d находится масса m . Величины Δg и ζ над глубинной массой будут равны:

$$\Delta g = Gm/d^2; \quad \zeta = Gm/gd. \quad (5.30)$$

Известно, что на Земле $H/R \approx 10^{-3}$; $\Delta g/g \approx 10^{-4}$; $\zeta/R \approx 10^{-5}$. Здесь H - высота гор, а R радиус Земли. Складывается впечатление, что Земля лучше всего скомпенсирована по высоте геоида. Подставим значения: $\Delta g/g = (m/M)(R/d)^2$; $\zeta/R = (m/M)(R/d)$ и разделив ζ/R на $\Delta g/g$, получим, что это отношение $\sim d/R$. В нашем случае $d/R \approx 0.1$. Отсюда следует, что чем выше Земля скомпенсирована по высоте геоида ($\zeta/R \rightarrow \min$) относительно аномалий силы тяжести, тем о меньших величинах d можно говорить: $\zeta/d = \Delta g/g$ (сравни с (5.20) – А.В.).

Замечание по поводу сжатия Земли. Сжатие Земли $\varepsilon = (a_1 - a_2)/a_1 = 1/298.25$. Центробежное ускорение на экваторе $g_\omega = 3.39 \text{ см/с}^2$. Отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести Земли: $h = g_\omega/g = 1/289$. Сжатие жидкой Земли определяется из уравнения Клеро: $4/5 \varepsilon_g = \alpha$, откуда $\varepsilon_g = 1/232$ (оценка Ньютона). Обычно, для сравнения, приводится оценка по модели Гюйгенса, полагавшего, что вся масса Земли сосредоточена в её центре, т.е., казалось бы, радиус Земли $a = 0$. Тем не менее, принято считать, что можно оценить степень сжатия Земли по модели Гюйгенса:

$$\varepsilon_g = 1/2 [\omega^2 a^3 / (GM)] = 1/2 h = 1/578,$$

у Буллена – $\varepsilon_g = 1/580$.

Но ведь по модели Гюйгенса $a = 0$! Далее делается, на мой взгляд, совершенно неправильный вывод: так как обратное сжатие Земли ($1/298$) занимает промежуточное положение между $1/232$ и $1/578$, то это якобы говорит о характере распределения плотности по радиусу Земли, что неверно.

Принцип минимизации энергии. Принцип минимизации гравитационной энергии равнозначен известной в физике вариационной задаче о минимуме поверхностной свободной энергии:

$$\alpha \int dS = \min, \quad (5.31)$$

где α - поверхностное натяжение, а S - площадь поверхности раздела, в нашем случае, площадь поверхности гравитирующего шара радиусом R . Если поверхность раздела отличается от сферической, и можно говорить о двух радиусах R_1 и R_2 , немного отличающихся друг от друга, на поверхности возникает Δp - поверхностное давление:

$$\Delta p = \alpha (1/R_1 + 1/R_2) \approx 2\alpha/R. \quad (5.32)$$

Это известная формула Лапласа. Отсюда следует условие равновесия поверхности:

$$1/R_1 + 1/R_2 = \text{const.}$$

Если вся поверхность свободна, то это условие означает, что она должна иметь шарообразную форму.

Не учитывая вращения Земли, выполнение условия равновесия её поверхности, следующего из соблюдения принципа минимизации гравитационной энергии, приводит к стремлению Земли принять форму шара. Если учесть вращение, то равновесной формой будет сфероид, эллипсоид вращения. Земля достигнет гидростатического равновесия в тот момент, когда высота геоида в целом по Земле окажется равной нулю.

Если принять во внимание значение величины “поверхностного натяжения” литосферы α , полученное в рамках модели «горячей Земли» ($\alpha \approx 10^{19} \text{ дин/см}^2$), то поверхностное, лапласово давление оказывается вполне существенным: $p = 10 \text{ кбар}$. Такое давление способно “заставить” литосферу растекаться, аналогично тому, как это происходит с каплей жидкости.

На каких объектах может проявляться наш принцип минимизации гравитационной энергии? Можно ли оценить тот минимальный размер космического объекта, где принцип “начинает работать”? Из самых общих представлений ясно, что далеко не любой твердый объект способен “собираться в каплю”. В рамках модели горячей Земли было показано, что если:

$$GM/R \geq U_{\text{п}}$$

где $U_{\text{п}}$ - теплота плавления вещества планеты ($U_{\text{п}} \approx 10 \text{ кДж/г}$), то $R > 1$ тыс. км. Таким образом, все большие спутники и планеты подвержены действию этого принципа. Надо заметить, что интенсивно он проявляется только в том случае, если в недрах космического тела еще осталось вещество в метастабильном состоянии, подобное тому, что находится во внутреннем ядре Земли. Только у такого тела может происходить эффективное действие принципа минимизации, т.е. могут происходить циклы сжатия и расширения. Однако даже если уже нет необходимого запаса энергии на прохождение циклов, представляется, что на планете или большом спутнике могли бы происходить процессы минимизации её гравитационной энергии. Вполне возможно, что подобный процесс является причиной выделения диссипативной энергии, причиной вулканизма и сейсмичности Марса, Луны, Ио и др. Т.е., иначе, он является источником энергии на тех планетах и спутниках, на которых уже давно нет внутреннего ядра с его колоссальным запасом энергии. Хотя, с другой стороны, мы рассматриваем как источник энергии на таких объектах фазовый переход кристаллизации.

Механизмы реализации принципа минимизации. Выше мы называли их: это геодинамика, т.е. “течение” - горизонтальный перенос вещества литосферы; вулканизм и сейсмичность. Вулканизм и сейсмичность, в определенном смысле, являются механизмами вертикального (радиального) переноса. При этом либо переносится вещество, что происходит при излиянии вулкана, либо переносится тензор момента - при землетрясении. Легко видеть, что эти механизмы взаимосвязаны, хотя подчас такую связь выявить нелегко. Например, горизонтальный перенос изменяет структуру напряжений части литосферы, что вызывает возникновение землетрясения, которое приводит к перераспределению касательных напряжений, являющихся причиной течения и т.д. Аналогичную цепочку взаимосвязей можно проследить и при взаимодействии: геодинамика-вулканизм-геодинамика. Используя подходы, развитые в синергетике, можно считать, что горизонтальное течение, это «перенос», а сейсмичность и вулканизм, явления, по своей физике, близкие к “просачиванию” - перколяции. Как принято считать в синергетике, симбиоз взаимодействующих механизмов переноса и перколяции приводит к самоорганизации структуры, в которой проявляются эти механизмы.

Самоорганизующиеся системы описываются уравнением Фоккера-Планка (ФП):

$$\partial f(q, t) / \partial t = - \partial / \partial q (\gamma q f) + 1/2 Q \partial^2 / \partial q^2 (f), \quad (5.33)$$

где $K = \gamma q$ - коэффициент дрейфа, а Q - коэффициент диффузии. В нашей задаче K характеризует процессы горизонтального переноса - геодинамики, а Q - процессы сейсмичности или вулканизма, т.е. перколяции.

При решении уравнения ФП находятся стационарные решения, когда аргумент не зависит от времени, либо находятся решения, зависящие от времени, но не зависящие от координаты. Стационарное решение уравнения ФП для одномерного случая выглядит следующим образом:

$$f(q) = N \exp(-2V(q)/Q), \quad (5.34)$$

где $V(q) = - \int K(q) dq$, имеет смысл потенциала, а N - нормировочный множитель.

Физический смысл решения уравнения ФП можно представить как зависимость вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (энергия и т.п.) тем меньше вероятность появления этого решения. По-видимому, эта особенность (её называют “ $1/f$ ” фликкер-шумом) является фундаментальным свойством природы. Многие сейсмологи склонны считать график повторяемости землетрясений, известный как закон Гутенберга-Рихтера, фликкер-шумом. В этом случае он показывает, что в открытой диссипативной структуре, имеющей целью минимизировать гравитационный потенциал, или, что примерно одно и то же, минимизировать высоту геоида, происходят процессы самоорганизации. Т.о. мы приходим к важному выводу: реализация принципа

минимизации высоты геоида и стремление планеты к установлению гидростатического равновесия, сопровождается проявлением самоорганизации.

(Идея использования в задаче оптимизации формы Земли аналогии с поверхностным натяжением жидкостей и твердых тел крайне заманчива. Однако возникает много вопросов, ответы на которые пока не получены.

На наш взгляд, одним из главных является следующий. Оптимальная форма жидкости (и твердого тела, кристалла в том числе) определяется балансом между силой тяготения и молекулярными силами. Такой баланс и обеспечивает известные значения коэффициентов поверхностного натяжения для жидкостей и твердых тел, которые лежат в пределах четырех порядков: $1 - 10^4$ эрг/см². Получаемое из модели горячей Земли значение коэффициента натяжения поверхности Земли, равное 10^{19} эрг/см², на много (один – два десятка) порядков по величине превосходит эти известные значения. Какой физический механизм обеспечивает такое большое по величине натяжение поверхности Земли и как он соотносится с силами гравитации?

Относительно процессов самоорганизации (Тимошенко, 2003). «Была разработана концепция "самоорганизованной критичности" (Вак, 1997), позволившая понять генезис самоподобия основных черт эволюции открытых диссипативных систем разной сущности. Этот принципиальный результат был получен при компьютерном моделировании динамики лавин в статистически стационарном состоянии кучи песка при наличии внешних источника и стока песка, когда с кучи "сходят" песчаные лавины разных масштабов. Были выявлены особенности эволюции открытой диссипативной системы, проявляющиеся в наличии динамических всплесков разного масштаба для анализируемых величин (например, числа песчинок в лавине) при их кажущемся хаотическом распределении во времени; степенной характер совокупности формирующихся разнообразных интегральных распределений исследуемых динамических величин (законы Гутенберга-Рихтера, Ципфа-Парето, "фликкер-шум"), что характеризует масштабную инвариантность (скейлинг) на некотором интервале изменения аргументов; установлена определяющая роль эффектов инерции и диссипации в формировании указанных степенных распределений. Очевидно, что такое понимание физической сущности особенностей динамики модельных сложных систем, выявляемое при компьютерных расчетах, делает более осмысленным любой анализ состояния природных систем.

Однако расчеты на основе концепции "самоорганизованной критичности" не позволили продвинуться в решении практических проблем параметризации реальных процессов и структур, прогнозирования их динамики на основе анализа хаотических (временных, пространственных) серий измеряемых динамических переменных. Эта цель практически не была достигнута и при использовании численных методов анализа, разработанных на основе теории детерминированного хаоса (Шутер, 1988; Hegger, Kantz, Schreiber, 1999). В этих подходах предполагается, что даже одна измеряемая переменная может достаточно хорошо отражать общую динамику сложной системы, а топология общего аттрактора может быть восстановлена только из наблюдений динамики этой одной переменной, измеряемой в ходе экспериментального исследования на некотором временном интервале. При этом вводится многомерное фазовое пространство, в котором "размещается" траектория изучаемого динамического процесса. В качестве динамических параметров, совокупность которых может однозначно характеризовать происходящую в этих условиях эволюцию, вводятся корреляционная размерность аттрактора, характеристики сечения Пуанкаре, коэффициенты Ляпунова, энтропия Колмогорова. Однако заметных достижений в приложении данной методологии к анализу экспериментально измеряемых временных рядов, характеризующих динамику реальных природных процессов, пока нет». – А.В.)

Гидростатическое равновесие (на примере гравитационного поля планет). Приведем, для сравнения, особенности гравитационных полей планет и Луны. Возможно, это поможет нам разобраться в том, действует ли принцип минимизации

энергии при самогравитации других планет и спутников. Рассмотрим подробнее гравитационные поля Луны, Венеры, Марса и Меркурия. Эти объекты Солнечной системы, по нашей модели, находятся на различных этапах эволюции. Луна и Марс “выработали” доставшееся при образовании вещество внутреннего ядра. В пользу этого говорит то, что магнитное поле на них было, но генерация его уже прекратилась. Это означает, что на этих объектах закончился этап тектонической активности, связанной с функционированием фазового перехода “испарение-конденсация”. Несмотря на то, что Меркурий меньше Марса, на нем продолжается генерация дипольного магнитного поля и, как следует из нашей модели, фазовый переход еще продолжает “работать”. Это означает, что на Меркурии могут происходить процессы релаксации вещества внутреннего ядра и, как их следствие, циклы сжатия и расширения. (По видимому, именно наличию сравнительно большого внутреннего ядра Меркурий “обязан” столь большой величиной средней плотности). Естественно, что и на Луне, и на Марсе внутреннего ядра уже нет, не могут происходить и эволюционные циклы. На Венере, несмотря на то, что там магнитное поле не обнаружено, внутреннее ядро должно было бы ещё сохраниться. (Хотя это вопрос дискуссионный). Если это так, то там, возможно, должны происходить циклы, аналогичные земным. Таким образом, на Луне и Марсе могут наблюдаться эффекты некомпенсации гравитационных аномалий и большие ундуляции высот геоида. На Меркурии и Венере, как и на Земле, должен работать механизм гидростатического выравнивания.

Поверхности, аналогичные геоиду, определены для Луны, Марса и Венеры (Хаббард, 1987):

Луна. Эквипотенциальная поверхность Луны выглядит сигарообразной с большой осью, направленной к Земле. На карте селеноида (лунного геоида) видны “возвышения” гравитационного потенциала, соответствующие двум возвышениям - Морю Дождей и Морю Ясности, круговым бассейнам, базальтовым “морям”. Менее отчетливая структура соответствует Морю Кризисов. Гравитационные поднятия, коррелирующие с круговыми морями, называют масконами. Масконы, в основном, - положительные, но известны и отрицательные, например, Море Восточное.

По сравнению с геоидом, форма гравитационного поля Луны является очень неровной. Высоты селеноида достигают 500 метров, что в 10 раз больше, чем на Земле. Однако если учесть, что сила тяжести на Луне примерно $1/6$ земной, а средняя плотность составляет 0.6 от земной, то высота лунного геоида $h \sim 1/\rho g$, и должна быть больше примерно в 10 раз.

Меркурий. Карта высот геоида Меркурия ещё не построена. Наблюдения за поверхностью Меркурия говорят о том, что “он подвергся значительному изменению радиуса после образования литосферы” (Хаббард, 1987). Оценки, сделанные по данным фотогеологических измерений, показывают, что Меркурий подвергся уменьшению радиуса на величину примерно 1-2 км. С другой стороны, рассуждения на тему о внутреннем устройстве Меркурия и дифференциации его недр, приводят исследователей к выводу относительно возможного увеличения радиуса Меркурия примерно на 10 км (там же). (По всей видимости, можно считать, что на Меркурии происходят пульсации его размера).

Венера. Карта высот внешней уровенной поверхности Венеры известна (Хаббард, 1987). Основные высокие области Венеры, это земля Иштар, где расположены высочайшие вершины - горы Максвелла; область Бета и “суперконтинент” - земля Афродиты. Наибольшие отклонения высот «геоида» Венеры близки к земным и составляют 60 - 80 м. Более точная информация о гравитационном поле Венеры представлена на карте вертикальной компоненты ускорения силы тяжести на высоте 200 км, полученная по измерениям орбитальной станции “Пионер-Венера” (там же). Максимальные отклонения Δg не превышают 100 мГал, что примерно соответствует гравитационному полю Земли.

Марс. Как известно, марсианские вулканы в области Фарсида достигают высоты 20 км. Характерные диаметры этих вулканов так же весьма значительны: 500 - 600 км, что намного превышает размеры земных вулканов. На Марсе нет следов плитной тектоники, зато явно наблюдаются разрывы и растяжения. Карта высот ареоида (марсианского геоида) показывает очень большие величины, достигающие километра и более. Эта негидростатическая вариация ареоида соизмерима с разницей между полярным и экваториальным радиусами (18 км).

Юпитер и другие "гиганты". Неизвестно, есть ли карта высот геоида Юпитера и других планет "гигантов", по всей видимости, она ещё не построена. Известно, что гравитационное поле Юпитера обладает "удивительной" симметрией. Это может говорить о том, что Юпитер хорошо гидростатичен.

Выводы. Приведенные данные по гравитационному полю планет и Луны подтверждают наши представления о том, что планета, которая находится в состоянии тектонической активности, за счет следующих один за другим циклов расширения и сжатия способна поддерживать гидростатическое равновесие. И наоборот, если на ней тектоническая активность прекратилась, то гравитационное поле такой планеты (спутника) очень несимметричное, а ундуляции геоида очень велики. Вполне возможно, что и на этих планетах происходит гидростатическое выравнивание, аналогичное тому, что имеет место на Земле в настоящее время, т.е. растекание литосферы и связанные с ней сейсмичность и вулканизм.

Анализируя приведенные данные, можно сделать еще один вывод, который касается влияния вращения на процесс гидростатического выравнивания, иначе, минимизации гравитационной энергии. Оказывается, вращение (планеты, как целой – А.В.) здесь не играет заметной роли, хотя, казалось бы, соблюдение принципа равенства угловых моментов и их перераспределение между различными частями гравитирующего шара, давало бы преимущество Земле по сравнению с Венерой. Однако, т.к. величины высот геоида на этих планетах практически равны, этот фактор, по-видимому, не играет заметной роли.

Распределение плотности. Определим распределение плотности гравитирующего шара, исходя из принципа минимизации гравитационной энергии (Шен, 1984). Запишем требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара, в математической форме (Магницкий, 1965):

$$\Omega = - 2\pi \int_0^R \varphi \rho r^2 dr \quad (5.35)$$

где φ – гравитационный потенциал, $\rho = \rho(r)$ – плотность, R – радиус шара (планеты). Минимизировать функционал (5.35) можно лишь одним способом, посредством преобразования функции $\rho = \rho(r)$. Эта функция должна удовлетворять заданным значениям массы планеты M и момента инерции I (второму и третьему соотношению в (5.1) – А.В.):

$$\left. \begin{aligned} M &= 4\pi \int_0^R \rho r^2 dr \\ I &= 8/3\pi \int_0^R \rho r^4 dr \end{aligned} \right\} \quad (5.36)$$

Определим распределение плотности по радиусу гравитирующего шара:

$$\rho_{max}(r) \geq \rho(r) \geq \rho_{min}(r), \quad 0 \leq r \leq R \quad (5.37)$$

Условия (5.35), (5.36) и (5.37) необходимы и достаточны для того, чтобы поставить вариационную задачу с целью определения закона распределения плотности, удовлетворяющего принципу минимизации гравитационной энергии шара. Решение имеет вид (Шен, 1984):

$$\rho(r) = \rho_{\max}(r), \quad 0 \leq r \leq R \quad (5.38)$$

Этот результат соответствует однородности планеты в начальном состоянии равновесия. Решение включает и тот случай, когда планета неоднородна, но компоненты ее вещества равномерно перемешаны. При этом возможно протекание процессов гравитационной дифференциации. (Заметим, что возникающий при этом вопрос о неизменности радиуса планеты принято считать очевидным и даже не обсуждать).

Ситуация с возможным переносом (перераспределением) масс в процессе эволюции планеты вполне обоснована. Формулируем постановку задачи, следуя (Шен, 1991): каким должно быть перемещение масс внутри планеты (какой должна быть структура вариации плотности), чтобы оно привело к наименьшему значению гравитационной энергии при неизменных массе и моменте инерции. Отличием этой задачи от предыдущей является то, что нуль становится внутренней точкой области допустимых значений вариации $\delta\rho(r)$ для каждой точки $r_o \leq r \leq R$. Решение задачи оказывается разрывным:

$$\left. \begin{aligned} \delta\rho(r) &= \delta\rho_{\max}(r), & 0 \leq r \leq r_G, \\ \delta\rho(r) &= \delta\rho(r), & r_G \leq r \leq r_o, \\ \delta\rho(r) &= \delta\rho_{\min}(r), & r_o \leq r \leq R. \end{aligned} \right\} \quad (5.39)$$

Здесь $\delta\rho_{\max}$, $\delta\rho$, и $\delta\rho_{\min}$ - границы области допустимых значений $\delta\rho(r)$, а r_o и r_G - первая и вторая точки разрыва непрерывности вариации.

Полученная вариация должна превращать однородную модель в многослойную. Причем, отметим, что этот переход может происходить только при увеличении объема модели. (Заметим, что применение принципа наименьшего действия (Клушин, 1963) приводит к несколько другому условию – вертикальному перераспределению плотности (с. 148) – А.В.)

Таким образом, принятые нами очевидные предположения о минимуме гравитационной энергии, постоянстве массы и момента инерции планеты приводят к выводу об её расширении (? – в свете нашего предыдущего замечания – А.В.) в процессе эволюции. Использование принципа минимизации гравитационной энергии естественным образом приводит к минимизации времени образования планеты, во-первых. Во-вторых, перемещение масс (по (Клушин, 1963) – перемещение плотности – А.В.) вдоль по радиусу, происходящее при превращении однородной модели в многослойную, должно сопровождаться ответным перемещением масс в обратную сторону, таким образом, чтобы соблюдалось постоянство момента импульса (рис. 5.9). И, наконец, гравитирующий шар (звезда, планета, большой спутник) рассматривается как саморегулирующаяся, самоорганизующаяся система в терминах теории самоорганизации и оптимальных процессов».

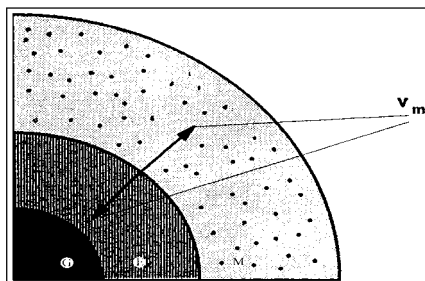


Рис. 5.9. Перенос массы: положительной (наружу, в направлении увеличения радиуса Земли) при формировании мантии и “отрицательной” (внутрь), - при формировании внешнего ядра, при выполнении условия соблюдения постоянства момента импульса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Буллен К.Е.** Плотность Земли. М. Мир. 1978. 442 с.
2. **Гутенберг Б.** Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 264 с.
3. **Клушин И.Г.** Взаимосвязь тектонических напряжений и магматизма Земли на основе вариационного принципа наименьшего действия // Зап. ЛГИ. 1963. Т. 46. Вып. 1. С. 33-50.
4. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
5. **Магницкий В.А.** Внутреннее строение и физика Земли. М. Недра. 1965. 379 с.
6. **Мишин С.В.** Элементы сейсмометрии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 1993. 167 с.
7. **Молоденский М.С.** Плотность и упругость внутри Земли // Труды ГеоФИАН СССР. 19 (146). 3. 1953.
8. **Молоденский М.С., Еремеев В.Ф., Юркина М.И.** Оценка точности ряда Стокса и некоторые попытки уточнения его теории // Тр. ЦНИИГАиК. 1962. Вып. 145. С. 3-21.
9. **Серкерев С.А.** Теория гравитационного и магнитного потенциалов. М. Недра. 1990. 304с.
10. **Тяпкин К.Ф.** Физика Земли. Киев: Вища школа. 1998. 312 с.
11. **Хаббард У.** Внутреннее строение планет. М. Мир. 1987. 327 с.
12. **Шен Э.Л.** Расширение Земли в связи с формированием её глобальной структуры // Проблемы расширения и пульсаций Земли. М. Наука. 1984. С.180-185.
13. **Шен Э.Л.** Типы внутренней структуры Земли и возможные схемы эволюции Земли и планет. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 2. С. 18-25.
14. **Шустер Г.** Детерминированный хаос: Введение. М.: Мир. 1988. 240 с.
15. **Bak P.** How nature works: The science of self-organized criticality/ Oxford: Oxford Univ. press. 1997. 212 p.
16. **Chao B.F., Gross R.S.** Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes // Geophys. J.R. astr. Soc. 1987. V. 91. P. 569-596.
17. **Chao B.F., Gross R.S.** Changes in the Earth's rotational energy induced by earthquakes // Geophys. J. Int. 1995. V. 122. P. 776-783.
18. **Chao B.F., Gross R.S. and Dong D-N.** Changes in global gravitational energy induced by earthquakes // Geophys. J. Int. 1995. V. 122. P. 784-78.
19. **Hegger R., Kantz H., Schreiber T.** Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package // Chaos. 1999. V. 9. N 2. P. 413-435.

VI. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ И СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

Из истории наблюдений (Буллен, 1978).

Глобальные волны геоида, отсутствие их связи с особенностями строения земной коры и вероятная интерпретация их появления на основе: представления о наличии плотностных неоднородностей в верхней мантии (гипотезы происхождения последних), крупномасштабных форм рельефа фазовых границ в слое "С" и на границе мантия – ядро (Магницкий, 1965).

Аномалии силы тяжести. Поправка за высоту. Аномалия в свободном воздухе (аномалия Фая). Поправка за притяжение промежуточного слоя (аномалия Буге). Принципы изостазии (Магницкий, 1965; Ботт, 1974; Орленок, 2000).

Отклонения от принципа изостазии. Изостазия и колебательные движения земной коры. Проблема вековых изменений силы тяжести. Сопоставление данных наблюдений для Земли с гидростатической теорией (Магницкий, 1965).

Из истории наблюдений (Буллен, 1978). Ускорение силы тяжести на поверхности Земли в соответствии с законом тяготения Ньютона в первом приближении (в пренебрежении вращения планеты) в соответствии с (2.2), (2.5) зависит от гравитационной постоянной G , массы Земли M и ее радиуса « a »: $g = \frac{GM}{a^2}$. Определение

этих величин было начато достаточно давно. По-видимому, результатом измерения уменьшения высоты объектов при удалении их за горизонт на море явилось получение первой оценки длины окружности Земли, которая была получена в древней Греции. Аристотель (384 – 322 гг. до н. э.) ссылается на величину, которая приблизительно в два раза превышает правильное значение.

Самое древнее из известных описаний метода оценки окружности Земли оставил Эратосфен (ок. 276 – 194 гг. до н. э.). Во время летнего солнцестояния он измерил разность высот Солнца в полдень в Сиене (современный Асуан) и Александрии и получил ее с точностью, вероятно, около 25%. В дальнейшем греки уточняли эту оценку.

В 723 г. н. э. Во время правления династии Тан китайский астроном И-Синь (683 – 727 гг.) возглавил отряд по измерению длины теней от предметов, освещаемых Солнцем, и высот Полярной звезды. В результате он получил, что протяженность одного градуса дуги составляет $L = 132,3$ км, что выше истинного приблизительно на 20%.

В период правления калифа аль-Мамуна, сына известного Гаруна-аль-Рашида, в 814 г. арабы получили значение $L = 90$ км, что ниже истинной примерно на 20%.

Около 1000 г., за семь столетий до применения маятника для определения силы тяжести и фигуры Земли, арабский астроном Ибн Юнис измерил время с помощью маятника. Результаты его астрономических наблюдений были использованы спустя восемь веков как доказательство изменений эксцентриситета земной орбиты.

Следующая известная работа по определению размеров Земли была выполнена после кругосветного путешествия, когда сферичность Земли получила всеобщее признание. В 1527 г. Френель в Париже, чтобы измерить L , подсчитал число оборотов колеса экипажа и получил результат, эквивалентный длине окружности Земли, равной 36500 км. Эта оценка уточнялась сначала Снелиусом, а затем Норвудом. И, наконец, Пикар с использованием телескопа для измерения углов и из измерений звезды в созвездии Кассиопея пришел к выводу, что вблизи Парижа $L = 111,2$ км.

Полеченное Пикаром значение с точностью 0,1% совпадает с современным значением L . Таким образом, размеры Земли были теперь установлены достаточно надежно, что позволило бы оценить среднюю плотность планеты, если бы появились сведения о ее массе.

Дальнейшее продвижение вперед тесно связано с именем Ньютона.

После экспериментальных определений величины ускорения свободного падения $g = 9,8 \text{ м/сек}^2$, оказалось возможным определить произведение GM . Согласно лучшей современной оценке, $GM = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{сек}^2$.

Теперь значения G и M по отдельности можно найти из любого эксперимента, в котором определяется одна из этих величин. Экспериментальное определение величины G показало, что $G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$. Таким образом, для массы Земли и ее средней плотности были получены значения $M = 5,975 \cdot 10^{27} \text{ г}$, $\rho = 5,517 \text{ г/см}^3$.

Определение сплюснутости Земли в наше время тесно связано с определением ее момента инерции I . Однако вполне пригодные оценки сплюснутости Земли были получены задолго до того, как удалось определить величины M и I .

Впервые идея сплюснутости Земли была высказана в работе историка и географа Страбона приблизительно в 5 г. до н. э. Страбон ссылается на предположение о приподнятости экваториальных областей Земли, на которое обратил внимание более древний историк Полибий (ок. 203 – 120 гг. до н. э.). Ко времени Ньютона наблюдения Доминика Кассини и Флемстида показали, что фигура Юпитера значительно отклоняется от сферы, и предполагалось, что это же относится и к другим планетам.

Предположение о суточном вращении Земли, служившее предметом дискуссий во времена Аристарха (ок. 310 – 230 гг. до н. э.), было разработано Коперником в 1530 – 1543 гг. и получило полное признание во времена Ньютона, хотя наглядные доказательства вращения Земли вокруг своей оси – такие, как маятник Фуко (1851 г.) – появились значительно позже. В 1673 г. Гюйгенс дал удовлетворительное объяснение центробежной силы, а Ньютон применил его к рассмотрению сплюснутости Земли.

Пусть a и c – большая и малая полуоси поверхности Земли, которая предполагается сфероидальной. Эллиптичность, или сжатие, ε определяется выражением (2.21)

$$\varepsilon = (a - c)/a.$$

Пусть h – отношение центробежной и гравитационной сил на экваторе, которые сами равны $a\omega^2$ и GM/a^2 . Ньютон рассчитал, что $h = 1/289$. Затем, рассматривая Землю как вращающуюся жидкую массу постоянной плотности и предполагая, что ее поверхность имеет сфероидальную форму, он путем точных вычислений получил $\varepsilon = 5h/4$ и, следовательно, $\varepsilon = 1/230$. Это была первая оценка сплюснутости (сжатия) земной поверхности.

К тому времени астрономы уже использовали маятниковые часы. В 1672 г. Рише обнаружил, что часы, верно отсчитывающие секунды в Париже (49^0 с. ш.), отстают приблизительно на 2,5 минуты в сутки в Кайенне (5^0 с. ш.). Тем временем один из членов Парижской академии предположил, что на экваторе тело весит меньше, чем на полюсах. Ньютон затем теоретически рассчитал вес тела в разных точках планеты и получил общее согласие с реальными наблюдениями над маятниками.

К началу XIX столетия средняя плотность Земли была известна с точностью до 1%; теория тяготения представлена в изящной математической форме и применялась к целому ряду проблем, возникающих при изучении вращающейся Земли; геодезия была поставлена на научную основу; с хорошей точностью известно сжатие Земли и до некоторой степени разработана теория распространения возмущений в деформированной среде, и эту теорию можно было применять к изучению Земли.

Однако существовал предел, до которого могло быть детально выявлено внутренне строение Земли, и только сейсмология, обеспечивающая прямую информацию о некоторых механических свойствах вещества на определенных глубинах, привела к дальнейшему прогрессу в познании физики твердой Земли в XX веке.

Глобальные волны геоида, отсутствие их связи с особенностями строения земной коры и вероятная интерпретация их появления на основе: представления о наличии плотностных неоднородностей в верхней мантии (гипотезы происхождения последних), крупномасштабных форм рельефа фазовых границ в слое "С" и на границе мантия – ядро

(Магницкий, 1965; с. 209-213; 224). Топографическая поверхность Земли крайне нерегулярна. В геофизике под фигурой Земли подразумевают некоторую условную поверхность, близкую к поверхности реальной Земли.

Если бы Земля была жидкой вращающейся планетой, то для определения ее фигуры, как показано в разделе 2, достаточно знать выражение внешнего потенциала силы тяжести; тогда поверхность Земли была бы уровенной поверхностью и ее уравнение определялось бы значением внешнего потенциала на поверхности планеты (2.1), (2.18). При этом определении фигура планеты связывается с такими физическими параметрами, как распределение масс внутри планеты и ее угловая скорость вращения. Поэтому, хотя Земля не находится в гидростатическом равновесии, в геофизике фигура Земли определяется с помощью (2.1); эта фигура именуется геоидом. Три четверти поверхности Земли покрыто океанами. Естественно, невозмущенная ветровыми течениями поверхность океанов совпадает в точности с поверхностью геоида, а на суше геоид располагается под поверхностью континентов.

Геоид строится в два приема аналогично тому, как внешнее поле тяготения разделяется на нормальное и возмущенное. Вначале определяют основную фигуру отсчета – нормальную фигуру, а затем определяют высоты геоида (малые по величине) – расстояния геоида от нормальной фигуры. На первый взгляд можно получить хорошее приближение, если за нормальную фигуру выбрать ньютоновскую сферу со средним радиусом R_0 и средней плотностью. Так как отклонение внешнего потенциала от ньютоновского (MG/r) порядка сжатия ε , то средние высоты геоида над сферой будут порядка $\varepsilon R_0 \approx 21$ км. Эта величина мала по сравнению с размерами Земли, но велика по сравнению с характерными высотами рельефа. Поэтому за нормальную фигуру выбирают эллипсоид вращения, который является эквипотенциальной поверхностью для нормального потенциала. Этот эллипсоид иногда называют *референц-эллипсоидом*; значения определяющих его параметров a и ε известны с достаточно высокой точностью.

Нормальный эллипсоид является весьма хорошим приближением для геоида. Действительно, внешний потенциал отклоняется от нормального на величину порядка ε^2 . Следовательно, отклонение геоида от нормального эллипсоида (высоты геоида) порядка $\varepsilon^2 R_0 \approx 70$ м.

Карта высот геоида, определенная по данным гравиметрических наблюдений, представлена на рис. 6.1.

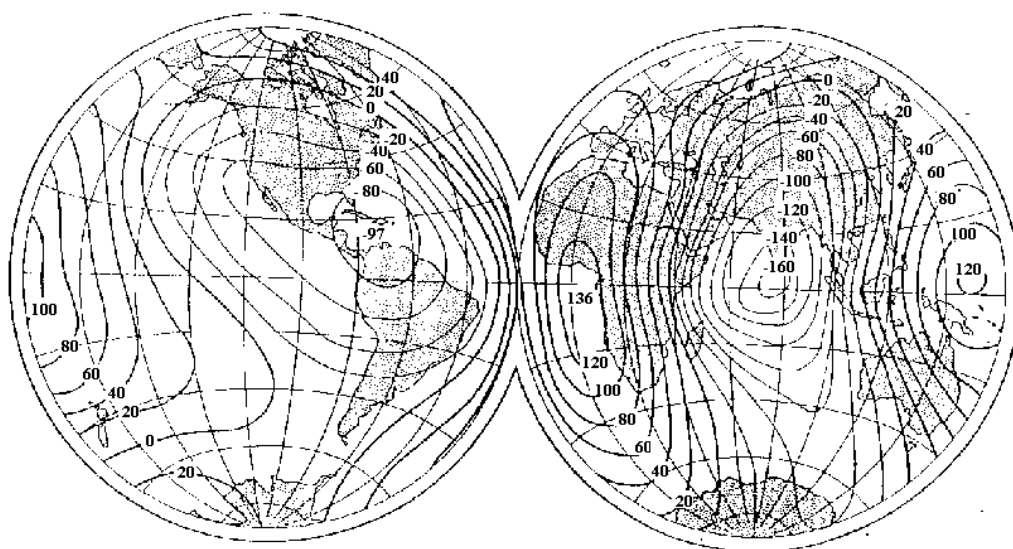


Рис. 6.1. Карта высот геоида (в м), составленная по данным гравиметрических наблюдений.

Видна вполне определенная закономерность в расположении минимумов и максимумов высот геоида вдоль поверхности Земли – так называемые волны геоида. К недостаткам карты, представленной на рис. 6.1, можно отнести неравномерное покрытие поверхности Земли гравиметрической съемкой, что приводит к ошибкам в определении соответствующих коэффициентов ряда разложения потенциала по сферическим функциям.

Наиболее правильное представление о волнах геоида дают коэффициенты разложения потенциала по сферическим функциям, полученные при обработке наблюдений за движениями искусственных спутников. На рис. 6.2 приведена карта высот геоида, определенная таким путем.

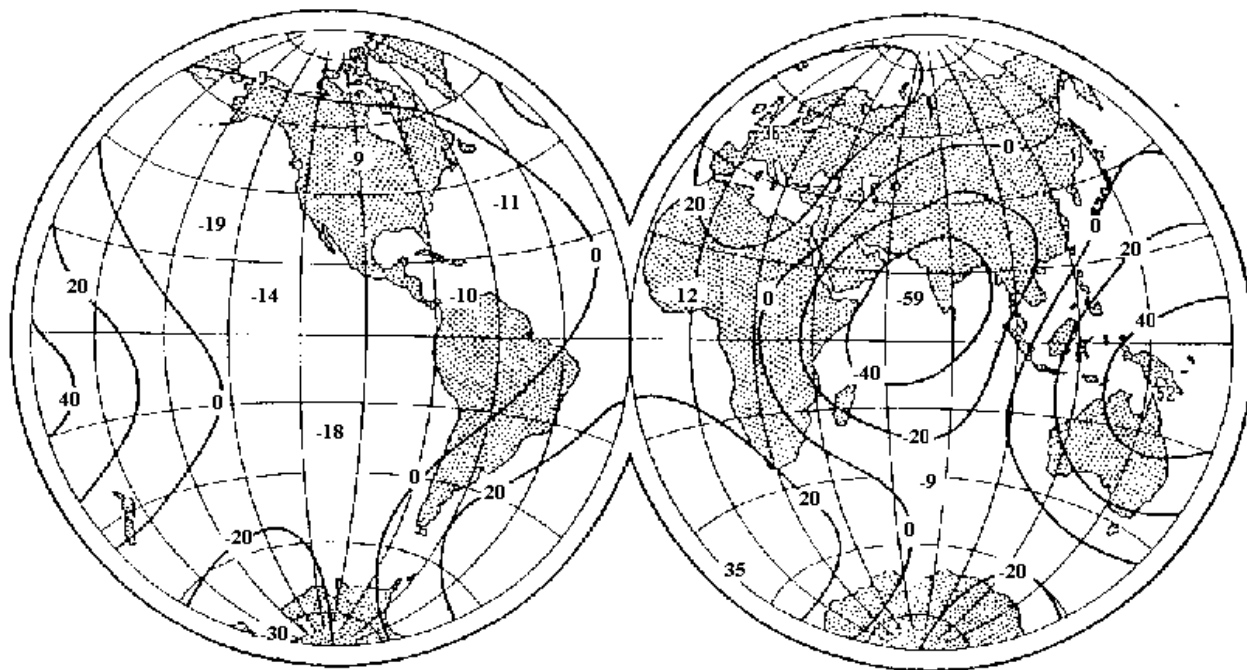


Рис. 6.2. Карта высот геоида (в м), составленная по данным, полученным при обработке наблюдений за движением искусственных спутников.

Отметим, что, несмотря на различие, основные черты геоида прослеживаются на обеих картах: глубокий минимум Индийского океана и максимум к северу от Австралии, меньший минимум в Америке и прилегающей части Тихого океана и Африканско - Европейский максимум. Это свидетельствует о том, что общий характер геоида уже выявлен.

Основные отклонения гравитационного поля Земли от нормальной части характеризуются картами высот геоида (рис. 6.1, 6.2). Сопоставление этих отклонений с основными элементами рельефа земной поверхности показывает отсутствие связи между ними как в смысле их размещения по поверхности Земли, так и по интенсивности.

Таким образом, мы приходим к выводу о независимости высот геоида (аномалий гравитационного поля) от строения земной коры, так как области одного знака ложатся совершенно независимо на участки, как с континентальным, так и с океаническим типом земной коры. Тогда наиболее правдоподобным будет предположение, что источники этих нарушений гравитационного поля лежат на значительных глубинах – в мантии Земли. Это подтверждает и обширность (масштаб) создаваемых нарушений.

Из независимости расположения высот геоида относительно рельефа следует важнейший вывод, что континентальные области изостатически скомпенсированы; материки плавают в подкоровом субстрате подобно айсбергам в полярных морях.

Степень подкорового равновесия, существующего в континентальных масштабах (установленная по форме геоида, полученная из спутниковых данных), связана с наблюдаемым сжатием Земли. Но величина сжатия показывает существенное отклонение от состояния гидростатического равновесия. (Действительно, из соотношений (2.25 а) и (2.29) следует, что динамическое сжатие Земли $\varepsilon_H = 1/299,7$ меньше сжатия $\varepsilon = 1/298,26$, определенного в предположении гидростатического равновесия. Т. е. Земля сжата примерно на 0,5% сильнее, чем следует из гидростатической теории.) Примем, что в мантии верхние несколько сот километров, которые, по-видимому, обеспечивают гидростатическую компенсацию, находятся в гидростатическом равновесии в поле силы тяжести, содержащем первые члены разложения потенциала по сферическим функциям, включая член, связанный со сжатием Земли. Допустим, что гидростатически неравновесная часть сжатия определяется большими глубинами. Если верхняя мантия мало влияет на отклонение от гидростатического равновесия, то нижняя часть мантии должна быть соответственно еще дальше от гидростатического равновесия. Тогда она должна обладать достаточной прочностью, сохраняющейся миллионы лет. Этот вывод важен для выяснения реологических свойств мантии; в частности, он противоречит предположениям о существовании конвективных течений в нижней мантии Земли.

Аномалии силы тяжести. Поправка за высоту. Аномалия в свободном воздухе (аномалия Фая). Поправка за притяжение промежуточного слоя (аномалия Буге). Принципы изостазии (Магницкий, 1965; Ботт, 1974; Орленок, 2000).

Аномалии силы тяжести. Представляя фигуру Земли эллипсоидом вращения и вводя понятие геоида, мы полагаем, что масса Земли сложена однородным по плотности веществом. При этом изменение силы тяжести на поверхности Земли должно быть обусловлено лишь изменением по широте потенциала центробежной силы и различием в экваториальном и полярном радиусах. Однако в реальных условиях характер изменения силы тяжести отличается от теоретического нормального распределения, рассчитанного для поверхности однородного геоида, или эллипсоида. Такого рода отклонения силы тяжести от нормальной величины вызваны неоднородным распределением плотностей в теле Земли и особенно в верхних частях.

Разность между наблюдаемым ускорением силы тяжести g и нормальной величиной γ_0 , полученной по международной формуле нормальной силы тяжести, принятой в 1971 г. в Москве:

$$\gamma_0 = 978,0318(1 + 0,0053024\sin^2\varphi - 0,0000059\sin^2 2\varphi),$$

где φ - широта, называется аномалией силы тяжести Δg :

$$\Delta g = g - \gamma_0. \quad (6.1)$$

Аномалии силы тяжести создаются главным образом неоднородным распределением плотностей в земной коре и верхней мантии. Однако чтобы выявить эту неоднородность, простого вычитания из наблюдаемой силы тяжести нормальной составляющей оказывается недостаточно. Дело в том, что величина силы тяжести зависит от целого ряда факторов, в первую очередь, от географической широты и высоты места (относительно уровня моря), рельефа окружающей местности, характера плотностных неоднородностей в верхних слоях Земли под точкой наблюдения и др. Для исключения влияния этих факторов в наблюдаемое значение Δg вводят поправки или, как их еще называют, редукции. Название редукции определяет название аномалии силы тяжести.

Поправка за высоту. Аномалия в свободном воздухе (аномалия Фая). При проведении гравиметрических наблюдений на земной поверхности точки наблюдения, как правило, располагаются выше уровня моря. Для того чтобы наблюдаемые значения силы тяжести могли быть сопоставимы между собой, их приводят к уровню моря, вводя поправку «за высоту». Смысл этой поправки заключается в следующем.

Сила тяжести на уровне моря определяется из известного выражения:

$$g = GM / R^2. \quad (6.2)$$

Если же точка наблюдения расположена на некоторой высоте H от уровня моря, то ее притяжение определится выражением:

$$g_1 = GM / (R + H)^2. \quad (6.3)$$

Сила тяжести изменится на величину:

$$\delta g_1 = g - g_1 = GM \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{(R + H)^2} \right) = \frac{GM}{R^2} \left[1 - \left(1 + \frac{H}{R} \right)^{-2} \right].$$

Разлагая выражение в круглых скобках по биному Ньютона и ограничиваясь первым членом разложения, получим:

$$\delta g_1 = 2GMH / R^3 \approx 2gH / R.$$

Подставляя средние для всей Земли значения $g = 980,6$ гал и $R = 6371,2$ км получим:

$$\delta g_1 = 0,3086H, \quad (6.4)$$

где высота H измеряется в метрах.

Получено выражение для нормального вертикального градиента силы тяжести для не вращающейся Земли. Точное выражение этого градиента получим с учетом потенциала центробежного ускорения $2\omega^2 H$. Например, для $H=1000$ м величина

$$2\omega^2 H = 1,058 \cdot 10^{-8} (\text{сек}^{-2}) \cdot 10^{-5} (\text{м}) \approx 1 \text{ мгал}.$$

Важность учета этой поправки очевидна, особенно для сильнопересеченной местности. В общем случае для величины поправки за высоту получаем выражение:

$$\delta g_1 = 0,3086H + 2\omega^2 H. \quad (6.5)$$

Полученная формула характеризует нормальное изменение силы тяжести с высотой. С учетом полученной поправки за высоту можно вычислить аномалию силы тяжести в свободном воздухе как разность наблюдаемого и редуцированного к точке наблюдения нормального значения силы тяжести (формула Гельмерта или Кассиниса):

$$\Delta g_1 = g - \gamma_0 + 0,3086H. \quad (6.6)$$

Получаемая по формуле (6.6) аномалия называется аномалией в свободном воздухе или аномалией Фая.

Следует отметить, что при введении поправки за свободный воздух влияние масс (плотностных неоднородностей), лежащих между уровнем точки наблюдения и уровнем моря, не учитывается. Однако на самом деле между уровнем наблюдения и уровнем моря залегают породы, обладающие определенной плотностью. Наличие таких пород увеличивает наблюдаемое значение силы тяжести, и чем выше точка отстоит от уровня моря, тем больше их влияние. Этот эффект наиболее ощутим при наблюдениях в горной местности. На равнине редукция за высоту будет постоянна.

Таким образом, аномалия в свободном воздухе отражает суммарное влияние плотностной неоднородности горных пород и влияние дополнительных масс, вызванное рельефом. Поэтому в условиях расчлененного рельефа с большим перепадом высот (порядка нескольких сотен метров) аномалия в свободном воздухе в значительной степени будет отражать топографию, в то время как гравитационный эффект плотностных неоднородностей верхних этажей геологического разреза Земли будет замаскирован. Исключение, как уже отмечалось, составляют равнинные участки с небольшими перепадами рельефа. В этих условиях аномалия в свободном воздухе может быть использована для изучения глубинной структуры.

Представляет определенный интерес данные рис. 6.3, на котором представлены усредненные по достаточно большим ($5^0 \cdot 5^0 \approx 500 \text{ км} \cdot 500 \text{ км}$) участкам поправки Фая. Как видно из данных, представленных на этом рисунке, значения аномалий Фая, определенные для мест, расположенных практически во всем земном диапазоне высот (от -6000 м до $+4000$ м), в основном, не выходят за пределы ± 50 гал и огромное число аномалий вообще равно нулю. Эти данные указывают на то, что площадки с достаточно

большой площадью являются уже достаточно скомпенсированными (Магницкий, 1965; с. 227-229).

Поправка за притяжение промежуточного слоя. Аномалия Буге. Для определения влияния плотностных неоднородностей между уровнем наблюдения и уровнем моря достаточно вычислить силу притяжения диска толщиной H , бесконечного радиуса и плотностью ρ (Орленок, 2000; с. 95-96; Магницкий, 1965; с. 230):

$$g = 2\pi G \rho H. \quad (6.7)$$

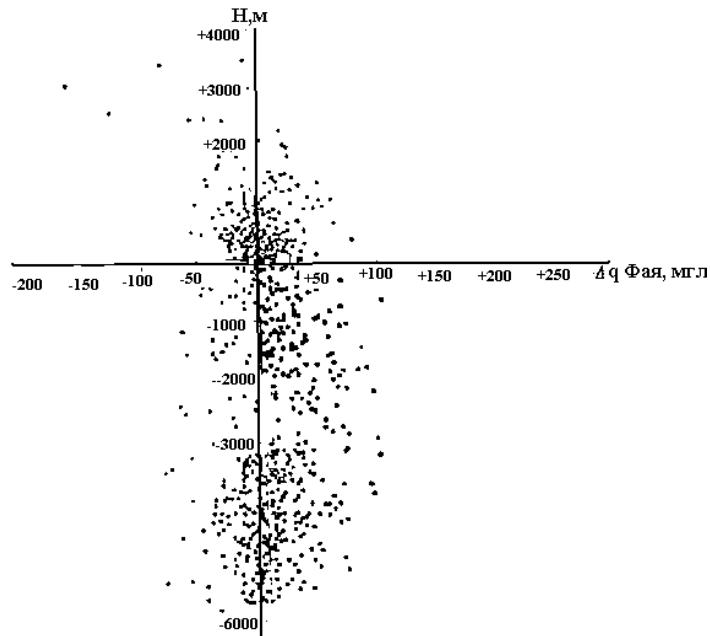


Рис. 6.3. Значения поправок в свободном воздухе для аномалий гравитационного поля. Поправки осреднялись по 5° площадкам как функции таким же образом осредненных высот.

Полученное выражение показывает, что сила притяжения бесконечного диска не зависит от расстояния точки до диска, а зависит от массы слоя (ρH). Подставляя значение гравитационной постоянной $G = 6,6732 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ сек}^{-2}$, получим:

$$g = 0,0451 \rho H.$$

Это и есть редукция Буге, характеризующая притяжение слоя H , имеющего плотность ρ . Величина

$$\Delta g_2 = g - \gamma_0 + 0,308H - 0,0418 \rho H \quad (6.8)$$

называется аномалией Буге. При измерениях на море вследствие $H=0$ аномалия приобретает вид:

$$\Delta g_2 = g - \gamma_0.$$

Аномалии Буге, являясь приближенным видом топографических аномалий, в основном, обусловлены эффектом внутренних аномальных масс. Как следует из предыдущего, основными внутренними возмущающими факторами являются отклонения границ слоев от горизонтального положения и в первую очередь рельеф подошвы коры - поверхности Мохоровичича, где происходит наибольший перепад плотностей (около $0,4 \text{ г/см}^3$, см. рис. 5.2). Таким образом, можно ожидать, что между Δg_2 и глубиной M залегания поверхности Мохоровичича должна существовать ясно выраженная зависимость. Такую зависимость Δg_2 для областей, для которых M известна по сейсмическим данным, можно найти статистически.

Опыт определения такой зависимости для Земли в целом дан на рис. 6.4:

$$M = 35(1 - th(0,0037\Delta g_2)).$$

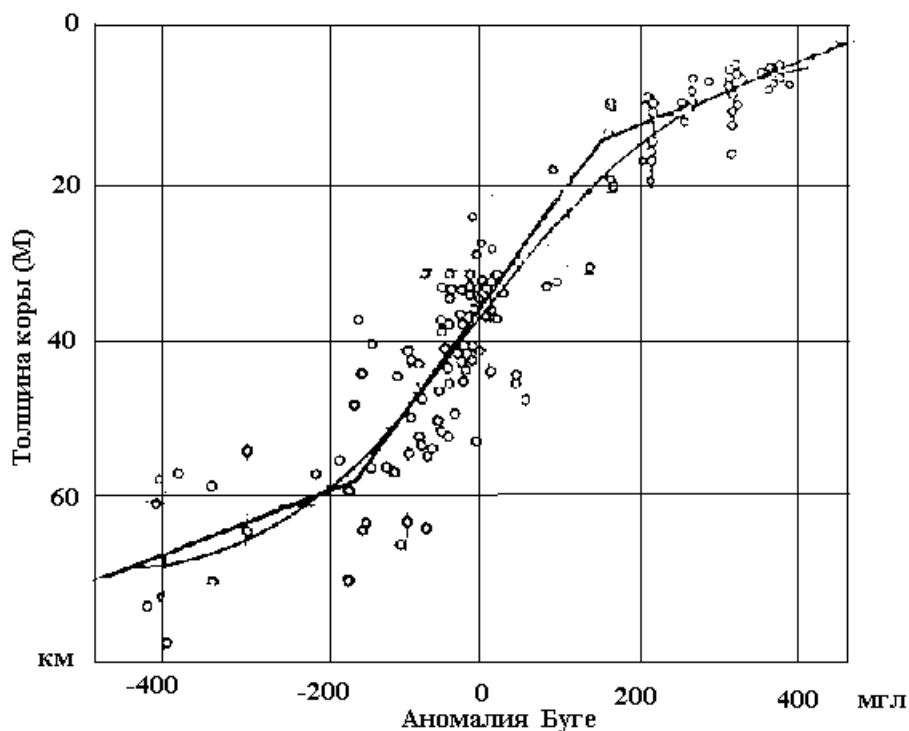
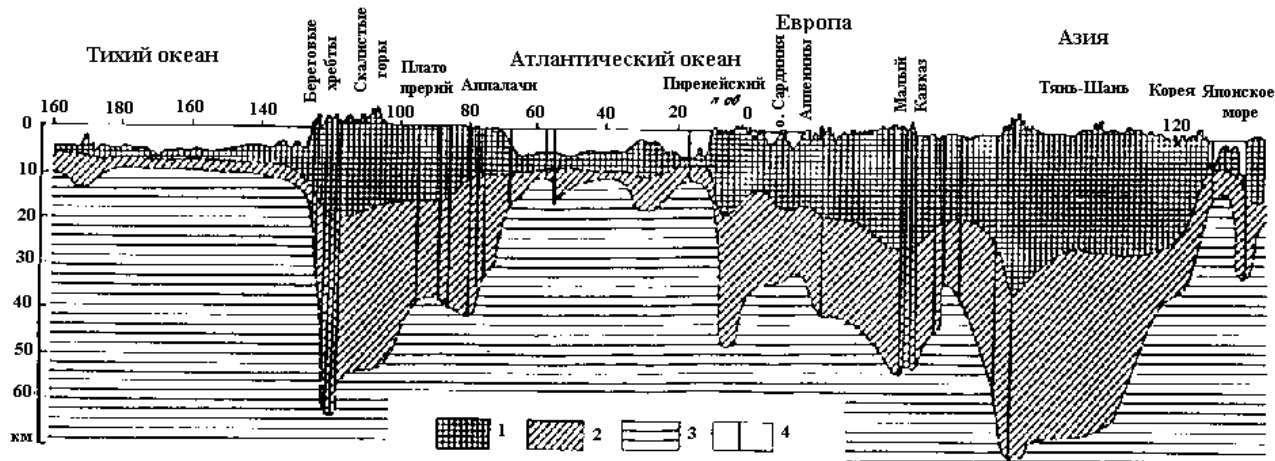


Рис. 6.4. Иллюстрация существования связи между аномалией Буге и толщиной земной коры.

На рис. 6.5 приводится разрез земной коры по 40^0 с. ш., полученный по описанной методике с использованием данных о величинах аномалии Буге.



1- гранит с включением осадочных и метаморфических отложений; 2- базальт; 3- гипербазит; 4- глубина земной коры по сейсмическим определениям.

Рис. 6.5. Разрез земной коры по 40^0 с. ш., построенный по значениям аномалии Буге.

К сожалению, полученная статистическая формула не имеет ясного физического смысла. Из формулы (6.7) и основных теоретических предпосылок следовало ожидать линейной зависимости M от Δg_2 . Действительно, если аномалии вызваны изменением M при разнице плотностей $\Delta \rho$ на границе раздела, то в пределах применимости формулы для плоско-параллельного слоя (6.7) можно написать:

$$M = M_0 - \Delta g_2 / 2\pi G \Delta \rho. \quad (6.9)$$

Так как строение коры (число слоев и разности плотностей) различно на континентах, океанах и в переходных областях, то следует ожидать, что коэффициенты при Δg_2 в (6.9) и M_0 будут различны для основных типов земной коры. В этом случае более обоснованно заменить кривую на рис. 6.4 ломанной линией, каждое звено которой отвечает особому типу коры.

Принцип изостазии. Первые наблюдения, которые привели к открытию изостазии, были выполнены между 1735 и 1745 гг., когда французская геодезическая экспедиция, руководимая Буге, измеряла в Перу дугу меридиана. Участники экспедиции обнаружили, что притяжение Анд воздействует на вертикаль и вызывает тем самым отклонение отвеса. При изучении этого обстоятельства они нашли, что наблюдаемые отклонения вертикали значительно меньше теоретически рассчитанного влияния Анд. Буге впервые обратил внимание на это расхождение, а через несколько лет Боскович объяснил его недостатком вещества под горами. В следующем столетии аналогичные результаты были получены вблизи горной цепи в Гималаях. Теперь известно, что отклонение отвеса вблизи горных хребтов представляет собой общее явление, связанное с особенностями основных поверхностных структур Земли.

И для Анд, и для Гималаев дефицит масс под хребтом, необходимый для того, чтобы объяснить наблюдаемое отклонение отвеса, приблизительно равен поверхностной нагрузке, обусловленной горными хребтами. Для объяснения этого явления в 1889 г. Деттон ввел термин «изостазия».

Если говорить о деталях, принцип изостазии утверждает, что ниже «глубины компенсации» давление внутри Земли является гидростатическим. Это значит, что на глубине компенсации и ниже ее вес вертикальных столбов единичного сечения, с учетом небольшой поправки на кривизну Земли, должен быть одинаков. Если на земной поверхности появляется избыточная нагрузка, например в виде горной цепи, океанического хребта или ледяного покрова, и если изостатическое равновесие достигнуто, тогда должен существовать эквивалентный компенсирующий недостаток масс под этими поверхностными структурами, но выше глубины компенсации (и наоборот – избыток массы под недостаточной нагрузкой, например, под океанами).

Эти эффекты и привели к созданию в конце XIX века теории изостазии, которая была изложена почти одновременно и независимо друг от друга в 1851 г. геодезистом Праттом и в 1855 г. астрономом Эри. Основные ее положения: согласно теории изостазии отдельные глыбы земной коры находятся в гидростатическом равновесии и как бы плавают в вязкой массе подстилающей магмы. При этом избыток масс на поверхности компенсируется недостатком их внизу (рис. 6.5).

Все последующие данные по волнам геоида (рис. 6.1, 6.2), аномалиям Фая (рис. 6.3) и Буге (рис. 6.4, 6.5) хорошо подтверждают основной принцип изостазии.

По теории Пратта блоки коры имеют разную плотность и высоту. Чем выше блок, тем меньше его средняя плотность. Компенсация массы различных блоков коры предположительно осуществляется где-то в мантии на некоем уровне T . Таким образом, если ρ_1 и ρ_2 – плотности континентального блока, ρ_3 – плотность океанического блока, H – высота блока над уровнем моря, P – глубина моря, то, согласно Пратту, имеют место следующие равенства:

$$\rho_1(T + H) = C_1, \quad (6.9)$$

$$\rho_2 T = C_2, \quad (6.10)$$

$$\rho_3(T - P) + \rho^w P = C_3, \quad (6.11)$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C = const. \quad (6.12)$$

Здесь ρ^w – плотность воды, равная примерно $\rho^w = 1,03 \text{ г/см}^3$.

При $H=0$, из соотношения (5.10), полагая $\rho_1 = \rho_0$, где ρ_0 - средняя плотность земной коры, находим постоянную: $C = \rho_0 T$ (часто принимают $\rho_0 = 2,67 \text{ г/см}^3$). Тогда для уровня компенсации T получаем выражения:

$$T = \frac{H\rho_1}{\rho_0 - \rho_1}, \quad T = \frac{P(\rho_3 + \rho^w)}{\rho_0 - \rho_3}. \quad (6.13)$$

Если компенсация осуществляется на нулевом уровне ($T=0$), то это соответствует нулевой плотности столба ($\rho_1 = 0$), возвышающегося над уровнем моря, т.е. внешние массы гор и материков равны нулю. На языке редукций это соответствует поправке за свободный воздух. Таким образом, редукция Фая соответствует изостатической компенсации на уровне моря, при этом массы, расположенные под точкой наблюдений, опускаются на уровень моря и конденсируются в бесконечно тонкий слой.

Если компенсация осуществляется на бесконечности ($T=\infty$), что имеет место при $\rho_0 - \rho_3 = 0$, т.е. избыточных масс нет, то надземные массы притягивают полностью. Это соответствует редукции Буге, где весь избыток масс отнесен за счет притяжения слоя плотностью ρ_0 , лежащего выше уровня моря, что адекватно опусканию избыточных масс под уровень моря и «размыванию» их на бесконечно большую глубину.

Таким образом, редукции Фая и Буге по существу являются предельными изостатическими редукциями. Они показывают, что уровень компенсации T лежит где-то между нулем (редукция Фая) и бесконечностью (редукция Буге). Американский геофизик Хейфорд разрабатывал гипотезу Пратта в начале XX столетия; для глубины компенсации он принял значение 113,7 км. В более поздних работах она оценивается в диапазоне от 96 до 102 км.

По гипотезе Эри земная кора имеет всюду одинаковую плотность ρ_0 , но разную высоту блоков и как бы плавает в более тяжелом субстрате, имеющем постоянную плотность ρ . Следовательно, разность плотности субстрата (астеносферы) и плотности земной коры (литосферы) у Эри – величина постоянная: $\rho - \rho_0 = \Delta\rho$. Глубина погружения блока определяется законом Архимеда – более высокий блок имеет больший корень в астеносфере, чем блок менее высокий. Условие равновесия запишется в виде: $\rho_0 B = \rho b$. Здесь B – мощность коры блока, b – глубина погружения его в астеносферу. Несмотря на различные предпосылки в схемах Пратта и Эри, математически они не отличаются друг от друга, массы блоков до некоторой фиктивной границы компенсации T оказываются равными.

Отклонения от принципа изостазии. Если аномалии "в свободном воздухе" близки к нулю, то аномалии Буге должны быть интенсивными положительными на океанах и отрицательными на континентах, что и наблюдается. Сопоставление аномалий Буге "в свободном воздухе" позволяет сделать вывод о степени соблюдения компенсации в земной коре. При полной компенсации аномалии "в свободном воздухе" (точнее, изостатические) должны быть равны нулю. При полном отсутствии компенсации в нуль должны обращаться аномалии Буге (точнее, топографические). Фактически аномалии "в свободном воздухе" раз в 10 меньше аномалий Буге, т. е. компенсация, в среднем, осуществляется с точностью 10%.

Особый случай на фоне общей хорошей компенсации представляют области, где компенсация резко нарушена и где, следовательно, наблюдаются интенсивные аномалии "в свободном воздухе".

Можно отметить три главных типа подобных нарушений гравитационного поля.

Первый тип нарушений связан с вулканическими островами, например, Кипр, Гавайские о-ва. Эти образования сопровождаются интенсивными положительными аномалиями, которые, однако, в большинстве случаев почти целиком устраняются

введением топографической редукции, т. е. эти острова представляют собой простую нагрузку на кору, ничем не компенсированную.

Вторым типом нарушений, пожалуй, наиболее интересным, являются относительно неширокие, но очень длинные полосы интенсивных отрицательных аномалий. Такие полосы дефекта силы тяжести протягиваются вдоль западного берега Южной и Центральной Америки, вдоль Алеутских островов и далее вдоль внешнего края островных дуг западной окраины Тихого океана. Такие аномалии известны в других океанах и морях: вдоль внешнего края дуги Суматра-Ява, вдоль Пуэрто-Рико, по дуге Южных Сандвичевых островов, по внешней дуге островов у берегов Греции. Всюду эти аномалии или совпадают с глубоководными желобами, или идут по их краю, где желоба сильно заполнены осадками. Однако подобные аномалии встречаются, хотя и в значительно ослабленном виде, и на континентах. Примером является полоса аномалий вдоль фронта формации Гренвиль в Канаде. Эта полоса связана с позднекембрийским орогеническим поясом.

Третий тип нарушений представляет интенсивные и довольно обширные поля положительных аномалий в местах недавних опусканий коры. Примером может служить море Банда в Индонезии.

Изостазия и колебательные движения земной коры. Проблема вековых изменений силы тяжести, ее современное состояние (Магницкий, 1965; с. 241-243). Вертикальные движения земной коры возникают вследствие внутренних геотектонических процессов. Можно предположить два основных типа таких процессов. Может происходить сжатие или расширение глубинного материала без существенных перемещений его в горизонтальном направлении, а также приток или отток глубинного со стороны путем перемещения в горизонтальном направлении. Наконец, возможно комбинирование этих процессов в каждый данный момент или последовательно во времени.

В зависимости от типа процесса будет происходить и изменение гравитационного поля Земли. Анализ показывает, что медленные движения больших частей платформ (ледники Скандинавии) происходит в обстановке перетекания глубинного вещества. В случае быстрых недавних поднятий (Центральная Африка, южная часть Индии, Мексиканское нагорье) и опусканий (море Банда) мы имеем дело со сжатием и расширением глубинного вещества.

Эти два вывода можно согласовать, предположив, что основной причиной вертикальных движений является сжатие или расширение вещества, а в дальнейшем параллельно с денудацией поднятий и переотложением вещества во впадинах вступает в действие и компенсирующее перетекание глубинного вещества. Конечно, эти два процесса могут идти параллельно.

Наконец, причиной вертикальных (не колебательных) движений может быть разгрузка эродируемых областей и нагрузка районов седиментации по схеме, аналогичной прогибу и подъему областей оледенения.

Конечно, близость к состоянию равновесия больших блоков коры указывает на то, что изостатический фактор "работает", но он, видимо, имеет в жизни коры лишь второстепенное значение и притом не активное. Вся же сложная гамма движений коры и сложность ее структуры возникают под действием иных причин и вопреки стремлению к равновесию.

Сопоставление данных наблюдений для Земли с гидростатической теорией (Магницкий, 1965; с. 221). Сопоставление величины сжатия Земли, определенного

экспериментально по спутниковым данным (2.22): $\varepsilon = 3,35280 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{298,26}$, с величиной

сжатия, полученного из гидростатической теории (2.26): $\varepsilon_H = 3,3366 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{299,7}$,

позволило в разделе 2 сделать вывод о том, что Земля сжата примерно на 0,5% сильнее ($\varepsilon > \varepsilon_H$), чем следует из гидростатической теории. При вековом замедлении угловой скорости вращения Земли, равном $\frac{d\omega}{dt} = -5 \cdot 10^{-22} \text{ сек}^{-2}$, наблюдаемое сжатие было бы равно гидростатическому $\tau_0 \sim 10^7$ лет назад (Манк, Макдоналд, 1964; с. 349). Отклонение от гидростатического равновесия должно вызвать появление скалывающих напряжений в теле Земли. А длительное их существование (порядка $\tau_0 \approx 10^6$ - 10^7 лет) указывает на наличие у вещества Земли некоторой *фундаментальной прочности*, т. е. некоторого предела напряжений, ниже которого напряжения или не рассасываются, или рассасываются крайне медленно. Расчеты показывают, что такое отклонение от фигуры равновесия создает в Земле скалывающие напряжения порядка $\sigma_0 \sim 10^6$ - 10^8 дин/см^2 . (Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971; с. 84-89; Джефрис, 1960; Стейси, 1972, с. 37). Это значение и может быть принято как верхний предел для фундаментальной прочности оболочки Земли.

Следующий за этими данными вывод, являющийся в настоящее время почти общепринятым, сводится к следующему (Магницкий, 1965, с. 222-223). Значение σ_0 находится в полном согласии с данными о величине напряжений, согласно теории упругой отдачи, сбрасываемых при землетрясениях (раздел 3). Тем не менее, расчет, основанный на представлениях чистой теории упругости, может рассматриваться лишь как очень грубое приближение, так как приводит к ряду противоречий: промежуточные и глубокие землетрясения и теория Гриффитса, лежащая в основе теории упругой отдачи. Кроме того, само отклонение наблюдаемого сжатия от гидростатического находится в пределах ошибок теории и может быть иллюзорным (хотя и отмечалось, что разница значений на единицу выходит за пределы ошибок, с которыми эти величины определяются). На это указывают данные, полученные в работе (Манк, Макдональд, 1964; с. 48-50), согласно которым вековое число Лява k_s , которое может быть интерпретировано как мера реакции Земли на центробежную деформацию в течение ее эволюции примерно за последние 5 млрд. лет, оказалось равным числу Лява k_f , определенному для модели жидкой Земли: $k_s \approx k_f = 0,96$.

Как видим, *фундаментальный* вывод о прочности вещества Земли, основанный на превышении наблюдаемого сжатия Земли над гидростатическим сжатием, в силу отсутствия «равноценной» фундаментальной «подпорки» в конечном итоге оказался пока не востребованным.

Теоретический вывод о фундаментальной прочности вещества Земли подтверждается открытым Л.Н. Рыкуновым с коллегами эффектом напряженного состояния земной коры – сейсмической эмиссии, присущей Земле в широком диапазоне глубин и во всем разнообразии геологических и тектонических условий (Рыкунов, Хаврошкин, Цыплаков, 1979; Николаев, Рыкунов, Хаврошкин, Цыплаков, 1985).

Более того, большой отрезок времени, в течение которого сохраняется такое напряженное состояние земной коры, накладывает вполне определенные условия на механизм, обеспечивающий его поддержание. Таким механизмом, например, может являться механизм ротации. Действительно, как отмечалось в разделе 4, напряжения, создаваемые в результате поворотов объемов, являющихся частями вращающихся тел, нельзя срелаксировать за счет пластической деформации, что и может объяснить их большие времена жизни – многие миллионы лет.

Таким образом, представляется, что фундаментальная прочность Земли, обеспечиваемая величиной скорости замедления ее вращения и отражающаяся в режиме движения тектонических плит, и определяет сейсмический климат планеты – интенсивность процесса, протекающего в пределах ее сейсмотектонических поясов. Этот вывод подтверждается данными, согласно которым величина теряемой Землей кинетической энергии вращения $W \approx 2,74 \cdot 10^{19} \text{ эрг/сек} \approx 10^{20} \text{ Дж/год}$ (Стейси, 1972; с. 47) по порядку величины близка выделяемой на планете сейсмотектонической энергии E_{ST} ,

где $E_S \approx \eta E_{ST} \approx 10^{16-18}$ Дж – сейсмическая энергия, сбрасываемая при сильнейшем ($M \approx 8$) землетрясении, происходящем на планете с частотой примерно один раз в год, $\eta \approx 10^{-(4-2)}$ – сейсмический коэффициент полезного действия.

Теоретическое изучение скорости распространения трещины Гриффитса привело к следующим выводам (Магницкий, 1965; с. 130). Если трещина возникла в плоскости, перпендикулярной максимальному растягивающему напряжению, то разрывающее напряжение $\sigma_{\theta\theta}$, сконцентрированное у конца щели, оказывается ориентированным под разными углами θ к плоскости щели в зависимости от скорости ее распространения. Для скоростей меньше $0,6V_t$ максимум $\sigma_{\theta\theta}$ лежит в плоскости разрыва. При скоростях больше $0,6V_t$ максимум $\sigma_{\theta\theta}$ отклоняется от направления трещины и при $0,9V_t$ это отклонение составляет около 45° . Таким образом, при скорости развития трещины больше $0,6V_t$ происходит ее закручивание и при $0,9V_t$ направление совпадает практически с направлением максимального скалывающего напряжения. Весь процесс развития сдвига иллюстрируется рис. 6.6 а, б, в, где представлены последовательные моменты образования разрыва, полученные экспериментально (Белоусов, Гзовский, 1954; Brace, Bombolakis, 1963). Представляется, что своеобразный эффект «закручивания» образующейся при землетрясении трещины, по сути, является проявлением взаимодействия «элементарных» зерен (мезоструктуры) вещества и может быть проинтерпретирован в рамках ротационного подхода (Викулин, 2003).

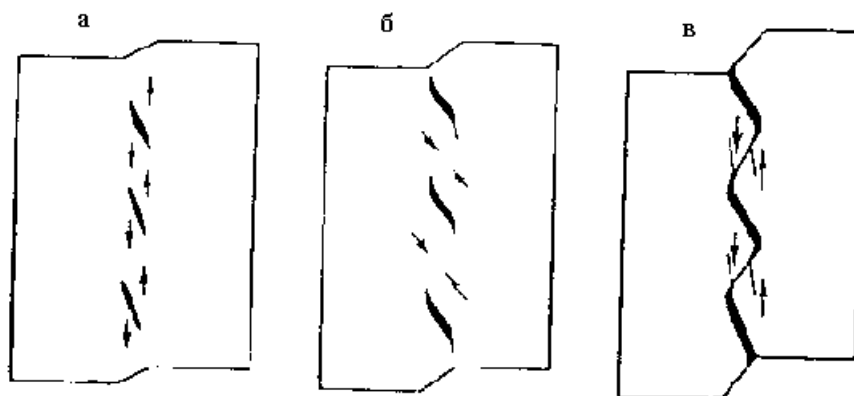


Рис. 6.6. Последовательные моменты образования разрыва, полученные экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В.В., Гзовский М.В. Тектонические условия и механизм возникновения землетрясений // Труды Геофиз. ин-та АН СССР. 1954. №25.
2. Ботт М. Внутренне строение Земли. М.: Мир. 1974. 376.
3. Буллен К.Е. Плотность Земли. М.: Мир. 1978. 444 с.
4. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПУ. 2003. 150 с.
5. Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и развитие. М.: Изд-во ИЛ. 1960. 485 с.
6. Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В. Физика Земли и планет. Фигуры и внутренне строение. М.: Наука. 1971. 384 с.
7. Магницкий В.А. Внутренне строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 380 с.
8. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. М.: Мир. 1964. 384 с.
9. Орленок В.В. Основы геофизики. Калининград: КГУ. 2000. 448 с.
10. Николаев А.В., Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Циплаков В.В. Высокочастотные сейсмические шумы и вибросигналы: методы, результаты и перспективы / М.: ИФЗ АН СССР. 1985. 60 с. Деп. в ВИНТИ 23.01.85. №1160-85.
11. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Циплаков В.В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Изв. АН СССР. Физ. Земли. 1979. №11. С. 72-

77.

12. **Стейси Ф.** Физика Земли. М.: Мир. 1972. 344 с.

13. **Brace W.F., Bombolakis E.G.** A note on Brittle crack growth in compression // J. Geoph. Res. V. 68. #12. 1963.

VII. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ ЗЕМЛИ

Магнитное поле Земли: общие сведения, возникновение науки о магнитном поле Земли, методы исследования магнитного поля Земли, структура магнитного поля Земли. Вековые вариации геомагнитного поля. Палеомагнетизм. Гипотеза дрейфа континентов. Реконструкция континентов в палеозое. Разрастание дна океанов и дрейф континентов. Тектоника плит. Электрические явления. Магнитогидродинамические параметры ядра. Электромагнитное взаимодействие оболочки и ядра.

Магнитное поле Земли (Яновский, 1967). Общие сведения. Магнитное поле Земли и связанные с ним явления служат предметом специальной науки – геофизики. Это самостоятельный раздел данной науки, известной под названием земного магнетизма или геомагнетизма.

В общем, магнитное поле обнаруживается благодаря механическому воздействию на постоянный магнит или контур с током. Так, всякий свободно подвешенный магнит, а также токовый контур, находясь в магнитном поле, стремятся встать в определенном направлении.

За единицу напряженности магнитного поля H принимается поле в центре кругового контура радиусом в $0,2\pi$ сантиметра, когда в контуре протекает ток, равный 1 амперу. Такая единица в системе СГС называется *эрстедом* (э). В земном магнетизме во многих случаях напряженность поля выражают в *гаммах* (γ), при этом $1\gamma = 10^{-5}$ э. В международной системе единиц СИ за единицу напряженности принят ампер на метр (a/m), который составляет лишь некоторую часть эрстеда, а именно: $1a/m = 4\pi \cdot 10^{-3}$ э.

В существовании магнитного поля Земли можно убедиться на простейшем опыте: свободно вращающаяся в горизонтальной плоскости намагниченная стрелка (магнитный компас) в любой точке земной поверхности всегда становится в определенном направлении, которое в большинстве районов земного шара близко к направлению географического меридиана. Поэтому одно из направлений, на которое указывает конец намагниченной стрелки, получило название север, а противоположное – юг.

Возникновение науки о магнитном поле Земли. О том, что компасная стрелка всегда занимает определенное положение в пространстве, известно еще с глубокой древности. Благодаря этому человечество с давних пор получило возможность при помощи такой стрелки (компаса) ориентироваться в открытом море вдали от берегов. Однако, до плавания Колумба из Европы в Америку (1492 г.) особого внимания к исследованию такого явления никто не проявлял, так как ученые того времени полагали, что оно происходит в результате притяжения стрелки Полярной звездой. В Европе и омывающих ее морях компас в то время устанавливался почти по географическому меридиану. При пересечении же Атлантического океана Колумб заметил, что примерно на полпути между Европой и Америкой стрелка компаса отклонилась почти на 12° к западу. Этот факт сразу же породил сомнение в правильности прежней гипотезы о притяжении стрелки Полярной звездой, дал толчок к серьезному изучению вновь открытого явления. С этого момента, собственно говоря, и получила свое начало наука о земном магнетизме, начались повсеместные измерения *магнитного склонения* – D , т. е. угла между географическим меридианом и осью магнитной стрелки, т. е. магнитным меридианом.

Через 18 лет после этого, в 1510 г., часовых дел мастер Георг Гартман, занимавшийся в Нюрнберге изготовлением компасов, открыл новое явление. Он обнаружил, что магнитная стрелка не только отклоняется от географического меридиана, но, будучи подвешена за центр тяжести, стремится встать под некоторым углом к горизонтальной плоскости, названным *магнитным наклоном* – J .

Таким образом, наряду с изучением явления отклонения ученые начали также исследовать и новое явление – наклонение магнитной стрелки. В результате наблюдений было установлено, что как склонение, так и наклонение имеют различные значения в разных точках земной поверхности. При этом их изменения от точки к точке подчиняются некоторой закономерности, хотя и очень сложной.

Исследование этой закономерности позволило придворному врачу английской королевы Елизаветы (и, как бы сейчас сказали, ученому по совместительству) Уильяму Гильберту выдвинуть в 1600 г. гипотезу о том, что Земля представляет собой магнит, полюсы которого совпадают с географическими полюсами. Другими словами, У. Гильберт полагал, что поле Земли подобно полю намагниченной сферы.

Свое утверждение У. Гильберт основывал на опыте с моделью нашей планеты, представляющей собой намагниченный железный шар. Главным аргументом в справедливости своей гипотезы Гильберт считал, что магнитное наклонение, измеренное на такой модели, оказалось почти одинаковым с наклонением, наблюдавшимся на земной поверхности. Несоответствие же земного склонения со склонением на модель Гильберт объяснял отклоняющим действием материков на магнитную стрелку.

Хотя многие факты, установленные позднее, не совпадали с гипотезой Гильберта, она не теряет своего значения и до сих пор. Основная мысль Гильберта о том, что причину земного магнетизма следует искать внутри Земли, оказалась правильной, равно как и то, что в первом приближении Земля действительно является большим магнитом, представляющим собой однородно намагниченный шар.

Углы склонения и наклонения определяют направление в пространстве напряженности магнитного поля H Земли, но не могут дать ее численного значения. До конца XVIII в. измерения величины напряженности не производились по той причине, что не были известны законы взаимодействия между магнитным полем и намагниченными телами. Лишь после того, как в 1785 – 1789 гг. французским физиком Шарлем Кулоном был установлен закон, названный его именем, появилась возможность таких измерений.

С конца XVIII в., наряду с наблюдением склонения и наклонения, начались повсеместные наблюдения *горизонтальной составляющей H* , представляющей собой проекцию вектора напряженности магнитного поля на горизонтальную плоскость. Зная же склонение и наклонение, можно рассчитать и величину полного вектора напряженности магнитного поля.

Первая теоретическая работа о том, что представляет собой магнитное поле Земли, т. е. каковы величина и направление его напряженности в каждой точке земной поверхности, принадлежит немецкому математику Карлу Гауссу. В 1834 г. он дал математическое выражение для составляющих напряженности как функции координат – широты и долготы места наблюдения. Пользуясь этим выражением, можно для каждой точки земной поверхности найти значения любой из составляющих, которые носят названия элементов земного магнетизма. Эта и другие работы Гаусса стали фундаментом, на котором построено здание современной науки о земном магнетизме.

Методы исследования магнитного поля Земли. Источником или причиной любого магнитного поля являются постоянные магниты и электрические токи. Отсюда следует, что причинами магнитного поля Земли должны быть либо намагниченность Земли, имеющая постоянный характер (Земля – большой магнит), либо постоянные токи, протекающие внутри Земли, или же, наконец, совокупность того и другого.

Задача науки о земном магнетизме и состоит в том, чтобы выяснить эти причины, найти количественные связи между величинами, характеризующими магнитное поле Земли и их источниками: намагниченностью земного шара и плотностью токов. Для решения этой проблемной задачи требуется знать, каково распределение магнитного поля Земли по ее поверхности, т. е. каковы величина и направление его в каждой точке земной поверхности.

Единственный метод нахождения такой зависимости – непосредственные измерения элементов земного магнетизма на всей поверхности земного шара, называемые *магнитными съемками*.

Помимо магнитных съемок, имеющих целью изучение пространственного распределения магнитного поля Земли, наблюдения элементов земного магнетизма производятся непрерывно в ряде пунктов земного шара – в обсерваториях. Задача этих наблюдений – изучение временного распределения, т. е. зависимости поля от времени. По данным из работы (Таблицы ..., 1976) напряженность магнитного поля в мЭ [10^{-3} э] представлена на рис. 7.1, из которого видно, что координаты магнитных полюсов составляют:

северный магнитный полюс (в южном полушарии): $\varphi = 71,2^\circ S$, $\lambda = 150,8^\circ E$,
 южный магнитный полюс (в северном полушарии): $\varphi = 70,5^\circ N$, $\lambda = 98^\circ W$.

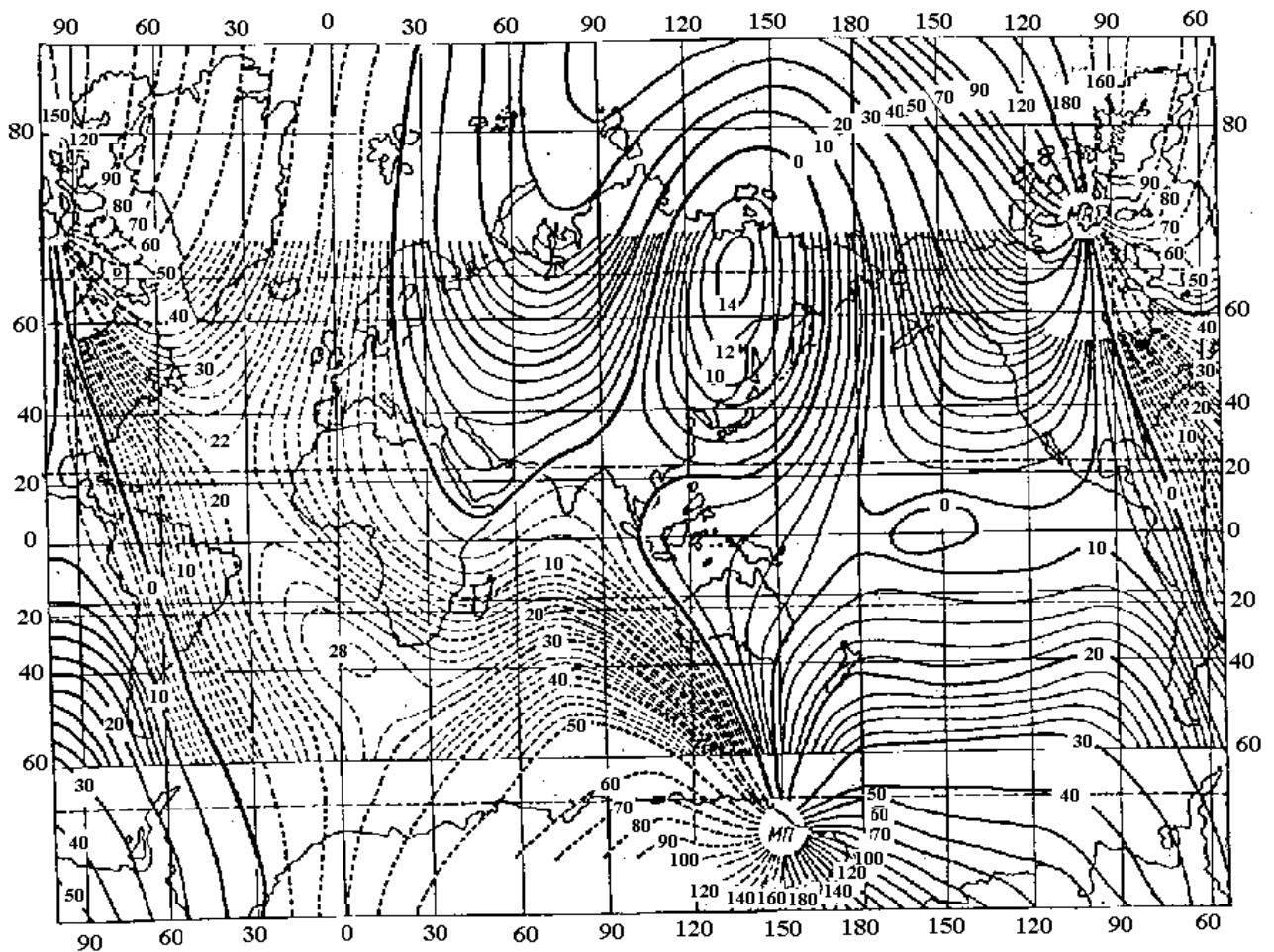


Рис. 7.1. Напряженность магнитного поля Земли, мЭ, по состоянию на 1965 год.
 (Таблицы ..., 1976).

При этом напряженность магнитного поля на магнитном полюсе и магнитном экваторе составляет 0,65 и 0,35 э соответственно. Магнитный момент однородно намагниченного земного шара равен $M = 8,3 \cdot 10^{25}$ ед. СГСМ. Элементы постоянного магнитного поля Земли изменяются на ее поверхности в следующих пределах:

Полный вектор напряженности поля	от +0,62 до -0,73 э;
Горизонтальная составляющая	от 0 до 0,41 э;
Вертикальная составляющая	от +0,62 до -0,73 э;
Магнитное склонение	от -180° до $+180^\circ$;
Магнитное наклонение	от -90° до $+90^\circ$.

Структура магнитного поля Земли. Наблюдения показывают, что магнитное поле не является постоянным, оно периодически меняется (варьирует) с течением времени, однако амплитуда этих изменений составляет лишь доли процента по отношению ко всей величине. Среднее значение магнитного поля за длительный промежуток времени – это относительно устойчивая величина и называется она *постоянным магнитным полем*. Разность же между значениями наблюдений и среднегодовым значением принято называть *переменным магнитным полем* или *полем вариаций*, периоды которых значительно меньше года. Таким образом, наблюдаемое магнитное поле является суммой двух полей – постоянного и переменного.

Анализ полученных данных приводит к выводу, что в то время как источники постоянного поля находятся внутри Земли, источниками переменного поля являются токи в верхних слоях атмосферы – ионосфере и магнитосфере, т. е. вне Земли.

В свою очередь, постоянное магнитное поле также состоит из нескольких частей, имеющих разную природу. Рассматривая детальные магнитные карты изолиний, можно видеть, что в некоторых местах земной поверхности имеются значительные отклонения элементов земного магнетизма от их значений в близлежащих районах. Такие места носят название *магнитных аномалий*. Примером их может служить известная Курская магнитная аномалия, где напряженность магнитного поля может достигать до четырехкратного значения по сравнению с нормальным. Магнитные аномалии могут накладываться одна на другую, если намагниченные тела, вызывающие их, залегают на разных глубинах.

Наличие магнитных аномалий на земной поверхности и необходимость их выделения из наблюдаемого поля породили понятие нормального или *главного магнитного поля*. Нахождение главного магнитного поля – сложная задача, решаемая различными способами. Основным, однако, является способ осреднения. Теоретически доказывается, что на поверхности Земли средняя величина напряженности, создаваемая магнитным телом, залегающим ниже этой поверхности, должна равняться нулю. При этом линейные размеры поверхности должны быть значительно больше глубины залегания тела. Поэтому, осредняя значение наблюдений на поверхности, где имеется аномальное поле, мы, тем самым, исключим его и в результате получим главное (нормальное) поле. Если путем арифметических операций вычесть из главного поля поле диполя, то получим какое-то другое поле, которое по аналогии можно назвать также аномальным, но более крупномасштабным, захватывающим целые материки. Такое поле получило название - *недипольной части главного магнитного пол*, или по старой терминологии - *поля мировых аномалий*.

Оказалось, что большая часть магнитного поля, почти на 90%, представляет поле диполя, расположенного в центре Земли и наклоненного к оси на $11,5^{\circ}$. Ось этого магнита (диполя) пересекает земную поверхность в точках, имеющих широту $\varphi = 78^{\circ},2N$ и долготу $\lambda = 68^{\circ},8W$ в северном полушарии и $\varphi = 78^{\circ},2S$ и $\lambda = 111^{\circ},2E$ – в южном. Эти точки называются *геомагнитными полюсами*. Центр наблюдаемого дипольного поля смещен относительно центра Земли примерно на 300 км в сторону Тихого океана (Стейси, 1972; с. 145; Ботт, 1974; с. 196). Теория главного магнитного поля Земли достаточно полно разработана (Стейси, 1972; с. 141 – 150). Однако мы не можем считать, что Земля действительно является однородно намагниченной сферой, как полагал Гильберт. Дальнейшие данные о природе поля получены именно при рассмотрении его отклонений от дипольного. Наиболее интересным и, вероятно, наиболее существенным аспектом этих исследований является разделение поля на дипольную и недипольную части.

Вековые вариации геомагнитного поля (Ботт, 1974; с. 196 – 199). Средние годовые значения всех магнитных элементов испытывают регулярные изменения от года к году. Подобные долгопериодные вариации геомагнитного поля называются *вековыми вариациями*. Они были впервые обнаружены Геллибрандтом в 1634 г., когда он установил,

что склонение в Лондоне меняется со временем (рис. 7.2). Вековые вариации свойственны и дипольной и недипольной составляющим геомагнитного поля. За последнее столетие дипольное поле уменьшалось примерно на $0,04\%$ в год. Относительная величина годового изменения недипольного поля в среднем больше, но меняется от региона к региону, где напряженность поля может как увеличиваться, так и уменьшаться.

По данным (Таблицы ..., 1976; с. 996) равнение элементов геомагнитного поля для 1855 и 1950 гг. приводит к выводу, что полный магнитный момент Земли уменьшается в течение года приблизительно на $7 \cdot 10^{-4}$ своего значения. Следовательно, короткий в геологическом отношении отрезок времени достаточен, чтобы полностью изменить всю картину геомагнитного поля.

Чтобы связать происхождение главного магнитного поля и его вековых вариаций с процессами, протекающими внутри Земли, был применен гармонический анализ. Его результаты не совпадают с данными о короткопериодных вариациях элементов магнитного поля, вызванных преимущественно системами токов, текущих над поверхностью Земли (Ботт, 1976; с. 152 – 157; Магницкий, 1965; с. 33 – 36).

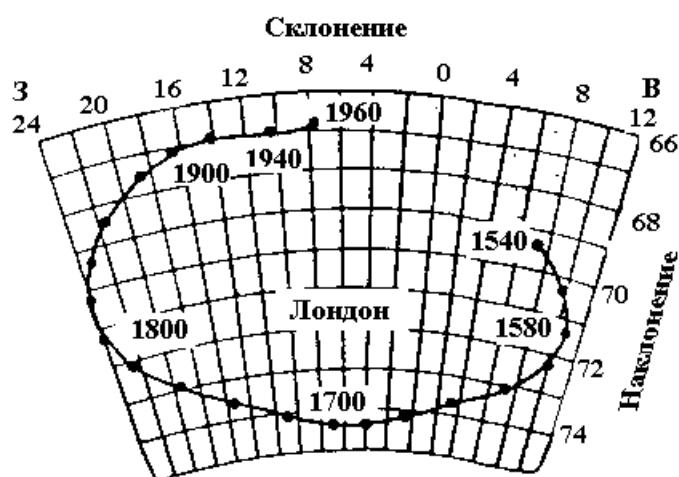


Рис. 7.2. Вековые вариации склонения и наклонения в Лондоне начиная с 1540 г. (Ботт, 1974; с. 199).

Карта, показывающая вековые изменения одного из элементов поля для данной эпохи, называется *картой изопор* (рис. 7.3 а, б). На карте видны центры, где вековые изменения особенно велики. Их называют *фокусами изопор*. Происхождение фокусов связано главным образом с большими изменениями недипольного поля.

Бросается в глаза отсутствие фокусов изопор в Тихом океане. Случайное ли это явление или оно имеет более фундаментальный смысл, еще не известно. Если сопоставить положение фокусов изопор в последовательные эпохи, обнаруживается весьма интересный факт. Установлено, что фокусы смещаются к западу со скоростью около $0,2^\circ$ по долготе в год. При этом, как показывает анализ изменения величины магнитного момента Земли и положения его северного магнитного полюса, наклон магнитной оси основного диполя за последнее столетие не изменился (Яновский, 1967; с. 19 – 20).

Вековые вариации, и в особенности их западный дрейф, не могут быть полностью объяснены процессами, протекающими целиком в твердых оболочках Земли. Необходимо, чтобы одна из внутренних оболочек Земли (скорее всего, внешнее ядро) была жидкой. Кроме того, наружная часть ядра должна вращаться медленнее мантии и коры примерно на $0,2^\circ$ в год.

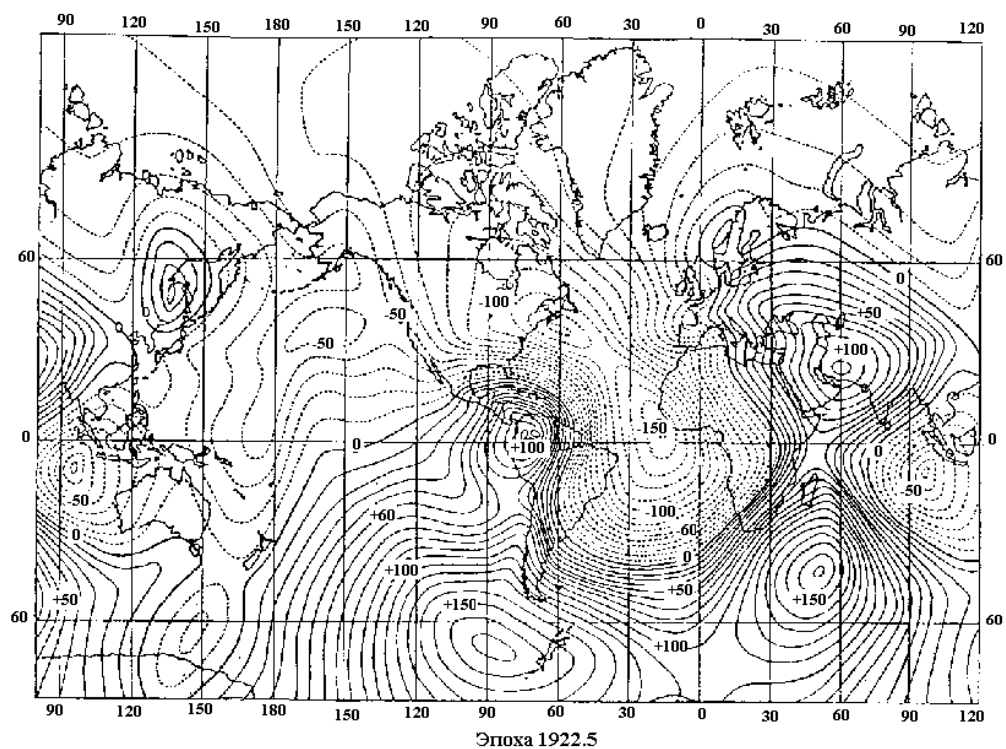


Рис. 7.3 а. Карта изотоп, показывающая вековые изменения вертикальной составляющей (в гаммах в год) для эпохи 1922.5 (Ботт, 1974, с. 197)

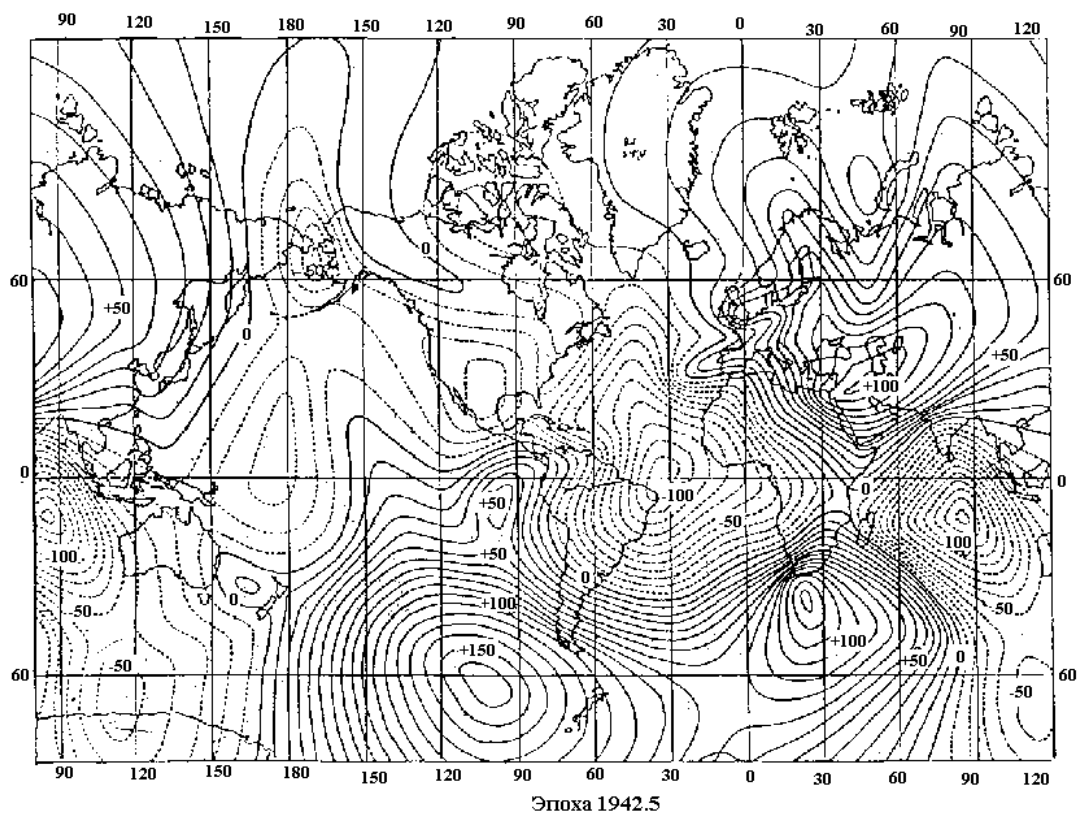


Рис. 7.3 б. Карта изопор, показывающая вековые изменения вертикальной составляющей (в гаммах в год), для эпохи 1942.5 (Ботт, 1974, с. 198)

Палеомагнетизм (Яновский, 1967). Исследования магнитных свойств горных пород, которые интенсивно проводились в 30-40 гг. прошлого века, показали, что многие горные породы несут на себе отпечатки того магнитного поля, которое существовало в эпоху их образования. Этот факт привел к мысли, что, измеряя остаточную намагниченность горных пород, возраст которых известен, можно судить о том, какими были направление и величина напряженности магнитного поля в ту эпоху.

Так, наряду с палеонтологией, изучающей флору и фауну в прошедших эрах, с целью определения возраста пород, в начале второй половины прошлого века возник новый раздел в геомагнетизме – *палеомагнетизм*. Раздел, изучающий магнитные свойства горных пород в те же эпохи, и претендующий на определение не только магнитного поля Земли в прошедшие эпохи, но и возраста различных геологических образований. Вот почему палеомагнитные исследования привлекают пристальное внимание не только геофизиков, но и геологов.

Палеомагнитный метод заключается в том, чтобы исследовать остаточную намагниченность горных пород, которую они приобрели при своем образовании, и определить на этом основании направление магнитного поля Земли, существовавшего в тот момент.

Если бы порода не подвергалась с момента ее возникновения каким-либо химическим или физическим изменениям и сохраняла свое положение в пространстве, то приобретенная ею намагниченность должна бы остаться неизменной. Поэтому, измерив направление намагниченности образцов такой породы с указанием их ориентации в пространстве, мы тем самым и определили бы направление магнитного поля эпохи образования породы в том месте, где она находилась. Зная же направление поля в данном месте, и считая, что магнитное поле Земли в течение всего периода ее существования имело, в основном, дипольный характер, можно определить (по элементарным формулам) и координаты геомагнитных полюсов в ту эпоху. Многочисленные результаты измерений остаточной намагниченности образцов, взятых в различных пунктах земного шара, позволили установить следующие факты.

Использование палеомагнетизма для проверки гипотезы дрейфа прошло через два этапа (Ботт, 1974). На первом этапе было показано, что континенты дрейфуют друг относительно друга. На втором этапе данные палеомагнетизма вместе с результатами других исследований использовались для реконструкции положения древних континентов в отдаленные геологические эпохи.

Гипотеза дрейфа континентов (Ботт, 1974; с. 248 – 250). Основная задача палеомагнитных измерений заключается в определении широт и азимутов в возможно большем числе мест каждого континента и для различных геологических эпох.

Достоверность метода оценивается внутренней сходимостью результатов, полученных по измерениям образцов данного возраста из различных мест одного континентального региона, не подвергшегося в последующие времена никаким внутренним деформациям (рис. 7.4).

Результаты палеомагнитных измерений на одном континенте, например в Южной Америке, можно представить графически двумя способами, как это сделано на рис. 7.5. Если предположить, что континент неподвижен, тогда положение полюсов в прошлом можно определить по древним наклонению и склонению; при этом удобно построить *кривую движения полюса*, иллюстрирующую путь одного из полюсов относительно неподвижного континента в течение геологического времени (рис. 7.5 б). Во втором способе принимается неизменным положение оси вращения Земли, и в соответствии с предполагаемыми долготами графически строятся положения континента в прошлые эпохи (рис. 7.5 а). Результаты палеомагнитных измерений на одном континенте, не испытавшем внутренних деформаций, можно представить графически любым из этих способов или же их комбинацией.

Следующий этап палеомагнитных исследований состоит в сопоставлении данных по различным континентам. Для этого удобно построить на одном и том же графике кривые кажущегося движения полюса для разных континентов, как показано на рис. 7.6. Если бы кривая движения полюса была одной и той же для всех континентов, это значило бы, что континенты оставались неподвижными друг относительно друга, а полюса в течение геологического времени блуждали по земному шару. Данные, представленные на рис. 7.6, показывают, что это не так. Кривые движения полюса расходятся друг от друга тем больше, чем дальше мы уходим в геологическое прошлое. Это значит, что континенты должны были перемещаться друг относительно друга. На вопрос об абсолютном движении полюса палеомагнетизм не может дать ответ.

Ранкорн первым обратил внимание на расхождение кривых движения полюса для Англии и Северной Америки после триасового (более 285 млн. лет назад) периода. После выполнения наблюдений в южном полушарии стало очевидным, что предполагаемые части Гондваны также дрейфовали друг относительно друга и относительно континентов Лавразии.

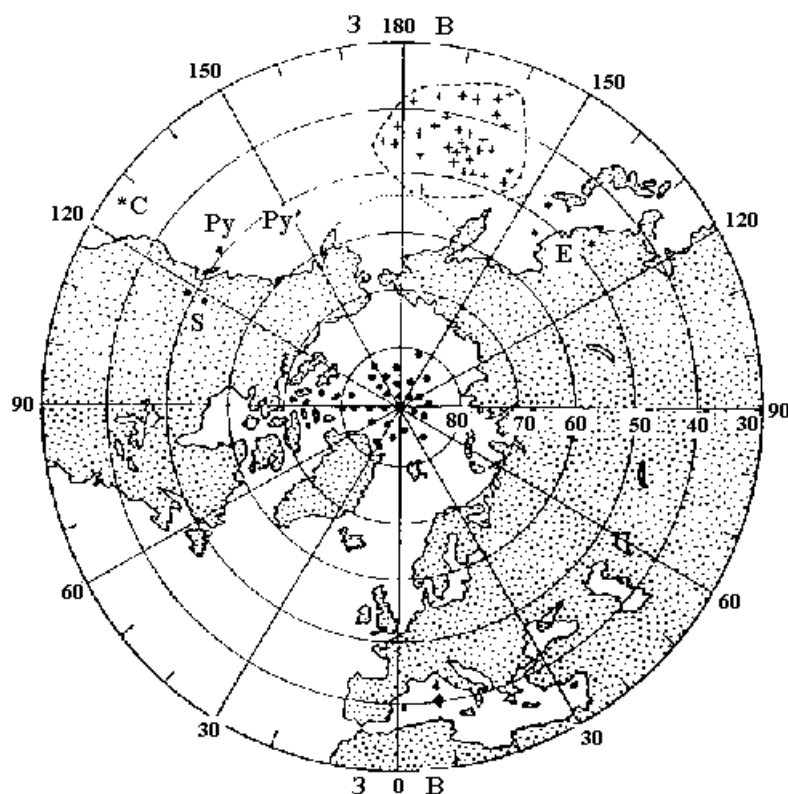


Рис. 7.4. Палеомагнитные определения положения северного полюса: 1) для плейстоцена и плиоцена (до 70 млн. лет назад) (черные точки), 2) для перми (285 -350 млн. лет назад) по измерениям в Европе к северу от Альпийского пояса (крестики), 3) для Перми по измерениям внутри Альпийского пояса орогенического пояса (звездочки). С - Корсика, Py - Пиренеи, S - Южные Альпы. Внутреннее согласие положений пермских полюсов в районах, не подвергшихся в последствии деформациям, дает уверенность в правильности метода (Ботт, 1974; с. 248)

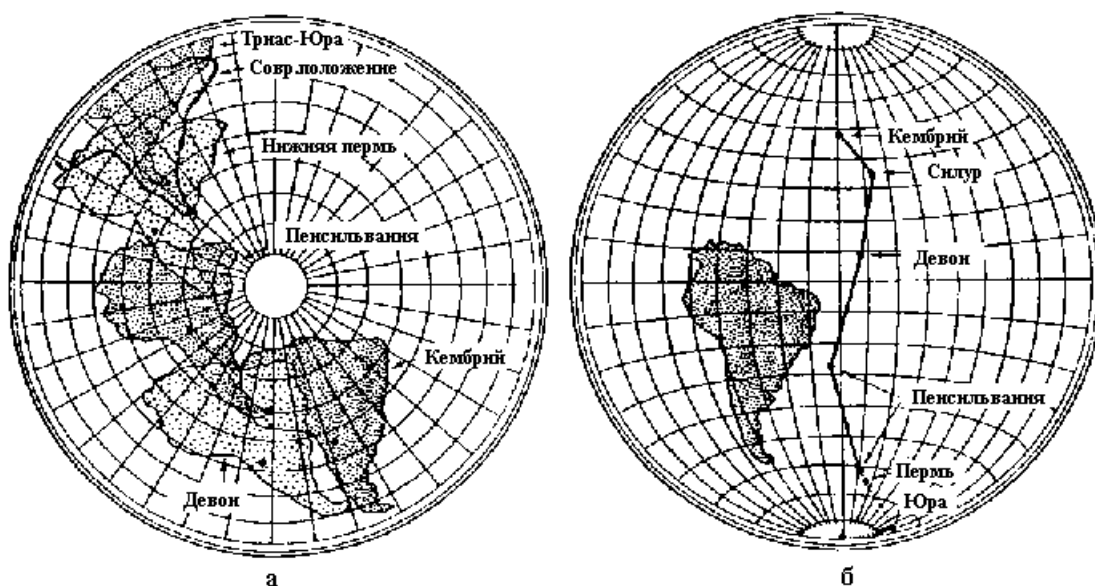


Рис. 7.5. Результаты палеомагнитных исследований для Южной Америки после кембрийского (менее 570 млн.лет назад) времени, представленные: а) – палеоширотами и ориентацией в предположении неподвижности южного полюса и б) – кривой движения полюса в предположении неподвижности континента (Ботт, 197; , с.249).

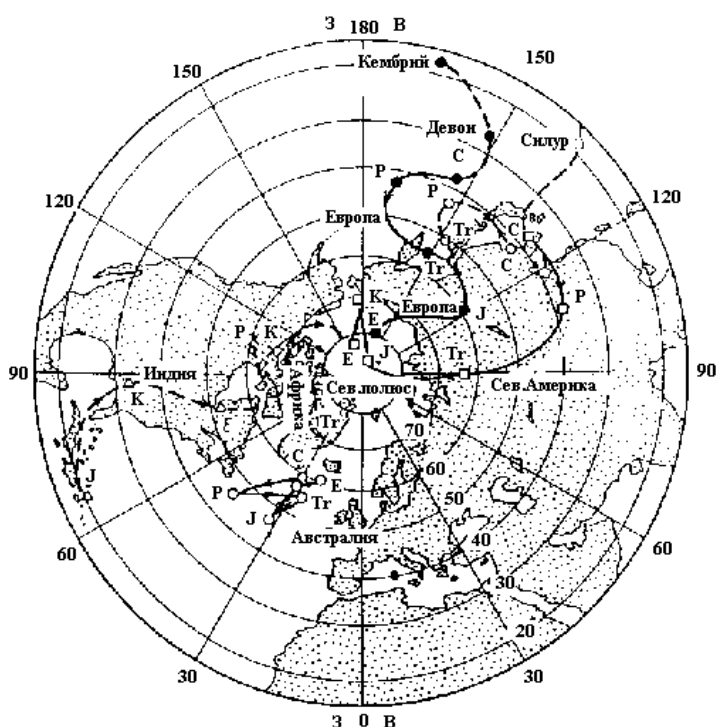


Рис. 7.6. Кривые движения полюса для Северной Америки, Европы, Австралии, Африки и Индии. Е – эоцен, К – мел (137-195 млн.лет назад), J – юра (195-230 млн.лет назад), Tr – триас(230-285 млн.лет назад), P – Пермь (285-350 млн.лет назад), C – карбон (350-410 млн.лет назад). Кривые построены по осредненным данным измерений (Ботт, 197; с. 250).

Реконструкция континентов в палеозое (Ботт, 1974; с. 250 – 251). Результаты палеомагнитных измерений подтверждают теорию Дю Тойта и других о существовании в верхнем палеозое (500-600 млн. лет назад) двух континентальных массивов – Лавразии на

севере и Гондваны на юге. Оба континента в раннем мезозое (150-200 млн. лет назад) разделились и дрейфовали до современного их положения.

В северном полушарии кривые движения полюса для Европы и Северной Америки можно привести в соответствие, если предположить, что Америка дрейфовала, относительно Европы к западу, под углом 30^0 начиная с триасового (примерно 250 млн. лет назад) времени. Палеомагнитные и палеоклиматические наблюдения показывают, что в палеозое и мезозое (700-100 млн. лет назад) оба континента были гораздо ближе к экватору. Точно так же Англия и США находились в экваториальной зоне с карбона (300-400 млн. лет назад). Небольшие расхождения, обнаруженные геологическими наблюдениями, приводят к предположению о тесной близости двух континентов во времени верхнего палеозоя (400-300 млн. лет назад).

В южном полушарии палеомагнитные данные указывают на то, что части расколовшейся Гондваны в конце палеозоя (около 300 млн. лет назад) находились в высоких южных широтах, о чем свидетельствуют пермокарбонное (400-300 млн. лет назад) оледенение. Движение основных обломков Гондваны с палеозоя (300 млн. лет назад) до настоящего времени (без учета блуждания полюса) представляется следующим образом:

Южная Америка от кембрия до карбона находилась вблизи южного полюса, в пермский период быстро перемещалась к северу и почти не двигалась, начиная с триаса, занимая положение по широте, близкое современному.

Южная Африка в верхнем палеозое находилась в высоких южных широтах, а в периоды пермский и триасовый дрейфовала к северу до настоящего ее положения.

Австралия в девоне, возможно, находилась вблизи экватора, в карбоне и перми оказалась вблизи южного полюса, а в мезозое и третичном периоде дрейфовала к северу до современного положения.

Антарктида начиная с юрского периода дрейфовала от средних широт до современного положения.

Индия начиная с мезозоя быстро дрейфовала к северу со средних широт и в своем движении пересекла экватор.

Реконструкция положений Южной Америки, Африки и Австралии в эпоху палеозоя по палеомагнитным данным показана на рис. 7.7. Это построение в деталях согласуется с геологической реконструкцией. Общий же принцип, что отдельные части Гондваны были вблизи друг друга и располагались у южного полюса, подтверждается палеомагнитными данными. Поскольку число надежных палеомагнитных данных увеличивается, можно ожидать уточнения наших представлений о древней географии Гондваны.

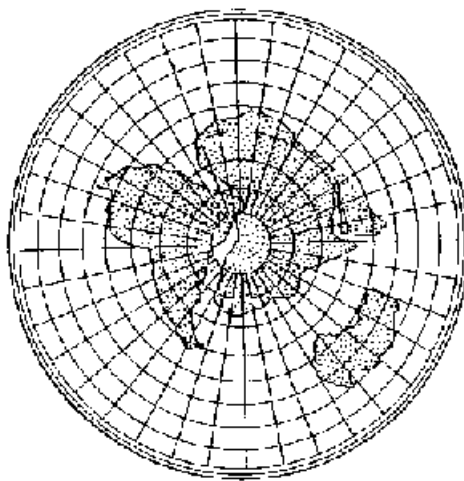


Рис. 7.7. Относительное расположение Южной Америки, Африки и Австралии в палеозое, полученное путем объединения кривых движения полюса (Ботт, 1974; с. 251).

По мнению М.Ботта, каждый, кто знакомится с результатами геологических и палеомагнитных исследований, подтверждающих гипотезу дрейфа, не может избежать сильного впечатления от их убедительности. Трудно представить себе, каким образом можно было бы иначе интерпретировать эти результаты.

Разрастание дна океанов и дрейф континентов (Ботт, 1974; с. 252). Одним из важных результатов магнитной съемки в северо-восточной части Тихого океана было открытие больших боковых смещений структуры аномального магнитного поля в зонах разломов Мендосино, Пайонир и Марри (рис. 7.8, 7.9). В зонах разломов Мендосино и Пайонир обнаружены боковые смещения полос магнитных аномалий до 1400 км влево, а на разломе Марри они сместились вправо у западного конца разлома на 680 км и только на 150 км у восточного его конца. Это может указывать на наличие вполне определенных закономерностей движения океанической коры.

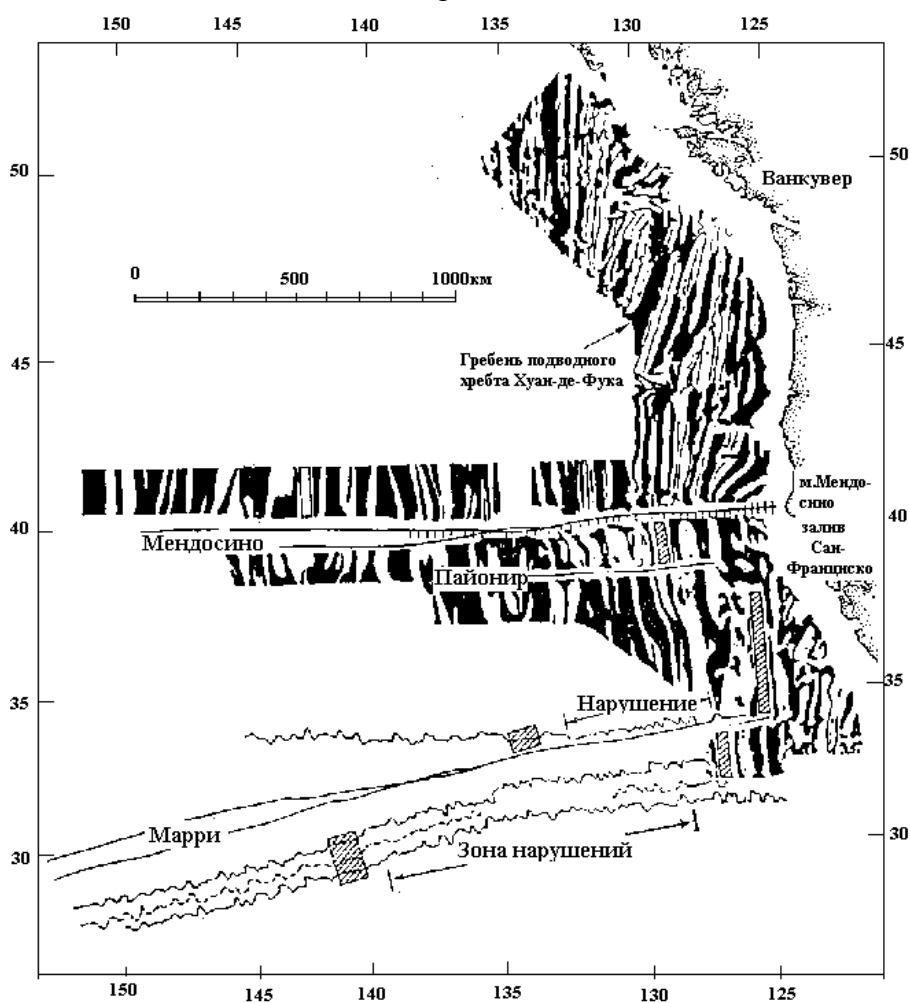


Рис. 7.8. Линейный характер магнитных аномалий к западу от побережья Северной Америки. Положительные аномалии показаны черным цветом. Полосы имеют ширину около 10-20 км, а амплитуда аномалий от пика к пику достигает 1000γ (рис. 7.9). Последующие работы показали, что полосчатость магнитных аномалий типична для океанических регионов (Ботт, 1974; с. 100).

На рис. 7.10 представлены магнитные аномалии для различных районов Тихого, Атлантического и Индийского океанов. Из данных, представленных на этом рисунке, видно, что имеет место определенный рисунок, для которого характерно расположение аномалий параллельно и билатерально симметрично системе срединно-океанических хребтов. В каждой из этих океанических областей стиль рисунка магнитных аномалий идентичен. Подобное сходство может быть вызвано одной и той же последовательностью

формирования блоков коры в каждом из рассматриваемых районов, с которыми эти аномалии связаны. Блоки включают серии чередующихся полос нормально и обратно намагниченного материала, преимущественно базальтового состава (Новая глобальная..., 1974; с. 38).

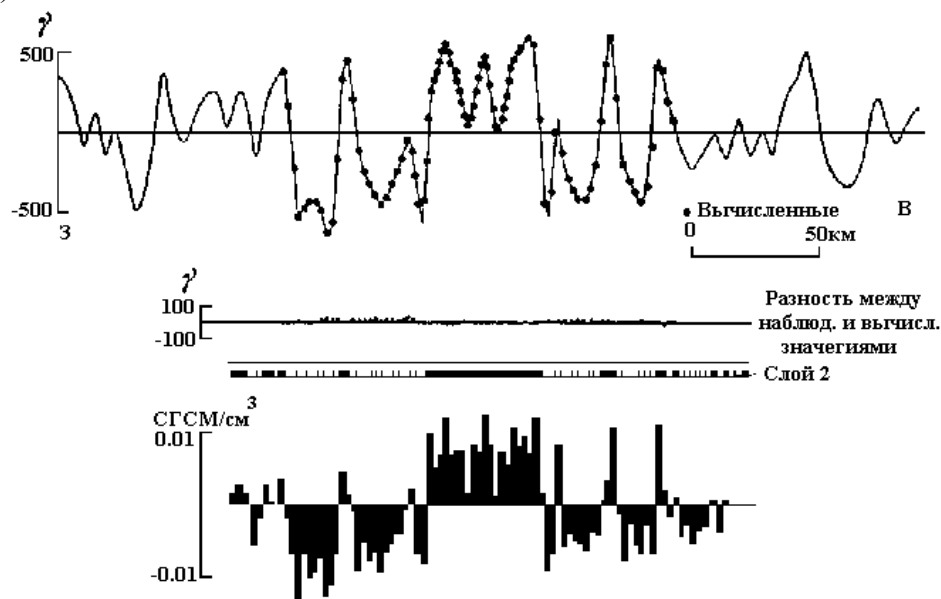


Рис. 7.9. Интерпретация магнитных аномалий по профилю через подводный хребет Хуан-де-Фука в северо-восточной части Тихого океана. При интерпретации определялась намагниченность слоя 2. Слой 2 был представлен двумерными прямоугольными блоками. Рассчитывалась намагниченность каждого блока, результаты изображены внизу рисунка. Приведены также разности между наблюдаемыми и вычисленными значениями аномалий. Следует обратить внимание на симметрию аномалий относительно осевой части хребта (Ботт, 1974; с. 101).

Данные, представленные на рис. 7.11, показывают, что чередование инверсий магнитных аномалий происходит хотя и не линейно, но непрерывно.

Такое расположение аномалий определяет значение скорости, с которой блоки океанической коры дрейфуют от центра трансформного разлома – гипотеза дрейфа океанического дна.

Тектоника плит (Ботт, 1974; с. 267 – 272). Концепция тектоники плит (или блоков) развилась из гипотезы разрастания океанического дна и трансформных разломов. Общие принципы гипотезы почти одновременно предложены Д.Маккензи и Р.Паркером (1967), а также В.Морганом (1968). Их основная идея состоит в том, что наружная оболочка твердой Земли, образующая литосферу, подвергается сильным деформациям только вдоль относительно узких линейных подвижных поясов. Подвижные пояса и соединяющие их трансформные разломы разделяют литосферу на серию «жестких плит», не подвергающихся заметным внутренним растяжениям, складчатости или искривлениям. Основная доля тектонической активности Земли сконцентрирована на границах между соседними плитами.

Согласно хорошо аргументированному представлению теории изостазии (раздел 5), податливая астеносфера покрыта относительно жесткой литосферой (или тектоносферой), толщина которой достигает 50-100 км. Справедливость этой реологической модели подтверждается многими современными наблюдениями, а также экспериментальными и теоретическими исследованиями. Другое обоснование тектоники плит состоит в том, что плиты литосферы могут передавать напряжения без изгибов на большие горизонтальные расстояния.

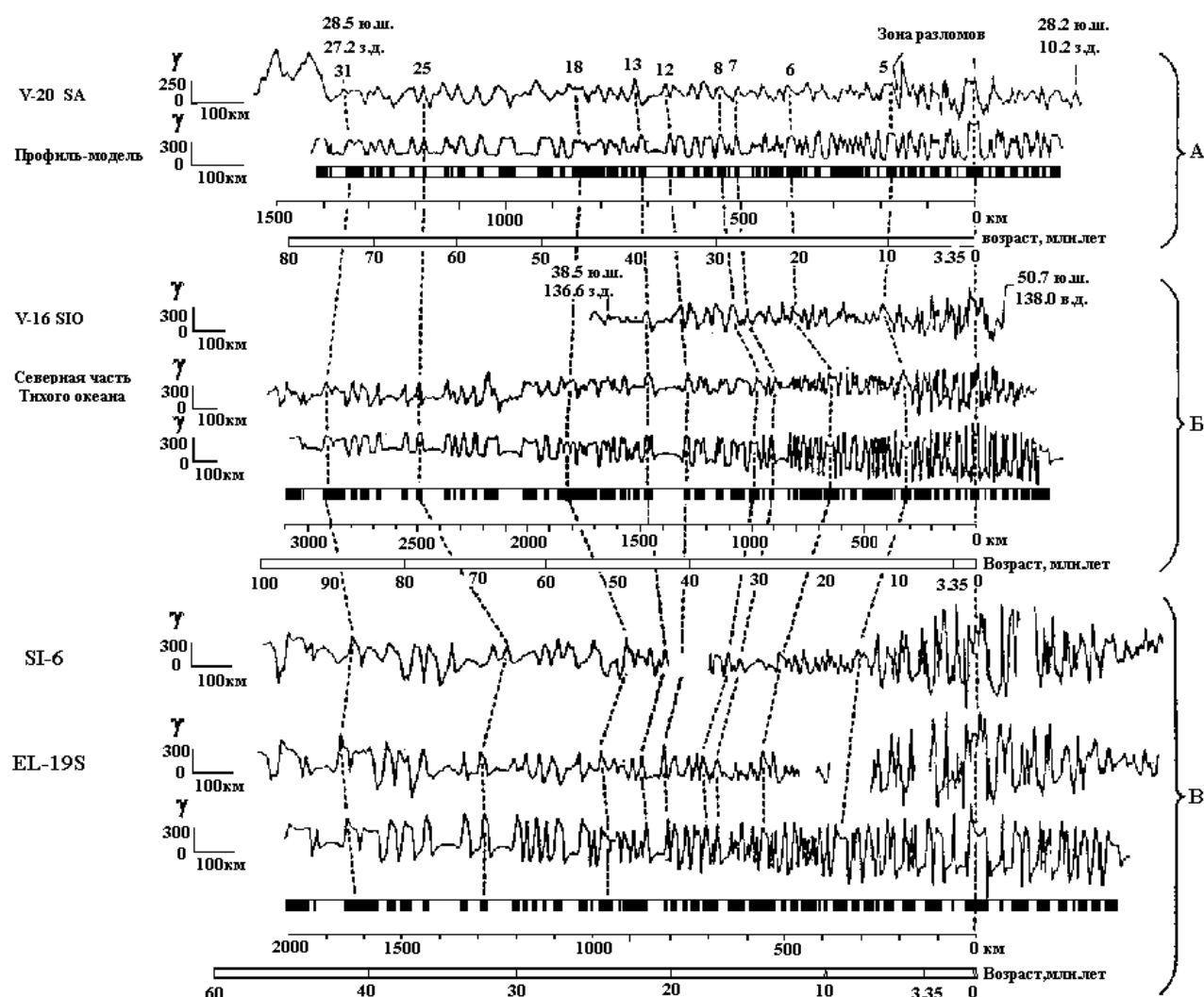


Рис. 7.10. Профиль южной части Атлантического океана (SA), профиль южной части Индийского океана (SIO), другие профили для северной части Тихого океана (SI-6, EL-19S). Под каждым наблюдаемым профилем помещен теоретический профиль, рассчитанный исходя из нормальной (черная полоса) и обратной (светлая полоса) намагниченности тел. Мощность каждого тела 2 км. Для каждой модели прилагается шкала времени. Вертикальные пунктирные линии соединяют сходные по форме аномалии, обозначение сверху соответствующим номером (Новая глобальная ..., 1974; с. 39).

Привлекательность теории плит объясняется простой геометрической интерпретацией процесса разрастания дна океанов и континентального дрейфа на поверхности почти сферической Земли. Эта теория относит большую часть тектонической активности Земли, включая дрейф континентов и образование подводных океанических хребтов, молодых складчатых структур, глубоководных желобов, островных дуг, высоких плато и рифтовых долин, к единому процессу разрастания дна океанов. Большая часть выходов тектоники плит следует из чисто геометрических соображений безотносительно от процессов, вызывающих движение плит.

Любое возможное перемещение плиты на сферической поверхности можно получить вращением ее около некоторой оси, проходящей через центр сферы. Вы можете легко проверить это. Любое заданное перемещение полностью определяется положением полюсов на поверхности сферы, т. е. точек пересечения с ней оси вращения, и углом поворота около этой оси, создающим перемещение. Точно также относительное движение двух плит определяется полюсом вращения и угловой скоростью.

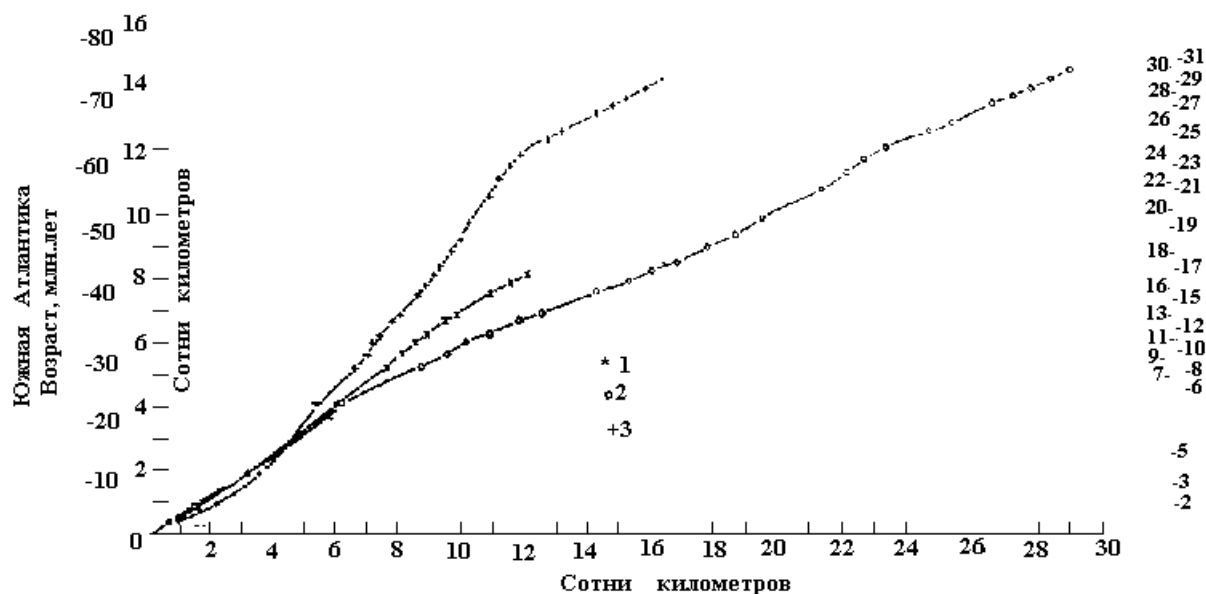


Рис. 7.11. Изменение расстояния от оси хребта до магнитных аномалий в южной части Атлантического океана (профили V-20 SA, рис. 6.10.), по отношению к расстоянию до тех же аномалий в южной части Индийского и северной и южной частях Тихого океанов. Цифры справа соответствуют номерам аномалий (см. рис. 7.10). 1 - южная часть Индийского океана, 2 - северная часть Тихого океана, 3 - южная часть Тихого океана (Новая глобальная ... 1974 с. 40).

В качестве первого приближения Ле Пишон разделил поверхность Земли на шесть главных плит (рис. 7.12).

Используя зоны разломов и скорости разрастания, он рассчитал положение полюсов вращения и угловую скорость разделения каждой пары раздвигающихся плит (табл. 7.1).

Затем он подсчитал относительное движение плит у границ сжатия, предположив, что площадь поверхности Земли остается постоянной. Его результаты представлены на рис. 7.12. При этом Ле Пишон не принимал во внимание скорости разрастания дна у подводных хребтов в южной части Индийского океана, так как они оказались избыточными при вычислениях. Вычисленные для них значения оказались в превосходном согласии с наблюдениями.

Расчеты Ле Пишона показали, что образование новой плиты в Тихом океане недостаточно для того, чтобы объяснить разрушение плиты у ее краев. Поэтому мы приходим к выводу, что Евразия и Америка сближаются со скоростью около 2-4 см/год. При такой скорости Тихий океан должен исчезнуть приблизительно через 300 млн. лет, хотя столкновения соседних континентов, возможно, остановят процесс до того, как это событие совершится. Из расчетов следует, что Американская, Евразийская и Африканская плиты в настоящее время увеличиваются в размерах, в то время как размеры Индийской и Антарктической плит заметно не меняются.

Полюсы вращения плит по теории разрастания дна теперь располагаются в Тихом и Атлантическом океанах близко друг к другу и недалеко от северного полюса Земли. Этот факт не может быть случайностью, и поэтому можно полагать, что вращение Земли влияет на направление разрастания дна в настоящее время, а также влияло и в прошлые эпохи. С другой стороны, полюс пояса вращения расширяющегося Индийского океана лежит в Северной Америке. Ле Пишон показал, что такое положение пояса является геометрически необходимым для совместности процессов разрастания в других океанах.

Иными словами, скорости и направления разрастания и расширяющихся океанов взаимосвязаны.

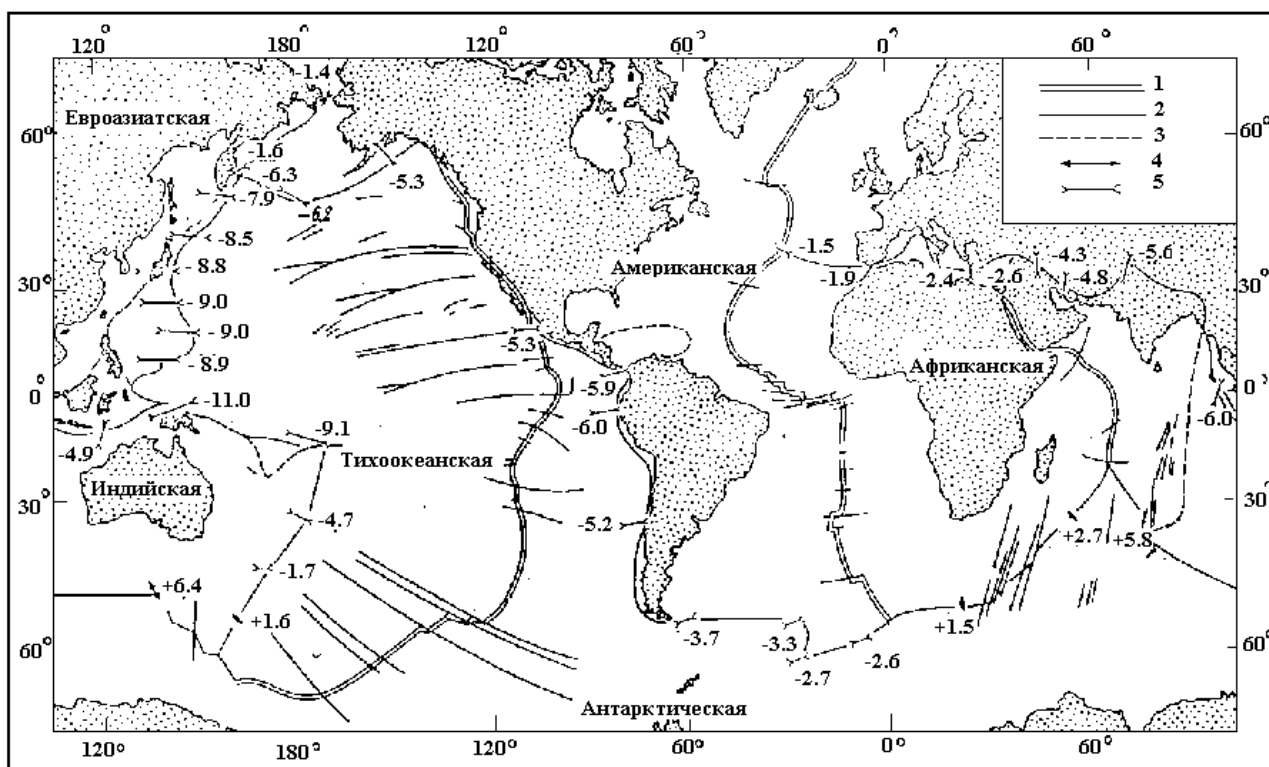


Рис. 7.12. Главные плиты, образующие земную поверхность. Указаны рассчитанные скорости относительных перемещений в Тихоокеанском кольцевом поясе, Альпийско-Гималайском поясе, хребтах южной части Индийского океана и дуге Скоша (скорости в см/год, знаки «+» и «-» относятся к растяжению и сжатию). Расчеты основаны на измеренных значениях скорости разрастания у подводных хребтов. 1 – линии с известной скоростью расширения, 2 – границы блоков с рассчитанным результирующим движением, 3 – границы возможных блоков, не учтенных в расчетах, 4, 5 – результирующее дифференциальное движение, 4 – растяжение, 5 – сжатие (Ботт, 1974; с. 269).

Таким образом, было показано, что совершенно независимые данные, почерпнутые из многих областей геологии, палеомагнетизма и морской геофизики, дают поразительно согласованные подтверждения континентального дрейфа. Новые гипотезы разрастания океанического дна и тектоники плит создают геометрическую основу, в рамках которой дрейф континентов может осуществляться через известные тектонические процессы, воздействующие на литосферу, без каких бы то ни было искривлений подавляющей части земной поверхности.

Электрические эффекты (Таблицы ..., 1976; с. 996). В процессе исследований было установлено, что электрические токи в Земле ассоциируются с временными изменениями магнитного поля. Эти токи называются "теллурическими". Если одновременно измерять вариации магнитного и электрического полей, то можно получить представление о распределении электропроводности на глубине.

Плотность теллурических токов для различных участков земной поверхности приблизительно одинакова и равна 2 а/км^2 . Интенсивность теллурических токов возрастает от низких широт к высоким широтам. На низких широтах напряженность поля обычно не превосходит десятков милливольт на километр. В полярных странах

напряженность может достигать единиц и даже десятков вольт на километр; наиболее сильные теллурические токи во время магнитных бурь.

Таблица 7.1. *Полюсы вращения при разрастании океанического дна, полученные способом наименьших квадратов (Ботт, 1974; с. 268).*

Способ определения	Число оценок	Широта	Долгота	Ошибка определения град.	Угловая скорость, 10^{-7} град/год
<i>Южная часть Тихого океана (отделение Антарктической плиты от Тихоокеанской)</i>					
Зоны разломов	6	70 N	118 E	4.5	10.8
Скорость разрастания	11	68 N	123 E		10.8
<i>Атлантический океан (разделение Америки и Африки)</i>					
Зоны разломов	18	58 N	37 W	2.9	3.7
Скорость разрастания	9	69 N	32 W		3.7
<i>Северная часть Тихого океана (разделение Америки и Тихоокеанской плиты)</i>					
Зоны разломов	32	53 N	47 W	5.7	6.0
<i>Индийский океан (разделение Африки и Индии)</i>					
Зоны разломов	5	26 N	21 E	0.6	4.0
<i>Северный Ледовитый океан (разделение Америки и Евразии)</i>					
Зоны разломов	4	78 N	102 E	9.1	2.8

Магнитогидродинамические параметры земного ядра (Жарков и др., 1971; с. 89 – 95). Как следует из полученных данных, земное ядро является жидким и металлическим. В настоящее время большинство исследователей склоняется к тому, что тепловая и гравитационная конвекция в земном ядре является именно той причиной, которая приводит к созданию геомагнитного поля. Эта идея была высказана Я.И. Френкелем и В. Эльзассером. Теория геомагнитного поля получила название гидромагнитного динамо (ГД) в силу своей аналогии с действием обычной динамомашины с самовозбуждением. Первые исследования в этой области были выполнены Эльзассером и Буллардом.

Первый необходимый шаг в теории ГД заключается в доказательстве самой возможности самовозбуждения магнитного поля при движении однородной проводящей жидкости в шаровой области. Требуется доказать, что уравнение индукции

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{rot}(V \times B) + D \nabla^2 B, \text{div} B = 0 \quad (7.1)$$

имеет ненулевое решение в отсутствие внешних полей. Здесь V - гидродинамическая скорость жидкости, B - магнитное поле, D - коэффициент магнитной диффузии. В 1958 г. независимо Герценбергу и Бейкусу удалось строго доказать, что уравнение (7.1) обладает стационарным и нестационарным решениями. Тем самым была доказана принципиальная возможность ГД.

Численный анализ указывает, что основными гидродинамическими силами в ядре являются кориолисовы и магнитные силы. Вязкие и инерционные силы являются пренебрежимо малыми. Архимедовы силы должны быть порядка магнитных и кориолисовых, так как именно они приводят в движение ГД.

ГД Земли представляет собой сложную автоколебательную систему, которую можно характеризовать определенным спектром колебаний. Исследования геомагнитных вариаций также обнаруживают, что так называемое "постоянное поле" изменяется

довольно сложным образом и грубо схематически может быть охарактеризовано некоторым спектром (рис. 7.13).

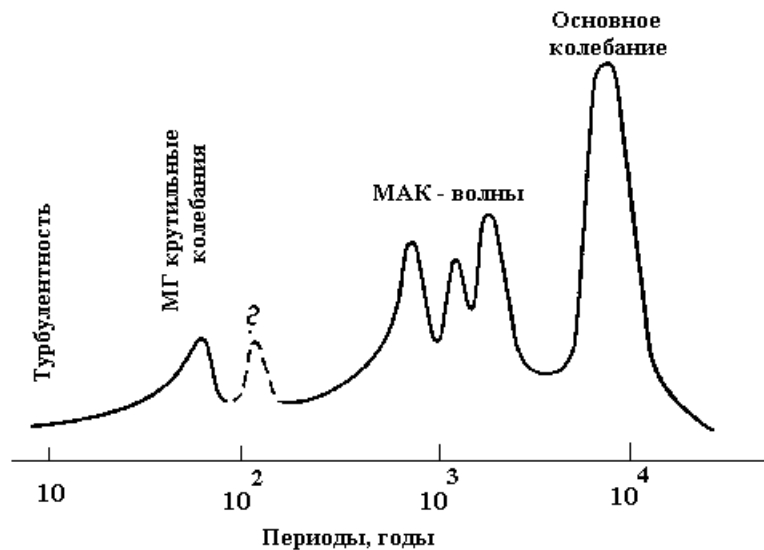


Рис. 7.13. Спектр магнитогидродинамических колебаний в земном ядре (Жарков и др., 1971; с. 93).

И эксперимент и теория указывают, что в спектре этих колебаний содержатся частоты трех заметно различающихся величин:

- 1) основная частота, соответствующая периоду около $7,5 \cdot 10^3$ лет,
- 2) ряд колебаний "средних" частот, соответствующих периодам $\sim 10^3$ лет (период западного дрейфа),
- 3) колебания высоких частот с периодами $\sim 10^2$ лет и менее.

Кроме линейчатого спектра, колебания ГД содержат также случайную компоненту типа шума - сплошной спектр. Сравнение экспериментального спектра с теоретическим позволяет определить некоторые параметры земного ядра.

С.И. Брагинский заметил, что даже среднее геомагнитное поле (осевой диполь) не является стационарным, а колеблется с периодом $\sim 7,5 \cdot 10^3$ лет (основная частота в спектре). При этом все внешние условия на границе ядра из-за крайне большой тепловой инерции земных недр остаются постоянными в течение, по крайней мере, сотен тысяч лет. Колебания поля происходят вокруг некоторого среднего значения, не равного нулю, и обусловлены наиболее крупномасштабной конвекцией в ядре.

Средние периоды по палеомагнитным и археомагнитным данным обнаруживают значения $\sim 10^3$ лет и, в частности, периоды, равные 550, 700, 1200, 1800 и 7000 лет.

Периодами $\sim 10^3$ лет обладают магнитогидродинамические колебания, в которых существенную роль играют магнитные, архимедовы и кориолисовы силы. Соответственно они названы МАК - волнами. В этих волнах магнитные, архимедовы и кориолисовы силы взаимно уравновешиваются.

Высокие частоты в спектре геомагнитного поля имеют периоды $\sim 10^2$ лет и короче. Обнаружено, что эти колебания коррелированы с вариациями в скоростях вращения Земли. Колебания скорости дрейфа эксцентрического поля и колебания длины суток происходят весьма согласованно с общим периодом ~ 60 лет. С.И. Брагинский показал, что эти явления имеют общую причину - магнитогидродинамические колебания крутильного типа в земном ядре.

Электромагнитное взаимодействие оболочки и ядра. Идея об электромагнитной связи ядра и оболочки была выдвинута в 1950 г. Буллардом, который предположил, что западный дрейф недипольной части поля обусловлен тем, что внешние слои ядра

вращаются несколько медленнее, а внутренние несколько быстрее, чем все ядро в целом. Дифференциальное вращение в ядре связано с предполагаемой там конвекцией, приводящей в действие ГД. Так как движение при конвекции обладает заметной радиальной компонентой, то сохранение момента количества движения будет приводить к тому, что внешние области ядра будут вращаться несколько медленнее, чем внутренние. Из магнитной гидродинамики известно, что если проводимость среды высока, а именно такой случай имеет место в ядре Земли, то проводящая жидкость при своем движении переносит связанное с ней магнитное поле. Так Буллард объяснял западный дрейф. Это объяснение в настоящее время представляется несколько упрощенным: полагают, что на конвективный дрейф к западу накладываются бегущие МАК - волны.

Механизм генерации геомагнитного поля - это «проблема № 1» в физике Земли Кузнецов, 2000; с. 30-33). Ф. Буссе утверждает (1984), что А. Эйнштейн считал эту проблему одной из трех важнейших проблем физики. Несмотря на колоссальные усилия сотен физиков, занимающихся этой проблемой, нет ни одного достаточно серьезного успеха в этом деле. Проследим еще одну цепочку. Если магнитное поле на Земле обязано динамо-эффекту в жидком железном ядре (что не подвергается сомнению), то почему магнитное поле раньше было на Марсе, Луне, Ио, Ганиমেде, а потом исчезло? (Возможно, что на Ганимеде поле ещё существует). Почему оно обнаружено на Меркурии, но его нет на Венере? Почему магнитное поле имеется на больших планетах (по своей структуре однотипное с земным), где, по-видимому, нет железного ядра? Разговоры относительно того, что, дескать, динамо на этих планетах “раскручивается” в жидком водороде, и вообще эти планеты “холодные”, “разбиваются” результатами наблюдений космической станцией Вояджер, которая обнаружила, что тепловой поток на этих планетах значительно превышает поток тепла от Солнца на их расстояниях.

Остановимся на теоретической проблеме динамо. Модель генерации геомагнитного поля базируется на совместном решении нескольких уравнений. Они описывают движение вязкой проводящей жидкости, заполняющей сферическую полость внешнего ядра. Жидкость подвергается воздействию гравитационных, гидродинамических, инерционных и электромагнитных сил. Движение жидкости описывается: 1) гидродинамическим уравнением Навье-Стокса, 2) уравнением индукции, связывающим магнитное поле с движением жидкости, 3) уравнениями неразрывности и 4) термодинамики.

Уравнение Навье-Стокса в векторной форме имеет вид:

$$\partial \mathbf{v} / \partial t + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \nu/3 \nabla(\operatorname{div} \mathbf{v}) - 2(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) - 1/\rho \nabla p + \mathbf{g} - \mu/4\pi\rho \operatorname{rot} \mathbf{H} \times \mathbf{H},$$

где t – время, $\mathbf{v}$ – вектор скорости, ν – коэффициент кинематической вязкости, $\boldsymbol{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения Земли, ρ – плотность вещества внешнего ядра, P – давление, $\mathbf{g}$ – ускорение массовых сил, μ – магнитная проницаемость, $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля.

Уравнение индукции в векторной форме записывается в виде:

$$\partial \mathbf{H} / \partial t = \operatorname{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{H}) + \nu_m \Delta \mathbf{H},$$

где ν_m – коэффициент «магнитной диффузии» (магнитная вязкость).

Уравнения неразрывности и диффузии тепла (T – температура):

$$\begin{aligned} \nabla(\mathbf{v} \times \mathbf{H}) &= 0, \\ \partial T / \partial t + \mathbf{v} \nabla T &= Pr^{-1} \nabla^2 T \end{aligned}$$

Эти уравнения содержат $\mathbf{v}$ и $\mathbf{H}$ и должны решаться совместно, однако, их совместного решения до сих пор не получено (и вряд ли возможно), поэтому проблема генерации геомагнитного поля идет в направлении разработки кинематической теории динамо, в которой скорость жидкости $\mathbf{v}$ считается известной и решается только уравнение индукции, определяющее геомагнитное поле. Если принять, что характер движения жидкости задан, необходимость решения уравнения Навье-Стокса отпадает, а

уравнение индукции превращается в линейное уравнение в частных производных второго порядка, которое после соответствующих преобразований может быть решено.

Заметим, что внимательный анализ особенностей геомагнетизма в контексте динамо модели показывает, что:

- Динамо не решает ни одной из проблем геомагнетизма, кроме одной, в которой показана принципиальная возможность генерации магнитного поля посредством взаимодействия полоидального (дипольного) и тороидального магнитных полей. Однако при этом не находят решения такие особенности геомагнетизма как: инверсии поля, западный дрейф, движение магнитных полюсов, джерки, морфология поля и т.п.

- Принято считать, что причина появления джерков, т.е. быстрых (в течение одного года) изменений магнитного поля, присуща механизму генерации геомагнитного поля. Если джерки генерируются около поверхности внутреннего ядра, то в этом случае можно оценить электропроводность внешнего ядра Земли. Оцененная таким образом электропроводность примерно на 5 порядков меньше, чем постулированная величина проводимости, необходимая для протекания динамо-эффектов.

- Не найдены численные решения уравнения гидродинамики, подтверждающие принятую в динамо модель конвекции.

- Данные сейсмологии (travel time, splitting functions) не подтверждают принятую модель конвекции, а, скорее, ей противоречат.

- Нет единой теоретической модели динамо. Огромное количество противоречащих друг другу моделей ($\alpha\omega$ -динамо (рис. 7.13), α^2 – динамо, динамо Рикитаки, диск Фарадея и т.д.) говорит о сомнительности этих подходов.

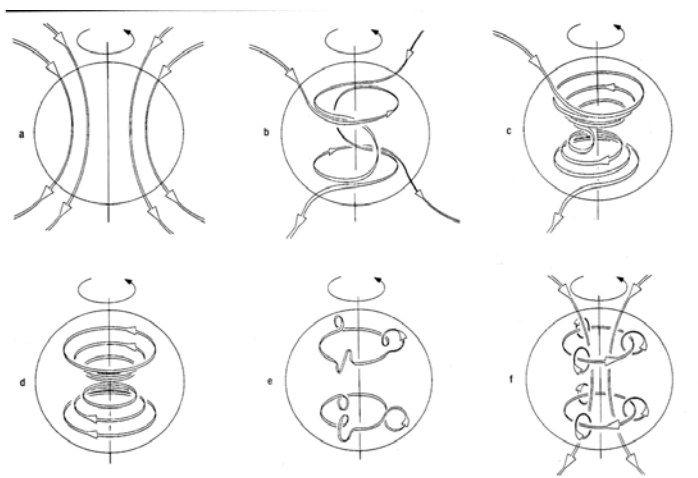


Рис. 7.13. Модель $\alpha\omega$ -динамо.

- Принципиальным моментом многих моделей динамо является наличие во внешнем ядре сильного тороидального поля. По некоторым моделям интенсивность тороидального поля больше дипольного в 500 раз. Тем не менее, тороидального поля на поверхности Земли не обнаружено. Мы, вероятно, могли бы не обнаружить наличие тороидального поля на земной поверхности, например, если бы ядро было окружено сверхпроводящим экраном. Однако, если бы по какой-либо немыслимой причине на границе ядра оказался бы сверхпроводящий экран, то мы могли бы судить о его наличии с помощью электромагнитного зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботт М. Внутренне строение Земли. М.:Мир. 1974. 376.
2. Буссе Ф. Магнитная гидродинамика земного динамо // Вихри и волны. М.: Мир. 1984. 335 с.

3. **Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В.** Физика Земли и планет. Фигуры и внутренне строение. М.: Наука. 1971. 384 с.
4. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
5. **Магницкий В.А.** Внутреннее строение и физика Земли. М. Недра. 1965. 379 с.
6. **Новая** глобальная тектоника. М.: Мир. 1974. 472 с.
7. **Таблицы** физических величин (под ред. И.К. Кикоина). М.; Атомиздат. 1976. 1008 с.
8. **Яновский Б.М.** Магнитное поле Земли. Л.: Знание. 1967. 48 с.

VIII. ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛИ

Введение в проблему (Гуттенберг, 1963; Ботт, 1974).

Геотермические измерения на континентах и в океане. Определение теплового потока и геотермического градиента, их связь с основными, структурными единицами земной коры (Гуттенберг, 1963; Магницкий, 1965; Стейси, 1972; Ботт, 1974; Шейдеггер, 1987).

Уравнение теплопроводности, ее виды в Земле. Оценка температуры в верхней части литосферы (до глубин около 100 км) по данным геотермических измерений (теплового потока), магматической деятельности (по температуре лав) и электропроводности (Магницкий, 1965).

Понятие о нижнем температурном пределе в мантии и его оценка с помощью адиабатического температурного градиента. Обоснование верхнего температурного предела в мантии как температуры плавления (Магницкий, 1965).

Экспериментальное определение температуры плавления в мантии; результаты и трудности. О термодинамической формуле Клаузиуса-Клайпейрона. Определение температуры плавления в мантии по гипотезам плавления (Линдемана и Жарков). О реальных температурах в мантии (Магницкий, 1965).

Температура в ядре Земли, ее оценка с помощью уравнений для состояния железа при давлении и плотности в ядре; температура плавления железа; адиабатическая температура и др. (Магницкий, 1965).

Обобщенная температурная кривая по радиусу Земли. Источники тепла Земли и их относительный вклад в общий тепловой баланс планеты. Гипотезы и варианты тепловой истории Земли (Магницкий, 1965).

Введение в проблему (Гуттенберг, 1963; с. 147 – 149; Ботт, 1974; с. 213 – 214). Средняя температура на земной поверхности изменяется приблизительно от 0 до -40°С в районе Северного полюса и от -10 до -50° в районе Южного полюса и составляет около 26° на протяжении всего года в экваториальной зоне. Средняя температура всей земной поверхности около 15°, со средними колебаниями около 2° в течение года.

Температура данной точки на земной поверхности зависит главным образом от солнечной радиации, достигающей этой точки, и угла, под которым солнечные лучи падают на поверхность. Следует учитывать также излучение, отдаваемое Землей обратно в пространство, и теплообмен посредством воздушных течений. Средний поток солнечного тепла, достигающий поверхности Земли на континентах, составляет по порядку величины 10^{-2} кал/см²сек. Поэтому поток тепла из недр Земли, составляющий около 10^{-6} кал/см²сек, по сравнению с ним пренебрежимо мал. Температура дна океанов определяется локальной температурой воды, которая в глубоких океанах близка к 0°.

Изучение тепловых процессов, протекающих в Земле, - один из самых умозрительных разделов геофизики. Объясняется это тем, что данные о наблюдаемом на поверхности тепловом потоке и температуре в недрах Земли можно интерпретировать многими различными способами. Для областей Земли глубже 100 км наши знания о распределении температуры весьма ненадежны, а расположение источников тепла и механизм его переноса неизвестны. Однако изучение теплового режима весьма важно, поскольку потеря тепловой энергии Землей может быть, прямо или косвенно, причиной большей части тектонических и магматических процессов.

Рассмотрим основные энергетические процессы, в которых участвует Земля (табл. 8.1). Самое большое количество энергии Земля получает от Солнца, но значительная ее часть излучается обратно в пространство. Лишь малая доля солнечной энергии проникает в глубину, измеряемую метрами. Действительно, в слоях, расположенных близко к поверхности континентов, все периодические изменения температуры убывают с

глубиной по экспоненциальному закону. На глубине порядка 1 м от поверхности суточные изменения температуры становятся настолько малыми, что ими можно пренебречь. Так при среднем для поверхностных пород коэффициенте теплопроводности интервал изменения температуры в 20°C на поверхности сократится до $1,4^{\circ}$ на глубине 30 см и менее чем до $0,004^{\circ}$ на глубине 1 м . На глубине 30 см вычисленное запаздывание по времени составляет около 10 час . Все эти расчетные значения, в основном, согласуются с наблюдениями. Поэтому солнечное излучение является основным источником энергии лишь для процессов, совершающихся на поверхности твердой Земли и над ней. Солнечное излучение управляет также температурой на поверхности Земли, защищаемой от резких перемен покровом атмосферы. В то же время тепловое влияние солнечной энергии на процессы в недрах Земли пренебрежимо малы по сравнению с той энергией, которая выделяется внутренними источниками тепла. Энергия, высвобождающаяся при землетрясениях, как и энергия приливного трения, замедляющего вращение Земли, также невелика по сравнению с геотермической потерей тепла.

Таблица 8.1. Основные составляющие энергетического баланса Земли (Ботт, 1974; с. 213)

	эрг/год
Солнечная энергия (получаемая и переполучаемая обратно)	32 10 28
Геотермическая потеря тепла	10 26
Энергия, теряемая при замедлении вращения Земли	3·10 25
Упругая энергия, высвобождаемая землетрясениями	10

В настоящее время принято считать, что основным источником современной тепловой энергии в недрах Земли является радиоактивный распад долгоживущих изотопов. На ранних этапах истории Земли существенную роль в тепловых процессах могла играть освобождающаяся гравитационная энергия. По мере рассеяния тепла малая доля потока Земли переходит в другие формы энергии, которые вызывают тектонические и магматические процессы, метаморфизм и создают магнитное поле Земли (см. раздел 7).

Геотермические измерения на континентах и в океане. Определение теплового потока и геотермического градиента, их связь с основными, структурными единицами земной коры (Гутенберг, 1963; с. 147 – 149; Магницкий, 1965; с. 5 – 6; Ботт, 1974; с. 214 – 223; Шейдеггер, 1987; с. 100 – 102; Стейси, 1971; с. 269 – 271). Когда-то считалось, что Земля может по существу представлять собой тепловую машину. Это означает, что энергия, вызывающая геодинамические явления, может быть результатом тепловых процессов. К сожалению, термальная история Земли известна недостаточно, так как она непосредственно связана с вопросами происхождения Земли и химическим составом ее недр.

Температура внутренних частей Земли в настоящее время известна с очень малой точностью. Температура ее верхних частей до глубин 50 км известна несколько лучше. Мы располагаем следующими источниками сведений о температуре верхних частей Земли: данными геотермических измерений, данными о генерации тепла главными типами горных пород, данными о температурах изливающихся лав и данными об электропроводности.

Тот факт, что тепло повсеместно истекает из недр Земли в пространство, с очевидностью доказывается повышением температуры с глубиной в любой скважине или шахте (рис. 8.1); температурные градиенты, измеренные на разных объектах, изменяются

от 25° до 40°C на 1 км . Следовательно, тепловой баланс может осуществляться только в том случае, если тепло поступает во внешнее пространство из недр Земли.

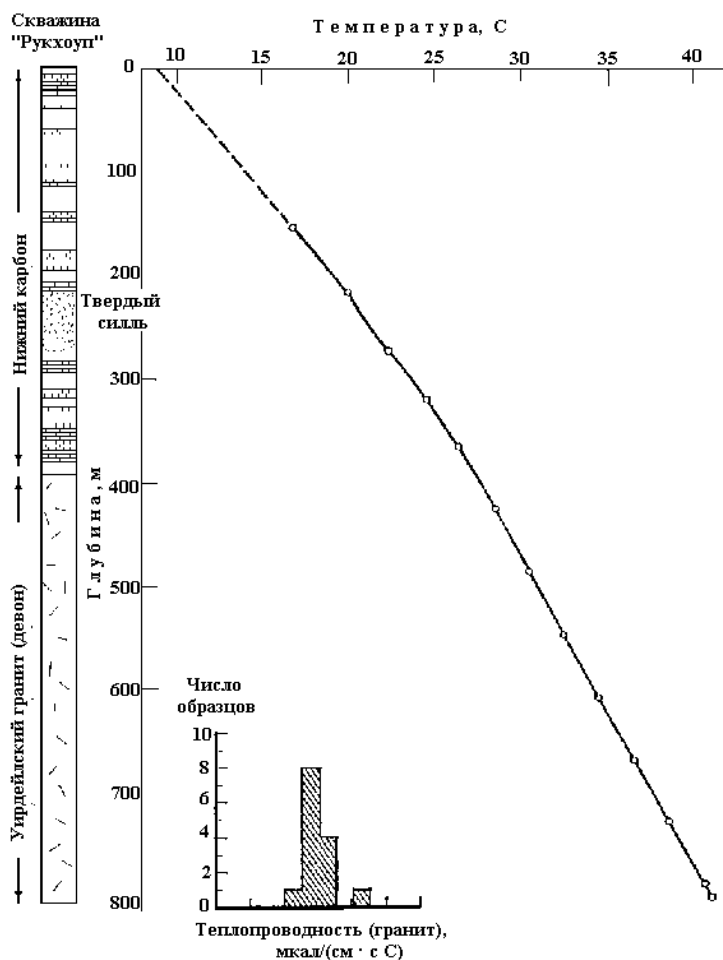


Рис. 8.1. Результаты определения теплового потока в скважине «Рукхоуп» (Станоп, Северная Англия). Измерения проводились через три года после завершения бурения. Измерения теплопроводности 13 гранитных образцов, взятых с равноотстоящих горизонтов между глубинами 427 и 792 м, представлены гистограммой внизу (Ботт, 1974; с.215). Общие результаты таковы:

Термический градиент (427 – 792 м)	$= 32.45 \pm 0.01^{\circ}\text{C/км},$
Поправка за топографию	$= -1.55 \pm 0.50^{\circ}\text{C/км},$
Исправленный термический градиент	$dT/dn = 30.90 \pm 0.51^{\circ}\text{C/км},$
Измеренная теплопроводность	$\chi = 0.0070 \pm 0.0002 \text{ кал}/(\text{см сек}^{\circ}\text{C}),$
Тепловой поток исправленный за топографию	$= 2.16 \pm 0.07 \text{ мккал}/(\text{см}^2 \text{ сек}).$

Геотермические измерения выполнялись как на континентах, так и на дне океанов. Тепловой поток определяется как произведение:

$$Q = -\chi \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (8.1)$$

где χ - коэффициент теплопроводности, $\partial T/\partial n$ – температурный градиент по нормали к поверхности Земли.

На континентах температурные градиенты определялись путем измерения температуры и коэффициента теплопроводности пород на различных глубинах в буровых скважинах (рис. 8.1). Обычно для этого применяются максимальные термометры, которые находятся нередко в воде, но часто в неподвижном воздухе. По возможности измерения проводятся в течение нескольких часов с помощью нескольких термометров

одновременно. Измерения должны выполняться глубже *200 м* (чтобы избежать остаточного влияния плейстоценового оледенения). Перед измерениями необходимо выждать некоторое время, чтобы в скважине (или шахте) установилось тепловое равновесие. Это время должно быть в несколько раз больше времени, затраченного на бурение скважины. Затем значения, полученные в течение нескольких периодов измерений, осредняются.

Теплопроводность образцов горных пород из скважины измеряется или в лаборатории, или же непосредственно на месте.

Пример измерения теплового потока в скважине «Рукхоуп» (Станоп, северная Англия) показан на рис.8.1. Тепловой поток здесь оценивается значением $2,16 \pm 0,07$ мккал/(см²сек).

По-видимому, впервые метод измерения термического градиента океанического дна опробовал Петтерсон. В последующие годы (1950 г.) Буллард и его коллеги применили этот метод в Тихом и Атлантическом океанах. Данный метод основан на измерении разности температур в отложениях океанического дна вдоль вертикального зонда, который имел длину около *0,5 м* и диаметр около *3 см*. В этих экспериментах зонд находился примерно в течение *15 мин* на расстоянии около *100 м* над дном океана. После этого он со скоростью *2-3 м/сек* заталкивался в дно и оставался там в течение *30-40 мин*. Поведение зонда детально изучалось и экспериментально и теоретически. По оценкам Булларда и др., при благоприятных условиях ошибки в определении температурного градиента не превышают *3%*.

Температурные градиенты отдельных областей сильно различаются, а также изменяются с глубиной, причем зависят, главным образом, от теплопроводности. При этом значения температурных градиентов варьируют в пределах *0,1 - 0,01 град/м*. Часто в качестве репрезентативного значения принимается значение $1/30 \text{ град/м} \approx 30 \text{ град/км}$.

Коэффициент теплопроводности χ определялся многими исследователями. Как правило, теплопроводность данного образца для большинства пород уменьшается с увеличением температуры. Для образцов, отобранных из дна океана, существенно водосодержание, так что необходимо обеспечить такое положение, при котором водосодержание таких образцов не изменялось бы. Из опубликованных данных следует, что $\chi = 0,005 \text{ кал/см} \cdot \text{град} \cdot \text{сек}$ для многих пород коры, он близок к значению *0,01* для ультраосновных пород. Для оливина и пироксена определено значение $\chi = 0,012$ при 0°C и $\chi = 0,008 \text{ кал/см} \cdot \text{град} \cdot \text{сек}$ при 200°C . Для кровли осадочных отложений дна Атлантического океана для коэффициента теплопроводности получено значение между *0,0023* и *0,0027*, а для верхнего слоя осадков в Тихом океане он лежит между *0,0016* и *0,0025*.

Средние значения теплового потока для разных регионов Земли приведены в табл. 8.2 (сомнительные результаты исключены) и представлены на рис. 8.2 а, б, в, г.

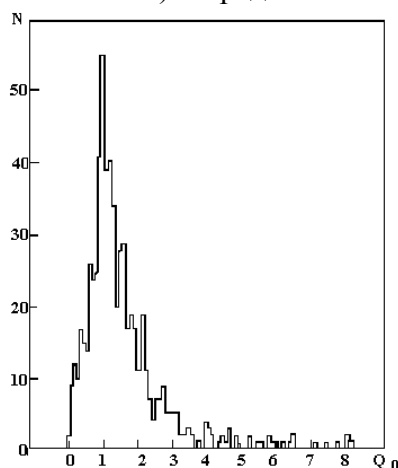


Рис. 8.2 а. Гистограмма распределения значений тепловых потоков для Земли в целом

(Магницкий, 1965; с. 6).

В представленных данных возможность появления систематических ошибок за счет климатических влияний исключается. Для измерений на материках этот вопрос разобран Берчем. Он не обнаружил существенного влияния климата на градиент температуры и показал, что необходимая поправка, во всяком случае, не превышает $3^{\circ}\text{C}/\text{км}$, т. е. составляет не более 15% среднего значения градиента. Важнее иметь уверенность в том, что климат не влияет на измерения в океане. Действительно, датчики температуры углубляются в дно лишь на несколько метров, и можно ожидать,

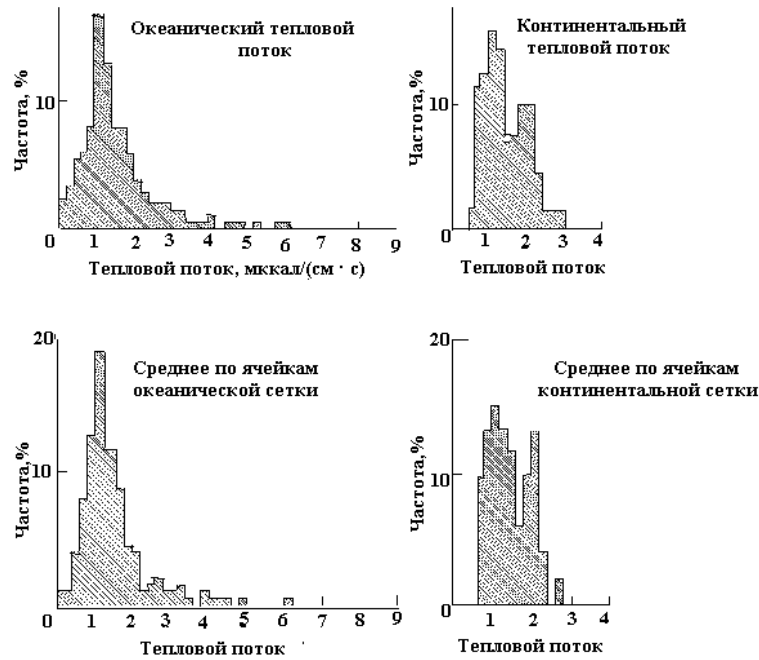


Рис. 8.2 б. Сравнение распределений океанического и континентального тепловых потоков. Вверху – гистограммы значений теплового потока, внизу – гистограммы средних значений по сетке с ячейкой 90 тыс. кв. морских миль. 1 морская миля = 1.8 км (Ботт, 1974; с. 217).

что колебания температуры воды окажут на измерения заметное влияние. К счастью, холодная вода, образующаяся при таянии полярных льдов, стекает во все глубокие части океанов и поддерживает там почти постоянно низкую температуру. Кроме того, нет пока воды, фильтрующейся сквозь морские осадки. Все эти факты означают, что на океанах скорее можно получить правильные значения теплового потока, чем на суше. Фон Герцен и Максвелл установили, что градиент температуры в скважине, пробуренной в дне океана (предварительная скважина проекта «Мохо»), совпал с результатами стандартных измерений в близлежащих точках. Поэтому вряд ли значительная доля теплового потока через дно океана обусловлена запасенным теплом, оставшимся после жаркого периода, когда на Земле не было ледяных полярных шапок.

Значения Q на поверхности Земли, как видно из данных табл. 8.2 и рис. 8.2, колеблются довольно сильно. Наибольшая частота таких значений, как видно из данных рис. 8.2, приходится на значение $Q_0 = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ кал}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$. Однако кривая распределения несимметрична. Это приводит к тому, что среднее значение теплового потока приходится на величину $Q_{0, \text{ср}} = 1,50(\pm 0,15) \cdot 10^{-6} \text{ кал}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$. При таком среднем значении потеря тепла путем теплопроводности с достоверностью 10% составляет $2,4 \cdot 10^{20} \text{ кал}/\text{год}$ или $10^{28} \text{ эрг}/\text{год}$. Распределение значений теплового потока по поверхности Земли не совсем случайно (рис. 8.2 б, в). Для щитов и платформ Q обычно составляет $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ кал}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$. В противоположность этому тепловой поток в ряде районов, особенно в горах последнего

цикла складчатости (Альпы, горы Японии), оказывается повышенным до $2 \cdot 10^6$ кал/см²·сек и даже выше. Это же относится и к дну океанов. Хотя средний тепловой поток через дно океанов приблизительно равен потоку на континентах и отличается постоянством на обширных океанических равнинах, но на дне океанов имеются области – подводные валы, где тепловой поток резко повышен и доходит до $6,7 \cdot 10^6$ кал/см²·сек (рис. 8. 2).

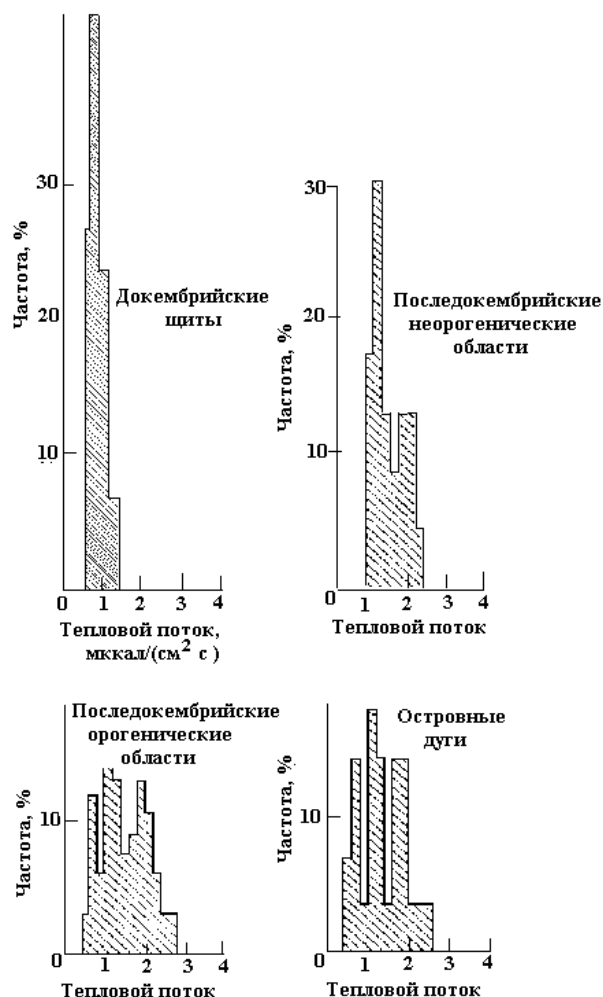


Рис. 8.2 в. Гистограммы значений теплового потока для разных континентальных регионов (Ботт, 1974; с. 219)

Регионы с более высокими (положительными) аномалиями теплового потока называются «горячими точками». В настоящее время все еще ведутся споры относительно того, движутся ли эти горячие точки вместе с тектоническими плитами во время их дрейфа или же они имеют более глубокое происхождение (в мантии). Суть проблемы заключается в том, что из равенства тепловых потоков на материках и океанах следует равенство на единице площади количества радиоактивных элементов, генерирующих тепло. Это особенно удивительно, если вспомнить, что литосфера под континентами и океанами имеет разное строение (см. рис. 6.5). Действительно, известно, что континентальные породы содержат вблизи поверхности намного больше радиоактивных веществ, чем океанические. Это различие должно каким-то образом уравниваться на глубине.

Общая связь теплового потока с геологией видна также из данных табл. 8.2 и рис. 8.2. Из сравнения регионов разного типа следует, что чем раньше закончились магматические процессы, связанные с формированием региона (орогез), тем меньше величина современного теплового потока. Этот общий вывод, по-видимому, верен, но не

нужно забывать, что существуют значительные изменения теплового потока местного характера. В частности, они наблюдаются над такими структурами, как Срединно-Атлантический хребет, где, вероятно, имеются локализованные источники тепла, находящиеся на глубинах до нескольких десятков километров. Вероятно, такие источники аналогичны вулканическим областям на суше; их вклад в глобальное распределение потока мал.

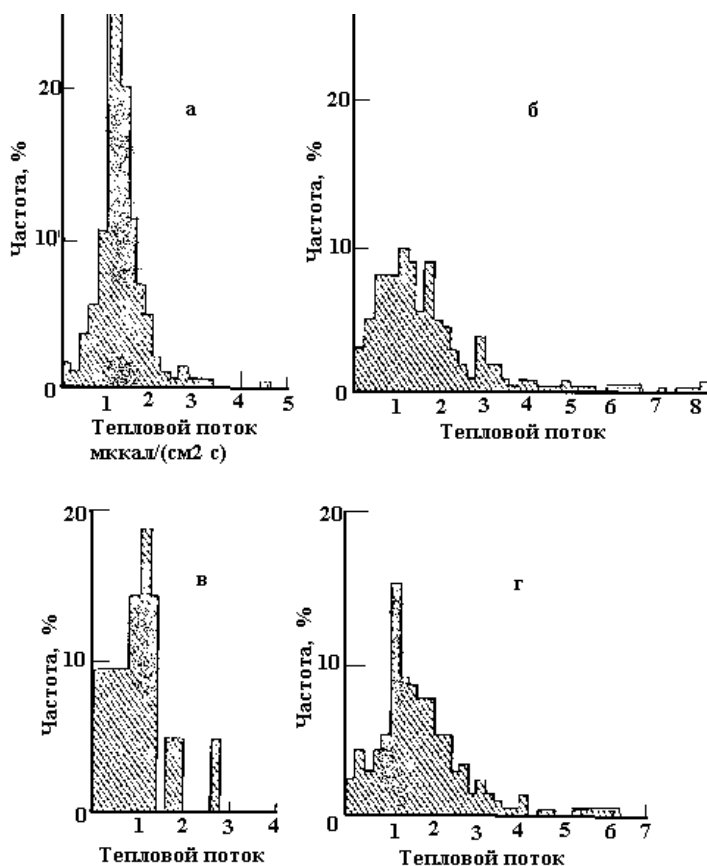


Рис. 8.2 г. Гистограммы значений теплового потока для четырех основных типов океанических регионов (Ботт, 1974; с. 220). а – океанические котловины, б – океанические хребты, в – океанические желоба, г – другие океанические регионы.

К приведенной потере тепла Землей через теплопроводность следует добавить потери тепла другими путями.

Магматическая деятельность Земли приводит к поднятию и излиянию на поверхность расплавленных лав и других продуктов. Считая, что с начала кембрия ($5 \cdot 10^8$ лет назад) было около 30 излияний платобазальтов объемом каждое в 10^6 км^3 , что каждый грамм поднятого на поверхность базальта дал за счет охлаждения 300 кал и за счет теплоты кристаллизации 100 кал, получаем потерю тепла в $0,8 \cdot 10^{17} \text{ кал/год}$. Если учесть вулканизм дна океанов, другие виды вулканизма, то можно эту потерю увеличить на порядок, т. е. считать $Q = 10^{18} \text{ кал/год}$. Таким образом, этот путь теплопотерь, который может быть доминирующим для некоторых ограниченных районов, пренебрежимо мал в масштабе всей Земли.

Наконец, следует учесть вынос тепла термальными водами. Такие области, как гейзерные поля, например, долина Гейзеров на Камчатке, области выходов термальных источников по разломам, как, например, термальная линия Копет-Даг, дают вынос тепла в размерах $10^{16} - 10^{17} \text{ кал/год}$, т. е. их вклад весьма невелик. Гораздо существеннее вынос тепла водами, циркулирующими в осадочной толще Земли. Произвести точную оценку теплопотерь таким путем не удастся, но вполне возможно, что она достигает величины того же порядка, что и через теплопроводность. Таким образом, следует иметь в виду, что

приведенной выше значение потери тепла в $2,4 \cdot 10^{20}$ кал/год может быть увеличено примерно вдвое.

Таблица 8.2. Средние значения теплового потока в мккал/(см² сек) в регионах с различными типами геологического строения коры (Стейси, 1972; с. 270).

Материки		
Докембрийские щиты	0.92 ± 0.17	(26)
Последокембрийские неорогенические области	1.54 ± 0.38	(23)
Последокембрийские орогенические области	1.48 ± 0.56	(68)
(кроме зон		
Кайнозойского вулканизма)	2.16 ± 0.46	(11)
Зоны Кайнозойского вулканизма	1.43 ± 0.56	(128)
Среднее для материков (кроме геотермальных областей)	1.41 ± 0.52	(51)
«Среднесеточное» для материков *)		
Океаны		
Основная часть бассейнов	1.28 ± 0.53	(273)
Океанические хребты	1.82 ± 1.56	(338)
Желоба	0.99 ± 0.61	(21)
Прочие (шельфы и др.)	1.71 ± 1.05	(281)
Среднее для дна океана	1.60 ± 1.18	(915)
«Среднесеточное» для океанов *)	1.42 ± 0.78	(338)
Среднее для Земли (по всем значениям)	1.58 ± 1.14	(1043)
«Среднесеточное» для Земли *)	1.43 ± 0.75	(389)

*) Каждое значение, использованное для получения «среднесеточного», представляет собой среднее из всех измерений, попадающих на квадрат 5×5^0 (300 x 300 морских миль). Таким способом уменьшается влияние мест, густо покрытых измерениями. Одновременно вклад отдельных изолированных измерений может оказаться преувеличенным. При вычислении «среднесеточного» для всей Земли были использованы дополнительные данные, что объясняет некоторое различие в значениях этих трех среднесеточных.

Ли и Макдональд рассмотрели общие черты распределения теплового потока. Они произвели сферический анализ всех имеющихся данных и с учетом вклада сферических функций до третьего порядка, построили карту изолиний теплового потока (рис. 8.3). Сравнение с картой геоида, построенной по спутниковым данным (рис. 2.5), позволяет сделать вывод, что связь между распределением теплового потока и силы тяжести возможна. Но теперешняя картина тепловых потоков неполная, и дальнейшее накопление данных может привести к коренным изменениям деталей на рис. 8.3. В частности, нельзя придавать значение большому тепловому потоку в центральной части Африки, где нет ни одного измерения; это просто результат сферического анализа. К такому сравнительному анализу следует вернуться через некоторое время, когда глобальный характер распределения теплового потока будет известен с большей достоверностью.

Уравнение теплопроводности, ее виды в Земле. Оценка температуры в верхней части литосферы (до глубин около 100 км) по данным геотермических измерений (теплового потока), магматической деятельности (по температуре лав) и электропроводности (Магницкий, 1965; с. 6 – 12). В настоящее время единственной более или менее достоверно определенной величиной, характеризующей теплотерии Земли, является тепловой поток Q_0 , обусловленный теплопроводностью. Поэтому в дальнейшем

при оценке температуры верхних частей Земли будем исходить из приведенного выше значения теплового потока $Q_{0,cr}$, считая, что весь перенос тепла осуществляется только через теплопроводность.

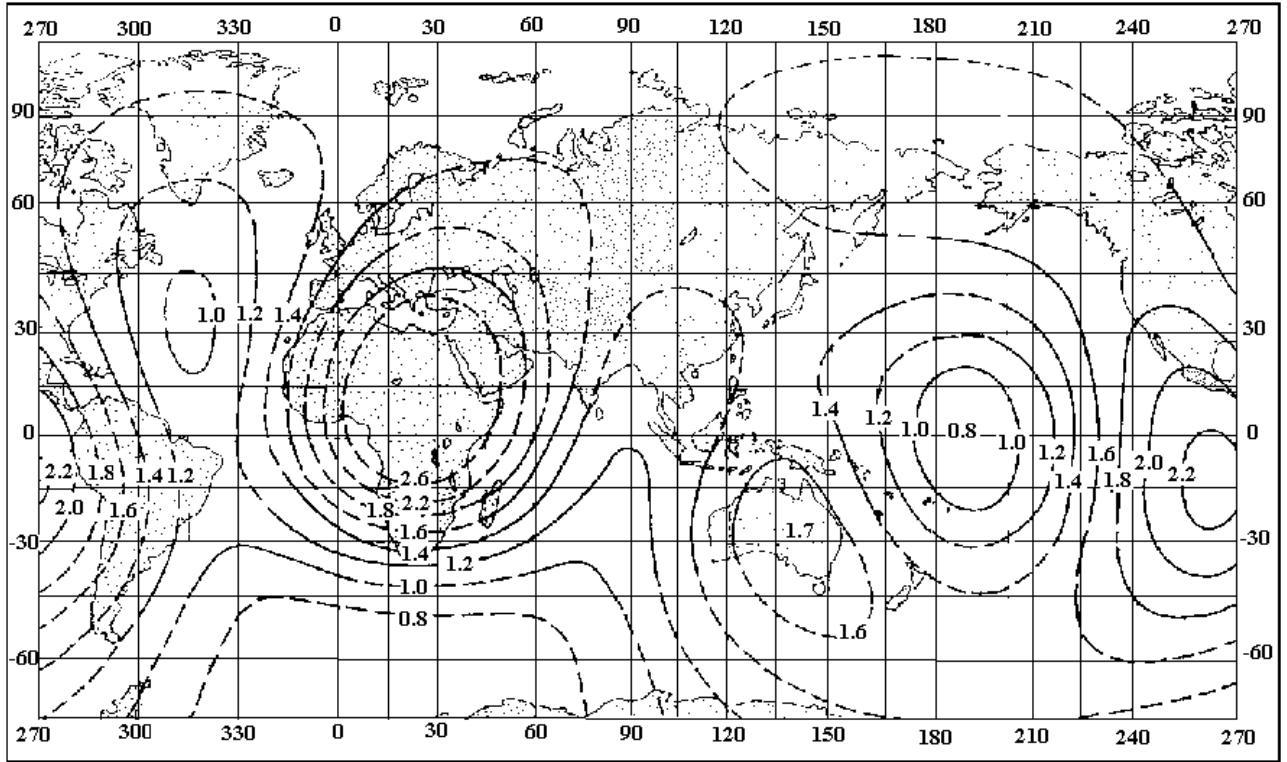


Рис. 8.3. Представление теплового потока разложением по сферическим функциям до 3-го порядка включительно. Использовано 987 измерений. Изолинии в мккал/(см² сек). Пунктиром они проведены в районах, где не было измерений.

Исходным в этом случае будет уравнение теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P(x, y, z, t), \quad (8.2)$$

где ρ – плотность, c – теплоемкость, T – температура, χ – теплопроводность, P – генерация тепла в единице объема, t – время.

Направляя ось z вертикально вниз и считая в первом приближении, что T и P не зависят от x и y , приходим к случаю одномерной задачи:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P(z, t). \quad (8.3)$$

Поскольку в дальнейшем расчеты будут вестись для глубин не более 100 км, то кривизной Земли можно пренебречь.

В качестве граничных условий при решении (8.3) можно взять температуру T_0 и тепловой поток $Q_{0,cr}$ на поверхности Земли. Осложнения возникают с начальными условиями. Если температуру U считать от $T_0 = const$: $U = T - T_0$, т. о. решение уравнения

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + P(z, t)$$

при постоянных ρ , c и χ , при начальном: $U(z, 0) = 0$ и граничных: $U(0, t) = 0$, $U(\infty, t) \neq \infty$ условиях дается формулой

$$U(z, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \int_0^\infty \frac{h}{\sqrt{t-\tau}} \left[e^{-\frac{(\zeta-z)^2}{4h^2(t-\tau)}} - e^{-\frac{(\zeta+z)^2}{4h^2(t-\tau)}} \right] P(\zeta, \tau) d\zeta, \quad (8.4)$$

где $h^2 = \chi/\rho c$ – тепловая функция.

Как показали исследования, для глубин менее 100 км в случае Земли температурный режим можно считать стационарным, полагая P не зависящей от времени, что связано с медленным изменением P со временем при большом возрасте Земли. Ошибки при этом будут составлять единицы процента.

Таким образом, при оценке современной температуры на глубинах до 100 км уравнение (8.3) принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial z}(\chi \frac{\partial T}{\partial z}) = -P(z). \quad (8.5)$$

Решение этого уравнения не зависит от начального условия.

Для решения уравнения (8.5) необходимо знать вид функций $P(z)$ и $\chi(z)$. Наибольшие затруднения связаны с определением генерации тепла P . Основным источником тепла в верхних частях Земли являются радиоактивные элементы, рассеянные в горных породах. В табл. 7.3 приведены осредненные данные о генерации тепла на 1 см^3 для разных пород.

Чтобы получить вид функции $P(z)$, необходимо рассматривать два случая: случай континентальной коры и случай океанической коры (рис. 6.5). Континентальная кора имеет мощность в среднем около 40 км и состоит из «гранитного» и «базальтового» слоев мощностью примерно по 20 км каждый.

«Гранитный» слой состоит не из одного гранита; генерация тепла в гранитах падает с увеличением их возраста. С учетом этих данных, примем генерацию тепла P в «гранитном» слое равной $4,2 \cdot 10^{-13} \text{ кал/см}^3 \text{ сек}$, что соответствует составу слоя на 2/3 из гранита и 1/3 из базальта.

В случае океанической коры будем считать, что кора мощностью 6 км имеет генерацию тепла такую же, как у габбро. Генерацию тепла в подкоровом слое можно определить следующим образом. Равенство теплового потока на континентах и океанах (табл. 8.3) показывает, что на единицу поверхности приходится одинаковая генерация тепла в обоих случаях; но на континентах эта генерация, в основном, сосредоточена в коре, куда были увлечены радиоактивные элементы в процессе образования земной коры при дифференциации вещества мантии Земли. Под океанами же генерация тепла рассредоточена на большую глубину, так как мантия здесь почти дифференцирована (кора очень тонкая). Таким образом, генерация тепла в недифференцированной мантии получится путем рассредоточения источников тепла континентальной коры на всю глубину дифференциации, которая составляет около 400 км. Таким образом, рассредоточивая источники равномерно до глубин 400 км, получим генерацию тепла в оболочке под океанами в $0,25 \cdot 10^{-13} \text{ кал/см}^3 \text{ сек}$.

Таблица 8.3. Данные о генерации тепла на 1 см^3 для различных пород (Магницкий, 1965; с. 8).

Порода.....	Гранит	Габбро	Эклогит	Дунит	Хондриты	Железные метеориты
$P \cdot 10^{13} \text{ кал/см}^3 \text{ сек}$	5.7	1.2	0.1	0.02	0.04	0.00003

Определим зависимость $\chi(z)$. Как уже отмечалось выше, теплопроводность зависит от состава пород, давления и температуры. Для глубин до 50 км основную роль играет решетчатая часть теплопроводности, причем влияние давления на этом интервале глубин пренебрежимо мало по сравнению с влиянием температуры. Из теории твердого тела можно показать, что если известен коэффициент теплопроводности χ_0 при температуре T_0 , то коэффициент теплопроводности χ при температуре T будет определяться из соотношения:

$$\chi = \chi_0 T_0 / T. \quad (8.6)$$

Подставляя (8.6) в (8.5) и учитывая приведенные выше количества генерации тепла под океанами и материками можно рассчитать значения температур в пределах земной коры (табл. 8.4).

Таблица 8.4. *Распределение температуры в коре, имеющей строение, описанное в тексте (Магницкий, 1965; с. 12).*

Параметры	Континент			Океан		
Глубина, км.....	20	40	50	11	40	50
Температура, °C.....	380	650	700	130	850	1100

Магматическая деятельность Земли как показатель температуры земных глубин (Магницкий, 1965; с. 16 – 21). Различают два основных типа магматической деятельности Земли: эффузивный, при котором лавы извергаются на поверхность, и интрузивный, при котором расплав застывает внутри земной коры, образуя интрузивные горные породы. Оба эти типа могут быть использованы для оценки температуры Земли. Наиболее прямые данные можно получить по измерениям температур вулканических лав.

То обстоятельство, что вулканы существуют не повсеместно, вызывает сомнение в том, насколько репрезентативны данные о температуре земных глубин, определенные таким путем.

В настоящее время известно около 500 действующих вулканов, большинство которых приурочено к Тихоокеанскому орогеническому поясу. Значительное число вулканов приурочено к молодым орогеническим зонам, к зонам современных разломов (например, в Восточной Африке), к океаническим валам. Однако, если учесть проявление вулканизма, например, с начала кембрия, то картина размещения вулканов окажется более равномерной. К этому следует добавить весьма широко распространенную вулканическую деятельность океанического дна, что было установлено исследованиями последних десятилетий.

Таким образом, можно утверждать следующее. Во-первых, температуры, получаемые по данным вулканических извержений, достаточно репрезентативны, хотя, вероятно, они и несколько выше средней температуры соответствующих глубин, поскольку по данным сейсмологии вещество оболочки Земли везде твердое и расплавы встречаются лишь в виде отдельных локальных очагов. И, во-вторых, все проявления вулканизма, начиная с кембрия, могут приниматься во внимание при оценках современных температур внутри Земли.

При оценке температур земных глубин по вулканической деятельности возникают две основные задачи: определение глубины первичного источника питания вулканов и определение температуры в очаге.

1. Работами камчатских ученых П.И. Токарева, А.А. Гусева, Л.С. Шумилиной и С.А. Федотова показано, что у берегов Камчатки и Курильских островов на глубинах около 60 - 100 км существует слабый минимум сейсмической активности (см. рис. 3.2). Этот минимум некоторыми исследователями связывается с тем, что на этих глубинах существуют очаги вулканов, в которых происходит образование расплавленной магмы. Однако существует точка зрения, согласно которой таких очагов как таковых не существует и магматический расплав в виде больших капель поступает из верхней мантии.

2. Прямые измерения дают значения изливающихся лав в интервале 800-1200°С. Анализ условий, при которых в пределах земных недр на глубинах около 100 км может образоваться расплав, показывает, что значения температур могут быть несколько выше и составлять 1300°С.

Таким образом, анализ магматической деятельности Земли показывает, что на глубинах около 100 км значения температуры могут достигать $800-1300^{\circ}\text{C}$. Полученные значения не противоречат приведенным выше оценкам.

Температура верхних частей Земли по данным об электропроводимости (Магницкий, 1965; с. 21 – 22). Электропроводимость вещества Земли на разных глубинах может быть использована для определения температуры, так как она очень сильно зависит от температуры. Электропроводность вещества Земли для глубин 20-100 км составляет $10^{-4} \text{ ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. Используя экспериментальные данные о параметрах, определяющих значение электропроводимости вещества верхней части мантии, можно показать, что температура на глубинах 20-100 км имеет значение около $1200-1400^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, все способы определения дают для глубин около 100 км значение температуры от 1000 до 1400°C .

Понятие о нижнем температурном пределе в мантии и его оценка с помощью адиабатического температурного градиента. Обоснование верхнего температурного предела в мантии как температуры плавления (Магницкий, 1965; с. 22 – 28). При оценке температуры в оболочке Земли на глубинах от 50 км до 2900 км (до границы земного ядра) возникают еще большие затруднения. При этом ненадежность получаемых результатов значительно увеличивается. Для этих глубин нельзя применить метод, основанный на использовании тепловых потоков, ввиду полного отсутствия данных. Неприменим и метод, исходящий из определения температур лав. Со значительными трудностями мы сталкиваемся и в методе, основанном на определениях электропроводности.

Рассмотрение вопроса о температуре больших глубин лучше всего начать с попыток установить возможные верхний и нижний пределы температуры на соответствующих глубинах. В качестве нижней границы обычно принимается кривая адиабатической температуры, так как нагрев за счет сжатия должен обязательно быть, а отток тепла, могущий понизить эту границу, был для больших глубин, видимо, невелик.

Адиабатический градиент определяется термодинамической формулой:

$$dT/dp = \alpha T / c_p \rho, \quad (8.7)$$

где p – давление; α – коэффициент объемного расширения; ρ – плотность пород, c_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Как было показано (см. раздел 5), распределение плотности ρ с глубиной (r) в настоящее время достаточно хорошо известно. Наибольшие затруднения связаны с определением α и c_p . Если для горных пород взять средние значения $\alpha \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$, $c_p \approx 0,3 \text{ кал/г-град}$, определяемые экспериментально, то, учитывая, что

$$dp = - \rho g dr, \quad (8.8)$$

и, следовательно, из (8.7)

$$dT/dr = g \alpha T / c_p, \quad (8.9)$$

получим адиабатический градиент:

$$dT/dr \approx 0,5^{\circ}\text{C/км},$$

при этом принималось $T = 1300^{\circ}\text{C}$. Однако такая оценка слишком груба, так как α и c_p меняются с глубиной.

Для более строгой оценки величины отношения α/c_p воспользуемся известными из термодинамики и физики твердого тела соотношениями. В результате, если знаем температуру T_1 на глубине H_1 , можно получить следующее соотношение:

$$\ln \frac{T}{T_1} = \int_{H_1}^H g \frac{\alpha}{c_p} dH. \quad (8.10)$$

В табл. 8.5 приведены значения α/c_p и T/T_{100} , вычисленные теоретически, а также несколько иным способом, основанным на теории Дебая, а также адиабатические

температуры, считая, что $T_{100} = 1250^{\circ}\text{C}$. Температуры в последнем столбце табл. 8.5 могут рассматриваться как нижний предел температуры мантии.

Расчеты и имеющиеся экспериментальные данные показывают, что в мантии Земли кривая температуры плавления всегда идет круче, чем кривая равновесной температуры.

Экспериментальное определение температуры плавления в мантии; результаты и трудности. О термодинамической формуле Клаузиуса-Клайпейрона. Определение температуры плавления в мантии по гипотезам плавления Линдемана и Жаркова. О реальных температурах в мантии (Магницкий, 1965; с. 27 – 33). Сейсмические данные позволяют установить, что поперечные волны проходят через мантию Земли (рис. 3.10, 3.15). Исключение, возможно, составляют отдельные камеры под активными вулканами (магматические очаги). Таким образом, оболочка Земли от границы Мохоровичича ($H \approx 33$ км; см. раздел 3, рис. 3.15, 3.16; раздел 5, рис. 5.2) до границы ядра ($H \approx 2900$ км) находится в эффективно твердом состоянии. Если учесть, что интервал разжижения силикатных стекол обычно начинается при температурах около $1,1T_m$, где T_m – температура плавления, то для всех глубин в мантии Земли за возможный верхний предел температуры можно принять температуру плавления.

К сожалению, определение температуры плавления для больших глубин связано со значительными трудностями. Имеющиеся экспериментальные данные относятся к некоторым простейшим случаям и не позволяют отыскать T_m для глубин, больших 50-100 км. Для «сухого» диопсида получено, например:

$$p = 23,3[(T/1665)^{4,46} - 1],$$

где T – в абсолютной шкале, p – в кбар. Это дает градиент кривой плавления $15,4^{\circ}\text{K/кбар}$. Для пород обычно градиенты ниже; так, для базальта всего 6°K/кбар . Присутствие воды делает ситуацию еще более неопределенной.

Экстраполяция опытных данных на большие глубины по формуле Клаузиуса-Клайперона $dT_m/dp = \Delta V/\Delta S$ практически невозможна из-за незнания изменения ΔS с увеличением давления, где ΔV и ΔS – изменение объема и энтропии при плавлении.

В силу этого в настоящее время пользуются формулами, построенными по той или иной гипотезе о процессе плавления.

Определение температуры плавления по Линдемману основано на предположении, что плавление наступает тогда, когда амплитуда тепловых колебаний атомов достигает определенной доли от параметра решетки.

Расчеты показывают, что температура плавления T_m на глубине H связаны с температурой плавления T_{m1} на глубине H_1 следующим образом:

$$T_m = T_{m1} \frac{(V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2)_H}{(V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2)_{H_1}}, \quad (8.11)$$

где V_P и V_S – скорости продольных и поперечных волн на соответствующих глубинах, значения которых изменяются в соответствии с данными, приведенными на рис. 3.15. Выражение (8.11) называется формулой Линдемана.

Другое определение T_m основано на гипотезе, которая заключается в том, что плавление наступает при некоторой определенной концентрации дефектов в решетке (гипотеза В.Н. Жаркова (Жарков, Трубицын, Самсонов, 1971)). Расчеты показывают, что

$$T_m = T_{m0} \frac{w_0}{w} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{1/3}, \quad (8.12)$$

где w , ρ , T_m и w_0 , ρ_0 , T_{m0} – энергии образования дефекта, плотности среды и температуры при давлениях p и p_0 соответственно.

Из опытов с перидотитом $1/3 = 2,55$.

На рис. 8.4 приведены кривые плавления в оболочке Земли от глубины 100 км до границы ядра. Значение температуры T_{m0} на глубине 100 км принято равным 1800°C . Кривая 1 получена методом Линдемана при условии, что молекулярный вес вещества оболочки – величина постоянная. Кривая 2 получена методом критической концентрации тепловых дефектов в случае $w = w_0$. Формула (8.12) справедлива в слое однородного состава, поэтому она применяется для слоев от 100 км до 400 км и от 1000 км до 2900 км, которые, как было показано в разделе 3, могут считаться однородными. Значение для T_m в интервале от 400 км до 1000 км можно получить интерполяцией. Плотность ρ_0 на глубине 100 км для нижнего слоя находится экстраполяцией кривой плотности (по Буллину, модель «А»), значение плотности – наиболее близкое к действительности. Вертикальные линии на кривых рис. 8.4 показывают границы неопределенности, если для $1/3$ взять вместо 2,55 значения 2,3 или 2,8. Маловероятно, что энергии образования дефектов для разных компонент мантии равны, скорее следует ожидать, что такая энергия больше в более плотном нижнем слое. Следовательно, можно предполагать, что на глубинах больше 400 км кривая 2 должна подойти ближе к кривой 1, чем показано на рис. 8.4. Для совпадения обеих кривых достаточно, чтобы энергия образования дефектов в более плотном нижнем слое была больше на 40%, что представляется умеренным требованием.

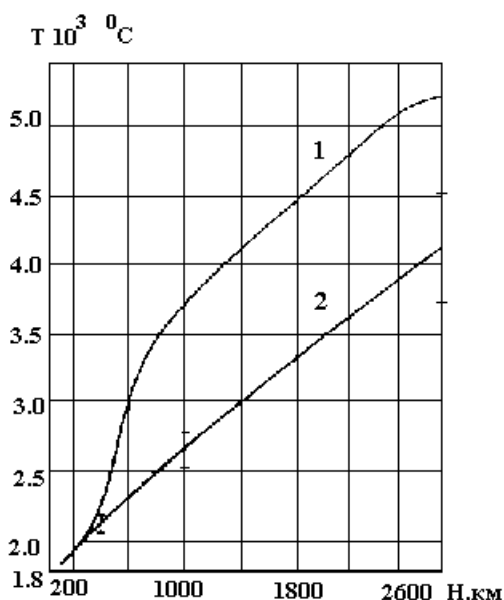


Рис. 8.4. Кривые плавления в оболочке Земли в диапазоне глубин от 100 км до границы ядра, в предположении, что T_{m0} ($H=100\text{ км}$) = 1800°C . Вертикальные линии на кривых показывают границы неопределенности. Видно, что температура на границе ядра, по-видимому, не может превышать 5000°C (Магницкий, 1965; с. 33).

В заключение отметим, что температура на границе ядра, как следует из данных, представленных на рис. 8.4, не может превышать 5000°C .

Температура в ядре Земли, ее оценка с помощью уравнений для состояния железа при давлении и плотности в ядре; температура плавления железа; адиабатическая температура и др. (Магницкий, 1965; с. 37 – 39). Земное ядро начинается на глубине 2900 км (см. раздел 3, рис. 3.15, 3.16; раздел 5, рис. 5.2) и находится в жидком состоянии. На глубине 5100 км отмечается появление внутреннего ядра (рис. 3.16), которое вновь можно считать эффективно твердым.

О температуре ядра имеется еще меньше сведений, чем о температуре в мантии Земли.

Поскольку земное ядро металлическое по своим свойствам, то здесь может быть применена теория металлов. Кроме того, жидкое состояние ядра позволяет утверждать, что в нем температурный градиент не превосходит адиабатический.

Хотя вопрос о составе ядра остается дискуссионным, тем не менее, в последние годы появляется все больше материалов, подтверждающих большую роль железа в его составе.

Уравнение состояния железа сейчас хорошо известно до давлений, включающих и соответствующие давления в области ядра. Поэтому предположение о железном ядре позволяет определить температуру ядра по давлению и плотности. Однако получаемые при этом температуры неоправданно высоки: от 6000°K на границе ядра до 11000°K в центре Земли. По-видимому, ядро не может быть чисто железным, хотя железо и играет большую роль в составе ядра. Предположение о том, что ядро состоит из сплава железа (например, с кремнием), сразу делает вопрос о температуре весьма неопределенным.

Обычно температура в ядре оценивается по температуре плавления железа, при этом применяют формулу Симона:

$$p/a = (T_m/T_{m0})^c - 1, \quad (8.13)$$

которая была сначала получена эмпирически, а затем выведена из формулы Линдемана (8.11). Здесь a и c – постоянные. Пользуясь экспериментальными данными, для величины c получено значение $c = 1,9$. На рис. 8.5 приведена кривая плавления Fe для условий в ядре, если для железа $T_{m0} = 1805^{\circ}\text{K}$.

На рис. 8.5 пунктиром дана кривая плавления для железа, полученная по методу критических концентраций дефектов и уравнению состояния для железа. Эта кривая соответствует значению $c = 2,15$ в формуле Симона (8.13). Если считать, что переход к твердому внутреннему ядру вызван кристаллизацией, то по кривым на рис. 8.5 можно подсчитать температуру, которая на глубине 5000 км равна 6000°K . Конечно, наличие примесей к железу может довольно заметно изменить эту температуру. При оценке адиабатической температуры независимо от гипотезы о железном составе ядра используется формула для адиабатической температуры, которая для случая жидкого слоя примет вид:

$$T^3/\rho V_P^3 = \text{const.} \quad (8.14)$$

Приняв T на глубине 5000 км за единицу, получим температуры в ядре (табл. 8.6).

При $T_{5000} = 6000^{\circ}\text{K}$ находим $T_{2900} = 4300^{\circ}\text{K}$, что лежит внутри пределов температуры на границе ядра (см. рис. 7.4). Интересно отметить, что полученный адиабатический градиент практически совпадает с градиентом температуры плавления для железного ядра (см. рис. 8.5). Адиабатический градиент для железного ядра, вычисленный по уравнению состояния железа, вдвое меньше (табл. 8.6) и дает на границе ядра $T_{2900} = 5200^{\circ}\text{K}$, что совпадает с предельной температурой плавления оболочки. Конечно, принятое значение $T_{5000} = 6000^{\circ}\text{K}$ может быть заметно завышенным, так как добавление к железу, например, примесей кремния в количестве 20% снижает температуру плавления на 300°K . Если же ядро состоит в основном не из железа, а из металлизированных силикатов, то сказать что-либо о температуре ядра еще труднее. Однако, применяя формулу Линдемана, можно все еще оценить и температуру плавления металлизированных силикатов. На рис. 8.5 кривая «силикаты» показывает предполагаемый ход плавления.

Обобщенная температурная кривая по радиусу Земли. Источники тепла Земли и их относительный вклад в общий тепловой баланс планеты. Гипотезы и варианты тепловой истории Земли (Магницкий, 1965; с. 38 – 45). Подводя итог имеющихся сведений о температуре земных недр, можно отметить следующие основные температуры: $T_{100} = 1100-1300^{\circ}\text{C}$, $T_{400} = 1400-1700^{\circ}\text{C}$, $T_{2900} = 2200-4700^{\circ}\text{C}$. Если провести плавную кривую через середины этих интервалов (точки A , B , C), то получим наиболее вероятное распределение температур внутри Земли по имеющимся у нас данным (рис. 8.6).

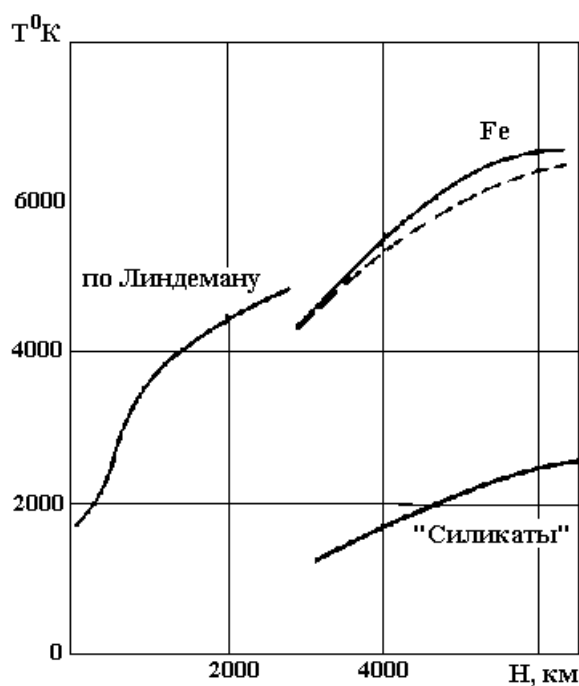


Рис. 8.5. Кривая плавления Fe для условий в ядре при $T_{m0} = 1805^{\circ}\text{K}$. Пунктиром для железа проведена кривая плавления, рассчитанная с помощью метода критических концентраций дефектов в соответствии с уравнением состояния железа (Магницкий, 1965; с. 37).

Таблица 8.6. Распределение температура в ядре в долях $T(H=5000\text{км}) = 1$. При $T_{5000} = 6000^{\circ}\text{K}$ находим $T_{2900} = 4300^{\circ}\text{K}$ (Магницкий, 1965; с. 38).

H, км	T_H / T_{5000}	
	Жарков, 1962	Valle, 1954
2900	0.86	0.72
3500	0.92	0.81
4000	0.95	0.89
5000	1.00	1.00

Для ядра на глубинах больше 2900 км кривая температур проведена до точки C по адиабате. Пользуясь формулой (8.14), получим для глубины 5000 км температуру 5000°C , что по существу не отличается от простой экстраполяции температурной кривой из оболочки в ядро. Пунктиром показан ход кривой температуры от точки C по адиабате в жидком ядре железного состава.

Источники тепловой энергии Земли. Прежде чем рассматривать проблему термической истории Земли, необходимо упомянуть об источниках тепловой энергии. К сожалению, вопрос этот еще очень плохо изучен и сколько-нибудь полная оценка источников энергии в настоящее время невозможна. Остановимся на основных.

1. Энергия солнечного излучения. Температура нагрева за счет излучения Солнца определяется из равенства получаемой и излучаемой энергий. С учетом наличия в атмосфере Земли паров воды и других поглотителей длинных волн температура земной поверхности сейчас составляет $10\text{-}15^{\circ}\text{C}$.

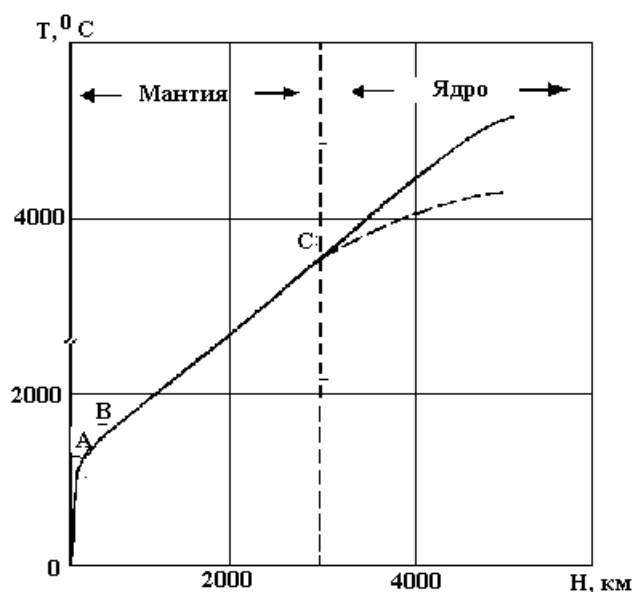


Рис. 8.6. Вероятное распределение температур внутри Земли (Магницкий, 1965; с. 38).

2. Энергия радиоактивных превращений имеет в термике Земли, видимо, доминирующее значение. К сожалению, сведения о содержании источников радиогенного тепла внутри Земли отсутствуют. Все заключения по этому поводу делаются по аналогии с метеоритами. При этом оболочке приписывается выделение тепла, определенное для хондритов, а ядру – для железных метеоритов. При этом энергия радиогенных источников вполне покрывает всю теплопотерю Земли. Однако это лишь очень грубая и мало оправданная оценка. По существу, не достаточно оснований считать, что состав современных метеоритов, прошедших долгий, сложный и своеобразный путь своего развития, является аналогом оболочек Земли. Особенно это касается такого вопроса, как содержание радиоактивных элементов. На своеобразие метеоритов указывает хотя бы тот факт, что каменные метеориты содержат около 10% металлического железа, чего нет в горных породах. Далее, если считать, что большинство метеоритов – это обломки планет из пояса между Марсом и Юпитером, то в данном случае трудно говорить об аналогиях с Землей.

3. Гравитационная энергия Земли как потенциальная энергия притягивающихся друг к другу точек. Так как Земля по современным представлениям возникла из протопланетного облака, то приблизительная оценка гравитационной энергии для земли составляет $U = -2,25 \cdot 10^{39}$ эрг. Около 20% этой огромной энергии уходит на простое упругое сжатие Земли в поле тяжести. Но оставшаяся энергия огромна. При массе Земли $(1-10)10^{27}$ г и ее теплоемкости 0,3 кал/г·град такая энергия способна нагреть Землю до 28000°C .

Однако такая оценка бессмысленна, так как разогрев Земли целиком определяется принятой схемой образования планеты из протопланетного облака, поскольку при этом возникают огромные потери тепла на излучение. Наиболее детально этот вопрос рассмотрен применительно к гипотезе О.Ю. Шмидта. Разогрев поверхности растущей планеты за счет падения на нее тел дается условием равновесия энергии излучения с поверхности и поступающей энергии. Анализ показывает, что разогрев в результате такого процесса весьма невелик.

4. Еще одним источником тепловой энергии Земли может быть процесс гравитационной дифференциации вещества, в результате которой образовалось плотное ядро и менее плотная оболочка. Считая Землю сначала однородной, а затем расслоенной, получаем разогрев на 2000°C .

К сожалению, эта оценка сильно зависит от других предположений. Если Земля прошла через расплавленное состояние, то расслоение в этот период не могло привести к существенному температурному эффекту в силу быстрого выноса тепла конвекцией. Если ядро Земли образовалось в результате перехода силикатов в металлическую фазу под действием давления, то почти вся энергия была израсходована на образование этой фазы, а не на разогрев. Таким образом, роль этого фактора весьма неопределенна.

5. Энергия химических реакций сейчас почти не поддается учету; возможны процессы выделения и поглощения тепла.

6. Энергия вращения Земли определяется как $E = C\Omega^2/2$, где C – момент инерции Земли, Ω – угловая скорость. Учитывая численные значения этих параметров, получаем $E = 2,16 \cdot 10^{36}$ эрг. Эта величина незначительна даже по сравнению с энергией гравитационной дифференциации.

В настоящее время наблюдается вековое замедление скорости вращения Земли $d\Omega/dt = -5 \cdot 10^{-22} \text{сек}^{-2}$. Если это замедление связано с изменением момента инерции, то тепловой поток через поверхность Земли будет пренебрежимо мал по сравнению с полным потоком.

В настоящее время считается, что замедление вращения вызвано, в основном, не изменением момента инерции, а приливным трением, вызванным Луной. В этом случае тепловой поток через поверхность планеты составит около 18% от всего теплового потока Земли.

7. Упомянем еще некоторые источники тепла: фазовые превращения, самопроизвольное деление ядер, космическое излучение, радиоактивные превращения элементов с малым периодом жизни. Вклад всех этих источников, кроме фазовых превращений, пренебрежимо мал. Что касается энергии фазовых превращений, то ее роль оценить пока невозможно, в некоторых случаях она может быть весьма существенной.

Наконец, следует отметить энергию тектонических процессов и, в частности, энергию землетрясений. Эта энергия не является первичной. Для объяснения самой тектонической активности требуется найти источник энергии. Однако перенос энергии сейсмическими волнами, возникающими при землетрясениях, может привести к некоторому перераспределению энергии в Земле. С одной стороны, энергия, переносимая сейсмическими волнами, распределяется более равномерно во всем объеме оболочки и коры благодаря поглощению средой, в которой волны распространяются. С другой стороны, сейсмическая энергия может стать существенным источником нагревания земного ядра. Если считать генерацию радиоактивного тепла в ядре такой же, как и в железных метеоритах, и сейсмическую энергию Земли в 10^{25} эрг/год, то при условии, что ядро поглощает только 1% энергии сейсмических волн, эта энергия будет равна радиогенной. Жидкое ядро с достаточной вязкостью должно поглощать значительно больше 1% энергии сейсмических волн, которая, таким образом, может быть основным источником тепла для земного ядра.

Термическая история Земли (Магницкий, 1965; с. 45–52). Гипотеза «горячего» происхождения. В настоящее время большинство исследователей считают наиболее вероятной гипотезу происхождения Земли из газо-пылевого, протопланетарного облака с относительно низкой начальной температурой планеты. Однако не исключены и другие варианты. Даже при «холодном» варианте, если допустить существование для Земли достаточно большого возраста, то приведение ее в расплавленное состояние возможно на ранней стадии развития в силу большого выделения на этом этапе радиогенного тепла. При этом дальнейшая история Земли будет соответствовать гипотезе горячего происхождения. Наконец, этот вариант термической истории Земли имеет определенное историческое значение, мантию и железное ядро. В каждой из этих оболочек благодаря выносу тепла конвекцией установилось адиабатическое распределение температуры, которое схематически показано верхней пунктирной линией на рис. 8.7. Сплошной кривой

на этом рисунке изображено изменение температуры плавления по данным, изложенным в предыдущих параграфах этого раздела.

Быстрое остывание при наличии конвекции ведет к опусканию адиабатической кривой, последовательные положения которой показаны пунктиром на рис. 8.7. Так как адиабатический градиент меньше градиента температуры плавления, то адиабата встретится с кривой плавления впервые в точке А (в центре Земли), откуда и начнется процесс затвердения.

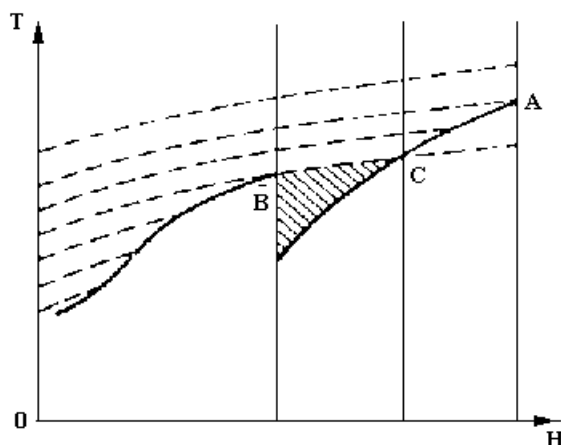


Рис. 8.7. Быстрое остывание при наличии конвекции ведет к «опусканию» адиабатической кривой, последовательные положения которой показаны пунктиром. Так как адиабатический градиент меньше градиента температуры плавления, то адиабата «встретится» с кривой плавления впервые в точке А (центр Земли), откуда и начнется процесс затвердения (Магницкий, 1965; с. 46).

Когда адиабата встретит кривую плавления в точке В (граница ядра) и одновременно в С (граница внутреннего ядра), то начнется затвердение оболочки, что сразу приведет к резкому снижению оттока тепла из областей ниже точки В. Таким образом, между В и С остается область расплавленного ядра Земли (штриховка на рис. 8.7). Что касается температуры в оболочке, то, как видно из схемы, она к моменту окончательного затвердения будет везде равна температуре плавления и только в самой верхней части быстро упадет так, чтобы на поверхности установилась температура около 0°C , обуславливаемая солнечным излучением.

Дальнейшая история Земли определяется уже только переносом тепла через теплопроводность и генерацией тепла (формула 8.2). При этом в качестве граничных условий берутся температура на поверхности, равная 0°C , и температура, нигде не обращающаяся в бесконечность. В качестве начального условия принимается температура плавления T_m . Решая соответствующую краевую задачу, получаем, что остыванием на глубинах больше 800 км за все время существования Земли можно за всю геологическую историю Земли, не превосходит сотни градусов.

Гипотеза «холодного» происхождения. Термическая история Земли с учетом переменной теплопроводности и перераспределения источников по глубине исследовалась рядом авторов. Основные результаты этих исследований показывают исключительно большую зависимость получаемых выводов от принятой интенсивности источников тепла, от закона их распределения по глубине, от принятой теплоемкости, от коэффициента поглощения и от возраста Земли. Различия в некоторых случаях имеют качественный характер. Так, в зависимости от принятой схемы распределения источников тепла по глубине можно установить, что земная кора в настоящее время или остывает, или разогревается.

В результате исследований можно получить вывод о твердой оболочке и о наличии в ней расплавленного слоя. При этом современный тепловой поток через земную поверхность будет в пределах точности равен наблюдаемому тепловому потоку.

Для иллюстрации на рис. 8.8 приведены некоторые результаты таких исследований: пунктирная кривая – кривая плавления, кривая 1 – кривая температуры или интенсивности источников тепла, соответствующей среднему содержанию радиоактивных элементов в метеоритах, теплоемкости $0,2 \text{ кал/г}\cdot\text{град}$, коэффициенте поглощения 200 см^{-1} . Возраст Земли принят $5 \cdot 10^9 \text{ лет}$; считают, что через $2 \cdot 10^9 \text{ лет}$ после образования Земли началось перераспределение источников тепла так, что они стали перемещаться из верхних 1000 км мантии в кору Земли толщиной 30 км . Закон перераспределения таков, что число источников тепла в коре со временем увеличивается линейно от начальной концентрации до современной, дающей генерацию тепла в коре $2,9 \cdot 10^{-13} \text{ кал/см}^3 \cdot \text{сек}$, что отвечает составу коры из одной части гранита и двух частей базальта. Кривая 2 на рис. 8.8 получена при тех же условиях, только теплоемкость принята равной $0,3 \text{ кал/г}\cdot\text{град}$. Как видно из данных на рис. 8.8, это приводит к резко иным результатам.

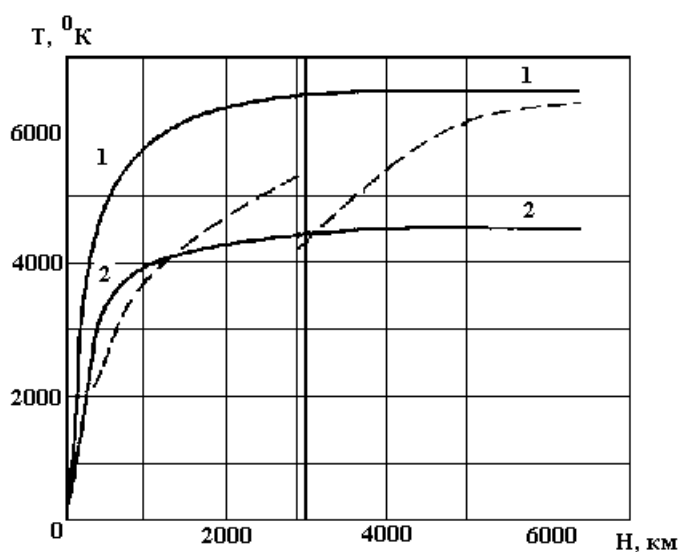


Рис. 8.8. Изменение температуры внутри Земли при разных предположениях. Пунктиром проведена кривая плавления. Пояснения в тексте (Магницкий, 1965; с. 52).

Таким образом, для суждения о действительной термической истории Земли у нас еще явно не хватает данных и в настоящее время приходится ограничиваться лишь качественной по существу оценкой различных схем развития Земли.

Химическое разделение элементов (Тейлер, 1975; с. 37-39). Попытки оценить химический состав все Земли в целом на основании тех сведений, которые можно получить непосредственно, тесно связаны с предположениями относительно термической истории Земли. Если на ранней стадии, до отвердения коры, вся Земля была расплавленной, ситуация должна была походить на то, что происходит в доменной печи. Замечено, что в домне некоторые группы элементов обычно объединяются. Если расплавить в домне руду, а затем дать ей остыть, то в охлажденной массе вещество разделится на три различных типа (фазы). Улетучивающиеся газы составят четвертую фазу. В первую группу входят в основном металлы, во вторую – главным образом силикаты, в третьей собраны соединения серы. Таким образом, основываясь на близости химических свойств, элементы можно разделить на четыре класса (не вполне четко разграниченные, так как некоторые элементы встречаются более чем в одном классе). Эти классы таковы:

а) *сидерофильные* – фаза железа – элементы, стремящиеся объединиться с железом, такие, как кобальт, никель, золото и палладий;

б) *литофильные* – силикатная фаза – элементы, имеющие сильное сродство с кислородом, такие, как литий, натрий, калий, магний и кремний;

в) *халькофильные* – сульфидная фаза – элементы, имеющие сильное сродство с серой; это – медь, цинк, ртуть, свинец и висмут;

г) *атмофильные* – элементы, образующие атмосферу.

В домене сферофильные элементы стремятся опуститься на дно, а литофильные элементы – подняться вверх.

Мы еще плохо знаем термическую историю Земли и других планет. В настоящее время многие исследователи считают, что планеты состоят из вещества, потерянного Солнцем в процессе его образования, но что они не обязательно возникли в виде горячих газовых шаров. Предполагается, что в *солнечной туманности* образовались мелкие твердые частицы, которые затем объединились в планеты типа Земли. Таким образом, вначале Земля могла быть полностью твердой. Энергия, освобождающаяся при распаде радиоактивных элементов, которая $4,5 \cdot 10^9$ лет назад была значительно больше, чем теперь, постепенно расплавила если не всю Землю, то по крайней мере значительную ее часть, и эта часть стала такой же жидкой, каким остается до сих пор ядро. Тогда могло произойти разделение элементов, подобное тому, которое наблюдается в доменной печи: силикаты должны были попасть в кору, а сидерофилы – в ядро. Это согласуется с концентрацией силикатных пород в земной коре и вероятным существованием железного ядра.

Итак, причина заметно выраженного разделения элементов стала понятной, однако гораздо труднее выяснить, каков же в действительности химический состав всей Земли в целом. Если даже мы сумеем полностью установить на основании сейсмических данных зависимость плотности и упругих свойств земного вещества от глубины, это не приведет к единственному решению в отношении химического состава, так как существует много веществ, имеющих одну и ту же плотность и одинаковые, упругие свойства. Соображения о разделении элементов, приведенные выше, позволяют отдать предпочтение одному из решений. Современные оценки будут приведены ниже в этой главе. Пытаясь вывести из современного состава Земли ее первоначальный состав, мы должны учитывать, как было указано выше, потерю летучих легких элементов.

Замечание. Материал, изложенный в этом VIII разделе, является, пожалуй, в наименьшей степени подтвержденным экспериментальными данными по сравнению со всем имеющимся геофизическим материалом строения внутренних областей Земли. Достаточно надежными экспериментально подтверждаемыми данными о температуре и тепловом потоке мы располагаем только для самых верхних слоев земной коры. Такая неопределенность и привела к созданию большого количества моделей (их обзор можно найти в (Кузнецов, 2000)), часто взаимно противоположных. По-видимому, «крайними» в ряду таких моделей являются модели «горячей» (Кузнецов, 2000) и «холодной» (Шмидт, 1949) Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботт М. Внутренне строение Земли. М.: Мир. 1974. 376.
2. Гуттенберг Б. Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 264 с.
3. Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В. Физика Земли и планет. Фигуры и внутренне строение. М.: Наука. 1971. 384 с.
4. Кузнецов В.В. Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
5. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М. Недр. 1965. 379 с.
6. Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир. 1972. 344 с.
7. Тейлер Р. Дж. Происхождение химических элементов. М.: Мир. 1975. 232 с.

8. **Шейдеггер А.** Основы геодинамики. М.: Недра. 1987. 384 с.
9. **Шмидт О.Ю.** Четыре лекции о происхождении Земли. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1949. 70 с.

IX. О ПРИРОДЕ ОСНОВНЫХ СЛОЕВ ЗЕМЛИ И ГРАНИЦ РАЗДЕЛА МЕЖДУ НИМИ

Природа и характер границы Мохоровичича между земной корой и мантией. Земная кора континентов и океанов, ее строение и особенности, состав образующих кору слоев по геологическим и геофизическим данным.

Происхождение земной коры, гипотезы дифференциации, зонной плавки, океанизации и др., их сущность и критика. Образование земной коры с позиции новой глобальной тектоники.

Строение мантии. Строение и состав верхней мантии (слой «В»), геологические данные и геофизические модели. Астеносфера (волновод) и ее вероятная природа.

Переходная область (слой «С») как область аномально быстрого изменения физических свойств земного вещества с глубиной; гипотезы, объясняющие это явление и критические замечания к ним.

Соображения о природе нижней мантии (слой D) и ее разделение на слои D' и D''. О природе границы Гутенберга между мантией и ядром Земли.

Ядро Земли. Физические свойства, состав и состояние его слоев (E, F и G), доводы в пользу преобладания в его составе железа. Основные претенденты на роль легких элементов в составе ядра. Дискуссионность представлений о составе ядра и гипотезы о его происхождении.

При изложении материала этого раздела будем придерживаться классических работ (Гуттенберг, 1963; Магницкий, 1965; Ботт, 1974).

Природа и характер границы Мохоровичича между земной корой и мантией. Земная кора континентов и океанов, ее строение и особенности, состав образующих кору слоев по геологическим и геофизическим данным. Вся совокупность имеющихся данных свидетельствует о том, что земная кора континентов, по крайней мере, ее верхние части, сложена породами, или непосредственно изверженными из более глубоких зон планеты, или подвергшимися той или иной переработке после их поступления в зону коры. То же самое, хотя и с несколько меньшей достоверностью, относится и к земной коре океанического типа.

Таким образом, должна существовать разница между химическим составом коры (или, по крайней мере, ее верхних частей) и составом более глубоких зон. Следовательно, с одной стороны, в недрах Земли должны существовать химические границы или переходные области (слои). С другой стороны, широко известен факт возникновения фазовых переходов под воздействием высоких давлений и температур. Таким образом, в недрах Земли должны существовать также фазовые границы.

Поверхность (граница раздела) Мохоровичича, принимаемая за нижнюю границу земной коры, должна, естественно, относиться к одному из этих видов границ.

В настоящее время, наряду с уже установившемся представлением о химической природе границы Мохо, распространена и гипотеза о том, что эта граница является поверхностью фазового перехода. Последнее предположение не исключает наличия химических границ, которые должны лежать выше или ниже поверхности Мохо и могут или отождествляться с наблюдаемыми слабыми сейсмическими границами, или совсем могут не обнаруживаться сейсмологией в случае постепенного диффузного перехода.

Наконец, существует и компромиссная точка зрения о разной природе поверхности Мохо для различных районов.

Для решения этой проблемы первостепенное значение имеет состав верхних частей мантии Земли и основных слоев земной коры.

Было установлено, что данные о скоростях сейсмических волн под земной корой и составе ксенолитов, поступающих из мантии, совместимы с двумя предположениями о составе подкоровой среды: она или имеет основной состав из пород эклогитовой группы, или состоит из ультраосновных пород – групп перидотитов, вероятнее всего, гранатизированных перидотитов. Сопоставление этого состава с составом метеоритов позволяет отдать предпочтение второму предположению, так как он близок к хондритам – наиболее распространенной группе метеоритов. Однако с эклогитовым составом можно сопоставить состав другой группы метеоритов – эвкритов, правда, гораздо более редкой. Так как в настоящее время можно считать установленным наличие в верхней мантии горизонтальных неоднородностей, то следует сделать вывод и о вариациях ее состава в возможных пределах от перидотитов до эклогитов.

Другим важным фактором является состав глубоких частей земной коры, прилегающих к границе Мохо. Было установлено, что, в сущности, единственное предположение, совместимое со всеми данными наблюдений, состоит в том, что нижние слои континентальной коры сложены основными породами, вероятнее всего, типа габбро (глубинный вариант базальта). Для океанической коры предполагается тот же состав, хотя некоторые исследователи указывают на возможность образования коры океанического дна из серпентинизированных перидотитов.

Если верхняя мантия имеет эклогитовый состав, то граница Мохо обусловлена фазовым переходом, так как базальт и эклогит химически одинаковы и отличаются лишь по минералогическому составу. Если верхняя мантия перидотитовая, то поверхность Мохо имеет химическую природу, как это следует из химического состава пород.

Анализ зависимости скорости продольных волн от плотности породы сопоставление результатов такого анализа с сейсмическими данными позволяет предположить, что на континентах граница Мохо преимущественно химическая по природе (габбро или эклогит – перидотит), однако в ряде областей молодой тектонической активности эта граница может быть фазовой (габбро – эклогит).

Для океанической коры этот анализ неприменим, так как там возможно еще сильное влияние пор.

Для более полного решения вопроса о природе границы Мохо необходимо рассмотреть конкретные кривые фазовых переходов в условиях глубоких частей земной коры. К сожалению, еще нет достаточно полного анализа этих переходов, однако эксперименты, выполненные многими авторами, позволяют все же сделать основные выводы.

Анализ всех известных кривых перехода позволяет сделать вывод о том, что поверхность Мохо не может быть под океанами фазовой границей. Даже если предположить какой-либо неизвестный нам переход, то все равно в гипотезе о фазовом характере границы имеются огромные затруднения.

Несколько иначе складывается обстановка под континентами.

Происхождение земной коры, гипотезы дифференциации, зонной плавки и океанизации, их сущность и критика. То, что земная кора выделилась из мантии Земли в процессе ее исторического развития, не вызывает сомнений. Однако способ выделения вещества коры, пути развития коры еще не изучены, механизм и причины этого процесса и других, ему сопутствующих, представляют особый предмет дискуссии. Дискуссионными также являются и причины возникновения разных типов земной коры и общая направленность ее развития.

В свете имеющихся в настоящее время данных трудно согласиться с гипотезой о происхождении Земли в прошлом через стадию общего расплавления и с процессом выделения коры путем дифференциации по плотности вещества мантии в эту стадию. При такой схеме земная кора выделилась бы по всей Земле примерно одинакового состава и мощности. Для объяснения различий между разными типами коры, в первую очередь

континентального и океанического, приходится в этом случае прибегать к дополнительным, мало обоснованным гипотезам. Кроме того, при среднем составе мантии, близком к хондритам, при такой схеме развития образовалась бы кора гораздо большей мощности, чем это наблюдается. Даже при выделении вещества коры в количестве 7-8% мощность коры была бы около 200 км. Наконец, эта гипотеза не согласуется с тепловым режимом Земли и с составом коры.

В настоящее время более обоснованной гипотезой формирования коры является гипотеза выделения ее вещества в процессе зонной плавки, что подтверждено экспериментально зонной плавкой хондритового вещества.

Сопоставление и анализ большого количества материала показывает, что вещество хондритов или очень близкое к нему, теряя около 10% своей массы, способно создать земную кору и в остатке дать перидотитовую оболочку.

С точки зрения рассмотренного процесса земную кору океанов, по-видимому, следует считать как еще недоразвившуюся. В этих частях Земли процесс зонной плавки оказался замедленным. Причиной такого отставания могло быть несколько пониженное содержание радиоактивных элементов, что привело к замедлению разогрева таких областей.

Постепенное разрастание континентальной коры от ряда наиболее древних центров можно теперь объяснить следующим образом. Первоначальное содержание радиоактивных элементов несколько варьировало от одного места к другому. Места с наибольшим содержанием источников тепла или со сравнительно более глубоким их расположением первыми достигли условий зонной плавки, в процессе которой выделились ядра будущих континентов. При этом источники тепла были перенесены, в основном, в кору, что вместе с выносом тепла магмами привело к относительному охлаждению таких областей. Зонная плавка переместилась в соседние участки. Таким образом, шел процесс как бы концентрического разрастания континентов. Не следует думать, что следующая область активизации всегда примыкала к предыдущей. Нужные условия могли возникнуть и в некотором удалении, так что в тылу могли остаться еще не переработанные области (например, Новая Зеландия выброшена значительно вперед от Австралии). Области, оставшиеся в тылу, охватывались переработкой позже, это вместе с захватом новым циклом старых областей и создавало сложную мозаичную структуру континентов при все же заметной общей схеме разрастания. Именно период активной зонной плавки и соответствует геосинклинальному этапу развития коры, когда за счет недр осуществляется процесс прироста коры. Завершение геосинклинального процесса при этом объясняется исчерпанием первичного, глубинного процесса.

То обстоятельство, что в настоящее время температура под океанами выше, чем под континентами, не противоречит сказанному. В прежние эпохи картина была обратной, но вынос радиоактивных элементов в кору и потеря тепла при подъеме магм привели к охлаждению континентальных частей. В океанических же областях хотя и имеется меньшее количество источников тепла, но они рассредоточены на большую глубину. Благодаря этому к настоящему времени в рассматриваемых областях образовались условия, близкие к континентальным в термическом отношении и в ряде мест приближающиеся к условиям начала зонной плавки.

Однако наряду с объяснением процесса формирования континентальной коры возникает и проблема объяснения процесса океанизации этой коры. Такой обратный процесс, по мнению ряда исследователей, приводит к образованию океанов на месте ранее существовавших континентов.

Как отмечалось, слой D можно считать с большой степенью достоверности однородным. В слое В однородность если и нарушена, то незначительно. Слой D резко неоднороден.

Строение мантии. Строение и состав верхней мантии (слой «В»), геологические данные и геофизические модели. Астеносфера (волновод) и ее вероятная природа. Мантия Земли включает три области – В, С и D – из тех, на которые разделяет Землю Буллен. Позднее Буллен подразделил область D на части D' и D''. Б.Гутенберг полагает, что не имеется никаких определенных указаний на существование в мантии какого-либо разрыва непрерывности первого рода и что зависимость скорости упругих волн от глубины выражается непрерывными кривыми (рис. 3.16). Однако между С и D' на глубине в интервале от 900 км до 1000 км отношение возрастания скорости упругих волн с глубиной уменьшается или скачком, или по крайней мере достаточно быстро, так что там может существовать «разрыв непрерывности второго рода». Возможно, существуют еще слабые границы второго порядка в области D'.

На основе современных данных мы полагаем, что граница между В и С находится на глубине 200 км, тогда как по Буллену ее глубина 410 км. Детальное строение этой «границы» пока еще является спорным, и нет определенного мнения относительно того, соответствует ли она разрыву непрерывности или же переход от области В к области С происходит непрерывно, как полагает Б. Гутенберг. Граница между областями С и D находится приблизительно на глубине 950 км, а между D' и D'', вероятно, на глубине 2700 км. Ни одна из этих границ, по-видимому, не является резкой (рис. 3.16), и переход от одной области к другой, вероятно, происходит постепенно.

Признавая для верхней мантии Земли перидотитовый состав, близкий к составу силикатной фракции хондритов, следует подчеркнуть, что уже непосредственно под корой континентов или на небольших глубинах под ней эта перидотитовая мантия должна находиться в условиях эклогитовой фации, т. е. это должны быть не обычные полевошпатовые перидотиты, а перидотиты с эклогитовыми минералами, в первую очередь, гранатовые перидотиты, что и подтверждается составом ксенолитов. Более того, анализ глубинных пород показывает, что при практически одинаковом химическом составе, близком к гранатизированным перидотитам, могут быть периоды различного минералогического состава, например, оливин + амфиболы; оливин + плагиоклаз + энстатит + клинопироксены; оливин + энстатит + диопсид + шпинель; оливин + пирон + пироксены.

Конечно, сейсмические границы, возникающие под корой при таких минералогических переходах, будут очень слабыми. Также слабыми будут и вариации скоростей в горизонтальном направлении, что и соответствует наблюдениям.

Вскоре после открытия изостазии было установлено, что ниже относительно прочной «литосферы» находится слой с относительно малым пределом текучести, который позволяет путем медленных движений постепенно приближаться к состоянию гидростатического равновесия. Баррел в 1914 г. назвал этот слой «астеносферой».

В 1958 г. Джеффрис подтвердил существование особенности годографа волн Р на расстояниях около 20°. Однако по годографам продольных волн для Азорского землетрясения 1931 г. он заключил, что «переход должен представлять собой значительный разрыв градиента скорости». «Глубина перехода должна быть около 200 км». Это находится в хорошем соответствии с кривой зависимости скорости от глубины, построенной Б. Гутенбергом (рис. 9.1), за исключением того, что Б. Гутенберг считает изменение градиента скорости на этой границе быстрым, но постепенным, а не разрывным.

Переходная область (слой «С») как область аномально быстрого изменения физических свойств земного вещества с глубиной; гипотезы, объясняющие это явление и критические замечания к ним. Уже в 1909 г. кривые зависимости скорости от глубины (рис. 3.16) указывали на хорошо выраженное изменение наклона годографов при эпицентральных расстояниях 45°. В результате самых первых расчетов было установлено, что наиболее глубокая точка луча, выходящего на поверхность при 45°, находится на

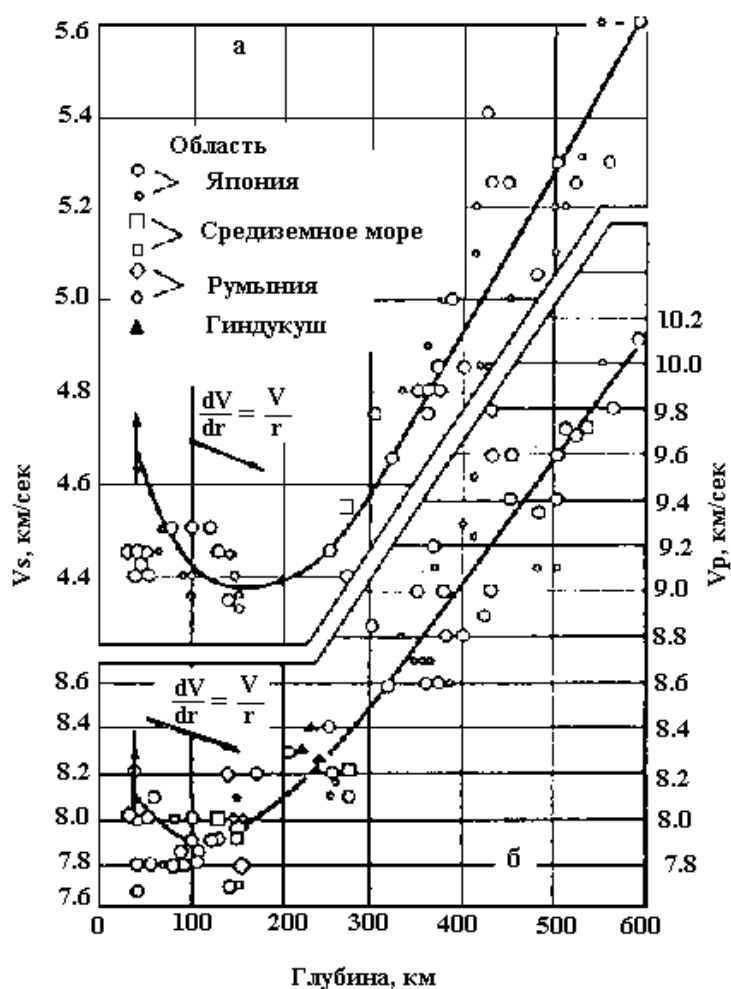


Рис. 9.1. Скорости V_s поперечных (а) и V_p продольных (б) волн в функции глубины, вычисленные по известным временам пробега P и S для толчков, возникших на разной глубине (Гуттенберг, 1963; с. 106-107).

глубине около 1500 км. Вихерт и др. предположили, что эта глубина «границы» означает границу ядра. Более поздние вычисления показали, что глубина разрыва второго рода для производной скорости по радиусу, которая соответствует внезапному изменению вблизи 45° , несколько меньше и составляет около 900-950 км. Это изменение, производной скорости по радиусу, позднее обнаруживалось во всех исследованиях, и каждый раз его интерпретировали, как результат существования границы между слоями с различной скоростью изменения состава. В период между 1925 и 1930 гг. для слоя С иногда употребляли выражение «промежуточный слой». Слои В и С образуют верхнюю мантию.

Ключевой проблемой физики мантии является проблема о физической природе слоя С, который характеризуется ненормально быстрым возрастанием скоростей V_p и V_s , плотности и электропроводности. Существует ряд предположений о природе этого переходного слоя. Предположение о том, что быстрый рост плотности связан с увеличением содержания тяжелых элементов с глубиной, не противоречит условиям равновесия в гравитационном поле. Однако эта гипотеза совершенно противоречит ходу скоростей сейсмических волн с глубиной. Единственный, достаточно распространенный тяжелый элемент в Земле – железо, но увеличение его содержания в породах всегда ведет к снижению скоростей. Таким образом, предположение о химической неоднородности слоя С отпадает. Скорости в слое D также совершенно не соответствуют железистым минералам.

В настоящее время наибольшим признанием пользуются различные варианты гипотезы о том, что в слое С происходит фазовый (полиморфический) переход без существенного изменения химического состава. Доказательством возможности такого перехода служат данные эксперимента по сжатию габбро.

Впервые гипотеза о полиморфическом переходе в слое С была высказана Берналом в 1936 г. Бернал предположил, что при давлении на глубине 400-700 км происходит перестройка ромбической структуры форстерита в кубическую решетку типа шпинели с увеличением плотности при этом примерно на 10%. Несмотря на возражения, основанные на том, что подобный переход должен происходить скачком, в то время как переход в слое С «размазан» на интервал глубин в 300-500 км, т. е. на интервал давлений примерно в 150 тыс. ат, эта гипотеза была поддержана с той модификацией, что кроме перехода в оливине, был предложен ряд других переходов. Постепенный переход в слое С рассматривается состоящим из нескольких малых скачков.

Ряд работ был посвящен изучению этой проблемы, исходя из аналогий силикатов и германатов.

Переход от слоя В к слою D по этой гипотезе происходит путем ряда последовательных превращений, которые схематически описываются реакциями, происходящими по мере возрастания давления.

Другое направление связано с представлениями о распадении силикатов на окислы под действием высокого давления.

Во избежание объяснения ряда трудностей было предложено еще одно объяснение природы слоя С, не связанное с определенными представлениями о составе мантии. Согласно этой гипотезе в слое С происходит хотя и быстрый, но постепенный переход от преобладающего ионного типа связей в веществе мантии в слое В к ковалентным связям в слое С. В основе этой гипотезы лежит известный факт, что ионные соединения, валентные и металлы образуют последовательность, в которой нет четких границ. В сущности даже не бывает чисто ионных и чисто валентных соединений, а преобладают смешанные. Например, галогениды серебра образуют целую гамму переходов от почти чистого ионного AgF к почти чисто валентному AgI . Такой тип перехода полностью снимает затруднения, связанные с отсутствием заметного скачка свойств в слое С.

Соображения о природе нижней мантии (слой D) и ее разделение на слои D' и D'' . О природе границы Гутенберга между мантией и ядром Земли. Для суждения о природе и составе слоя D мы пока располагаем недостаточным количеством экспериментальных данных. Наиболее полные сведения имеются для габбро и дунита. Из этих данных следует, что дунит не может быть главной компонентой слоя D. Что касается габбро. При разумных температурах габбро по плотности подходит к слою D. Однако, кроме плотности, должны также соблюдаться и скорости сейсмических волн, что становится приемлемым только при давлениях выше $2 \cdot 10^6$ ат.

Появившиеся в последнее время данные по ударному сжатию ряда горных пород – дунита, перидотита, базальта, пироксенита, диорита – показывают, что все они, по-видимому, испытывают фазовые переходы при давлениях 150-300 тыс. ат. После этого перехода плотности всех становятся очень схожими между собой и достаточно близкими к плотности слоя D. Такое сближение свойств горных пород при высоких давлениях может быть объяснено тем, как показывают эксперименты, удельный объем и сжимаемость элементов, резко различные при малых давлениях, при больших давлениях становятся почти одинаковыми для всех (химических) элементов.

Другое объяснение этого явления состоит в том, что при давлениях 150-300 тыс. ат. Силикаты и алюмосиликаты, возможно, распадаются на смесь окислов. Так как окислы одни и те же, то и свойства их смеси будут схожими, несколько меняясь в связи с разным соотношением окислов в смеси.

Гипотеза о составе слоя D из окислов получила поддержку в экспериментальном синтезе новой модификации SiO_2 с решеткой рутила, которую обычно называют стишверит или стишовит. Стишовит был синтезирован в условиях статического сжатия при 120-140 тыс. ат. и $T = 1500^\circ\text{C}$. Исследованные свойства стишовита таковы, что они «с избытком» удовлетворяют слою D.

Таким образом, высказана гипотеза, что слой D состоит из смеси окислов с SiO_2 в форме стишовита, или вещество слоя D представляет собой квазиоднородную среду из плотнейшей упаковки ионов кислорода с октаэдрическими пустотами, занятыми катионами Mg, Fe, Si. При этом кремний переходит из четверной координации в шестерную, как в стишовите. Такой переход и позволяет анионам кислорода максимально приблизиться к плотнейшей упаковке.

Имеются сравнительно слабые, но ясные указания на то, что изменение скоростей с глубиной в слое D не совсем регулярно и, более того, наблюдается слабое уменьшение скорости (в слое D'') при приближении к границе ядра. На рис. 9.2 приведены значения обратных величин кажущихся скоростей для продольных волн, вступающих на расстояниях между 23° и 103° в случае неглубокого источника. На этот же график нанесены логарифмы средней максимальной амплитуды смещения почвы (в мк) в прямой продольной волне на тех же расстояниях. Амплитуды приведены к значениям амплитуд в продольной волне с периодом 1 сек в случае толчка с магнитудой 7,0.

Кривая обратных величин кажущихся скоростей теоретически должна резко падать на расстояниях, при которых наибольшая глубина проникновения пришедших лучей приходится на слой, в котором скорость довольно быстро увеличивается с глубиной. Она должна быть близка к горизонтальной, если наибольшая глубина проникновения соответствует слою с почти постоянной скоростью. Совершенно горизонтальные участки кривой как, например, на расстояниях больше 90° , показывают, что в самой глубокой точке луча, выходящего на этих расстояниях, скорость уменьшается с глубиной с быстротой, близкой к критической, которая определяется соотношением $dV/dr = V/r$. Вблизи границы ядра она составляет около 0,4 км/сек на 100 км глубины для продольных волн и около 0,2 км/сек на 100 км для поперечных волн.

Амплитуды смещения почвы должны быть сравнительно большими на эпицентральных расстояниях, где вступают волны с глубиной проникновения, соответствующей относительно быстрому возрастанию скорости с глубиной; амплитуда будет уменьшаться, стремясь к нулю, если глубина проникновения луча соответствует уменьшению скорости с глубиной по закону, близкому к критическому.

На рис. 9.2 отмечены расстояния, на которых выходят волны, коснувшиеся границы между областями C и D' и границы между D' и D'' . Предполагается, что лучи, выходящие на расстоянии 103° , касаются ядра. Соответствующее расстояние для поперечных волн несколько отличается, так как коэффициент Пуассона изменяется с глубиной. Это расстояние не может быть точно установлено ни для волн P ни для волн S, так как переход от прямых волн к дифрагированным постепенный.

Существуют указания на дополнительные нерегулярности в пределах верхней части слоя D' (рис. 9.2). Это неоднократно отмечалось, начиная с 1911 г. Однако, подробности их неизвестны. Заслуживает внимания тот факт, что такие особенности обнаружены в слое D' , где увеличение скорости с глубиной часто рассматривается как следствие только увеличения давления.

Наблюдения времен пробега, так же как и амплитуд P (рис. 9.2), показывают, что возрастания скорости волн замедляется с приближением к ядру и наконец в слое D'' , по-видимому, постепенно сменяется слабым уменьшением с глубиной (рис. 3.16). Предполагают, что на глубине около 2800 км, существует граница, и скорость там внезапно уменьшается: от 13,24 до 12,57 км/сек, но это не подтверждено.

Берч поднял вопрос, каким образом в слое D' , если он однороден по составу и фазе (что, по-видимому, на самом деле имеет место), может достигаться такое условие. Он

указал, что существуют, по меньшей мере, две возможности: «или этот слой был однородным с самого начала...или это явилось результатом процесса дифференциации, который происходил во всей мантии». Сам Берч склоняется ко второму предположению.

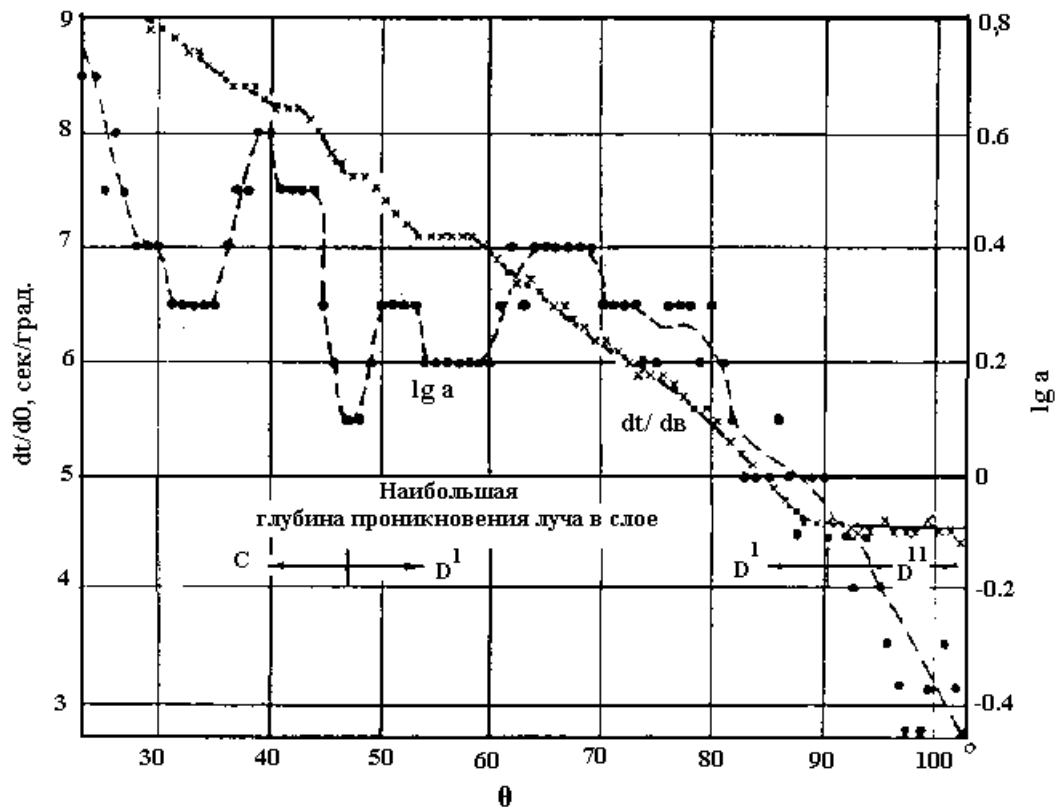


Рис. 9.2. Обратная величина кажущейся скорости $dt/d\theta$ (крестики) и $\lg(a/T)$ для продольных волн P в функции эпицентрального расстояния ($\lg a$ при $T = 1$ сек) для землетрясения с магнитудой $M=7.0$ (точки) (Гутенберг, 1963; с. 120).

Изменения в слое D'' , вероятно, являются следствие процессов, которые вызываются различиями между твердой мантией и нетвердым внешним ядром. Никаких конкретных предположений на это счет, по-видимому, не сделано.

Ядро Земли. Физические свойства, состав и состояние его слоев (E, F и G), доводы в пользу преобладания в его составе железа. Основные претенденты на роль легких элементов в составе ядра. Дискуссионность представлений о составе ядра и гипотезы о его происхождении. О природе границы Гутенберга (продолжение). Переход от мантии к ядру Земли сопровождается сильным увеличением плотности (примерно на 70%), резким снижением скоростей продольных волн, появлением высокой электропроводности. Высокая плотность вещества ядра и его электропроводность убедительно говорят, что в ядре вещество находится в металлической фазе. Кроме того, сейчас уже можно считать установленным, что внешнее ядро (2900-5100 км) находится в жидком состоянии. Граница мантия – ядро резко выражена.

Из тяжелых металлов только железо встречается в природе в больших количествах и только оно в металлической фазе составляет существенную часть метеоритов, чтобы быть материалом, пригодным для образования ядра Земли. Поэтому уже на ранних стадиях развития геофизики высказывалась гипотеза о железном или железо-никелевом составе ядра Земли.

Таким образом, гипотеза железного ядра с примесью некоторых других элементов может быть согласована с основными геофизическими данными о свойствах ядра Земли.

Гораздо более серьезные трудности возникают перед гипотезой железного ядра при сопоставлении с данными о других планетах и при попытках объяснить способ образования ядра.

При сопоставлении плотности планет земной группы (включая Луну) выясняется интересная зависимость. Оказывается, что средняя плотность вещества планеты (с приведением к одному давлению) растет с увеличением размеров и массы планеты. Получается, что чем больше планета, тем больше в ней тяжелых элементов, т. е. преимущественно железа. Таким образом, Луна и Марс почти не содержат железа и не имеют ядра. Земля и очень близкая к ней по размеру Венера имеют большое плотное ядро. Исключением из этой закономерности является маленький, но очень плотный Меркурий.

Объяснить такое закономерное и очень значительное изменение содержания железа в планетах пока не удается.

Также не очень понятен путь образования железного ядра. В «термическом разделе» было показано, что при возникновении Земли температура в ее недрах была везде существенно ниже точки плавления. Таким образом, возникновение ядра путем плавления железных включений и их стекания к центру стало возможным на более позднем этапе. Но если в этих условиях еще можно как-то представить стекание железного расплава, то очень трудно понять, как силикатная или окисная масса, занимавшая место будущего ядра, поднялась вверх в мантию и как при этом возникла четкая граница ядро-мантия.

Все эти трудности снимаются, если предположить, что граница ядро – мантия не химическая, а фазовая, отделяющая мантию с веществом в неметаллическом состоянии от ядра того же состава, но с веществом в металлической фазе. Если это так, то плотность и давление в модели «А» Гутенберга – Буллена можно рассматривать как уравнение состояния для вещества планет.

Для решения проблемы необходимо показать возможность перехода в металлическую фазу пород и минералов, составляющих мантию Земли. Такой переход («резонансный») в металлическую фазу происходит у элементов IV группы (C, Si, Ge), имеющих четыре валентных электрона, что и приводит к резонансу, если число ближайших соседей больше четырех. Видимо, то же имеет место для соединений элементов III и V групп с тремя и пятью электронами.

Для приложения этого объяснения к гипотезе металлизации вещества Земли следует учесть, что основой всех силикатов служат сложные ионы SiO_4^{-4} , которые также имеют четыре валентных электрона. Таким образом, можно ожидать, что их поведение под давлением будет аналогично поведению элементов IV группы.

Другая трудность, встающая перед гипотезой фазовой природы границы мантия – ядро, состоит в том, что при переходе к ядру совершается переход не только в металлическую, но и в жидкую фазу. Термодинамические соображения подтверждают возможность существования такой границы. Такая граница может быть пропущена продольными волнами, однако крайне неправдоподобно, что ее не замечают поперечные волны, например, SH, для которых такая граница была бы сильной. Это, видимо, серьезный аргумент против рассматриваемой схемы.

Таким образом, приходится признать вероятными два варианта объяснения природы границы ядра Земли.

1. Граница является химической по природе, и ядро состоит из некоторого сплава железа.

2. Граница обусловлена фазовым переходом, и ядро состоит из вещества нижних частей мантии, но в металлической фазе. В этом случае вещество глубоких частей мантии должно обладать не совсем типичной фазовой диаграммой. Однако такая диаграмма возможна и в ряде случаев действительно существует, как показывают опыты. Таков переход в металлическую фазу Sn, C (алмаз), InSb, InP и ряд других соединений и элементов.

Полностью вопрос о физике и составе ядра и мантии Земли может быть решен только в результате проведения дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Не последнюю роль в решении этого вопроса могут играть данные о строении других планет солнечной системы. Например, согласно представлениям модели «горячей» Земли (Кузнецов, 2000), ядро нашей планеты содержит значительное количество водорода.

Проблема же земной коры и верхней мантии в силу большой сложности только с трудом поддается теоретико-физическому анализу. В этой области главное слово, видимо, будет принадлежать эксперименту, как лабораторному, так и полевому, в виде целого комплекса геофизических, геологических и геохимических наблюдений вплоть до сверхглубинного бурения с проникновением в мантию Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ботт М.** Внутренне строение Земли. М.:Мир. 1974. 376.
2. **Гуттенберг Б.** Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 264 с.
3. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
4. **Магницкий В.А.** Внутреннее строение и физика Земли. М. Недра. 1965. 379 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный в представленной книге материал в полном объеме освещает все традиционные разделы утвержденной Министерством образования РФ в 2000 г. программы дисциплины «Физика Земли» для специальности 011200 «Геофизика». Представляется, что книга в достаточно полном объеме акцентирует внимание также и на трудных, спорных и пока не решенных проблемах, стоящих перед «Физикой Земли».

Разделы книги с точки зрения новизны представленного в них материала проработаны с разной детальностью. Это связано с большим количеством новых данных, постоянно появляющихся в большом количестве узкопрофильной научной литературы геофизических и геологических специализаций.

Книга содержит новый раздел «Сейсмический процесс». Его новизна предопределена теми широко известными данными о миграции землетрясений, с одной стороны, и о деформационных волнах тектонической природы – с другой, которые прямо указывают на взаимосвязанность землетрясений, что прослеживается и в геофизических полях, включая ротацию планеты. Результатом такого подхода явилось создание волновой ротационной модели сейсмического процесса, в рамках которой оказалось возможным «увязать» широкий спектр геофизических данных и явлений, ранее не находивших своего объяснения. Это позволило автору сделать вывод о том, что основное предположение ротационной волновой модели – гипотеза о существовании «собственного» момента количества движения у блоков земной коры, имеет право на существование, и может быть распространена также и на тектонические плиты и другие макрообъемы Земли.

Недооценка важной роли вращения Земли при построении теорий различных геофизических и геологических процессов была отмечена давно. В частности, достаточно убедительно было показано значительное влияние вращения Земли на поле упругих напряжений в литосфере и, как следствие, на распределение связанных с ним систем планетарных разломов. Проблема, по мнению автора, заключается в том, что только вращением Земли, как целой, вокруг своей оси не удастся объяснить все особенности упругого поля литосферы планеты и, как следствие, ее формы. Для этого необходимо научиться «включать» и ротационные механизмы, связанные с другими поворачивающимися (вращающимися) объемами вещества, расположенными как внутри Земли, так и за ее пределами. Например, повороты блоков земной коры, как показано в IV разделе, приводят к появлению вокруг них дальнедействующих полей упругих напряжений. Такие же, по сути, «моментные» поля напряжений должны генерироваться в «твердой» оболочке Земли вследствие вихревых движений на Солнце и в солнечной системе (раздел I, с. 36). Очевидно, что такие «моментные» и дальнедействующие поля напряжений в определенной (возможно, в значительной) степени должны определять и форму поверхности Земли.

Геофизические результаты, полученные с учетом поворотных движений, нашли свое отражение в соответствующих разделах книги. Можно видеть, что учет таких движений часто приводит и к новым результатам и к появлению новых представлений о геофизических и геологических явлениях. Например: новая теория колебаний Чандлера и новые данные о полярном сжатии Земли и вытекающие из них следствия (раздел II), теория сейсмического процесса (раздел IV), новая модель геоизостазии (раздел V) и «проблема №1» в физике Земли (раздел VII). Отметим, что такого рода новые моменты, отмеченные в книге, не претендуют на полноту.

Первый раздел книги, кроме своей очевидной «вводной» направленности, имеет и другую нагрузку. А именно, приведенный в этой части книги обзор, показывает и большую распространенность вращательных движений в Природе, и их определяющее влияние как на все геофизические и геологические процессы, так и на появление жизни на Земле. Отметим, что близкая «по духу» идеология о «всеобъемлющем влиянии Солнца на все, что происходит на нашей матушке – Земле» заложена и в основы нового научного направления «Современная геодинамика и гелиогеодинамика» (раздел I, с. 35-36).

В заключение кратко перечислим вытекающие из изложенного к книге материала те новые геофизические направления, которые уже на данном этапе открываются перед исследователями в случае учета эффектов поворота макрообъемов, слагающих вращающуюся планету.

1. *Квантовая сейсмо тектоника.* Идея о «корпускулярных» или «квантовых» свойствах сейсмотектонического процесса обсуждается достаточно давно. Она насчитывает, как минимум, полувековую историю. Появление квантовой гипотезы вполне очевидно: на фоне в геологическом смысле непрерывного тектонического процесса имеет место выделение энергии в виде кратковременных сейсмических импульсов (землетрясений) – «квантов». В последние годы разрабатываются также концепции *квантовой тектоники, нелинейной сейсмики и релятивистской геодинамики.*

Фундамент под квантовую геофизику был подведен работами многих исследователей, начиная с работ W.M. Elsasser и J.C. Savage. Особенно следует отметить работы А.В. Николаева, В.Н. Николаевского и М.В. Курлени с сотрудниками, в которых, фактически, были заложены физические основы новых направлений: «нелинейная сейсмика», «механика уединенных тектонических волн» и «нелинейная геомеханика».

2. *Термодинамика землетрясений.* Одномерное уравнение СГ, как известно, относится к классу интегрируемых уравнений, для которых в явном виде существует и функция Лагранжа и интегралы (законы) сохранения. Из теоремы вириала $E_{int} = 2E_{кин}$ следует, что энергия взаимосвязи всей цепочки блоков (E_{int}) равна удвоенной кинетической энергии $E_{кин}$ системы. Определенная таким образом сейсмическая энергия $E = 3/256\pi\rho\Omega^2 R_0^5 \neq f(G)$ оказывается не зависящей от упругого модуля сдвига среды G . Физически это означает, что ротационный механизм позволяет закачивать в твердую среду такое количество упругой энергии, которое может превысить ее прочность на сдвиг.

Возможность «модельного» определения величины упругой энергии землетрясения и ее «квантового» представления позволяют в рамках ротационной волновой модели наметить пути построения физической статистики землетрясений. В основу таких построений должна быть положена определяющая роль ротационных эффектов во вращающихся твердых телах, имеющих блоковое строение.

3. *Тектоника.* Проблема вращательных движений в тектонике не нова. В свете ротационного подхода плиты, как и поворачивающиеся «элементарные» сейсмофокальные блоки, вследствие вращения Земли должны быть окружены полями упругих напряжений, имеющих соответствующим образом ориентированные моменты сил. С физической точки зрения постановка ротационной задачи в такой плоскости вполне закономерна. Таким образом, ротационный подход, в принципе, может быть применен и к тектоническим задачам, связанным с расчетом полей упругих напряжений вокруг движущихся (поворачивающихся) плит. В рамках такой ротационной тектонической задачи уровень напряженного состояния «твердой» Земли, очевидно, будет определяться упругими полями, возникающими вследствие взаимодействия поворачивающихся плит и блоков земной коры между собой. Величина упругой энергии, соответствующая такому ротационному взаимодействию, как отмечалось выше, может быть весьма значительной и превышать энергетическую прочность среды на сдвиг.

4. *Прогноз напряженного состояния геофизической среды.* Возможность количественного описания форшоковой и афтершоковой стадий сейсмического цикла, в принципе, позволяет построить такую теорию прогноза землетрясений, включающую указание и времен толчков, и мест расположения их очагов, которая, по сути, является в большей степени детерминированной, чем статистической. Как видим, ротационная волновая модель сейсмического процесса, объясняющая эффекты дальнего действия между очагами землетрясений, открывает новые пути решения проблемы прогноза землетрясений. Для ее решения необходимо, во-первых, «центр тяжести» исследований физики процесса перенести с очага отдельно взятого землетрясения на совокупность очагов. Во-вторых, от единичных измерений перейти к мониторингу

сейсмотектонического процесса с помощью сети, способной регистрировать колебания крутильной поляризации. При выполнении этих условий мы сможем достаточно эффективно приступить к исследованию процессов взаимодействия сейсмофокальных блоков (очагов землетрясений) и тектонических плит друг с другом и, как следствие, к построению детерминированного прогноза землетрясений.

В рамках ротационной волновой модели становится понятной природа взаимосвязи сейсмичности с циклами солнечной активности. Действительно, подавляющей частью орбитального углового момента всей солнечной системы обладает Юпитер, период обращения которого вокруг Солнца близок к 11 годам. Поэтому, возможно, природа 11-летнего цикла и сейсмичности Земли и солнечной активности (моментных по своей сущности) связана со сложной динамикой всей солнечной системы, в основном, с динамикой обращения Юпитера.

Представляется, что с решением этой же задачи тесно связаны как проблема распределения момента количества движения в пределах солнечной системы, так и проблемы происхождения и эволюции звездных и планетарных систем вообще.

5. *Геомеханика.* Анализ естественных напряжений, выполненный по результатам измерений в рудниках на территории северной Евразии, показал, что весь массив коры, обладая определенной структурой, в каждый момент самоорганизуется, уходит от ситуаций с накоплением энергии за счет перестройки структуры и, только исчерпав эти возможности, резко перестраивается и организует новую структуру, в «одежде» которой ему будет «легче жить». Описание такой перестройки осуществляется, в том числе, и с помощью маятниковых волн, являющихся, по сути, тектоническими солитонами.

Описание напряженного состояния среды в районах рудников и сейсмических регионов имеет много общих черт, физика и математическое описание которых, по сути, едины. Объединение в рамках ротационной волновой модели различных способов описания геофизического процесса позволит ускорить построение детерминированного прогноза напряженного состояния и для геологической среды.

6. *Мониторинг сильных взрывов* (в том числе вулканических) в отличие от мониторинга тектонических землетрясений, согласно ротационной волновой модели, принципиально отличается тем, что из очага взрыва (вулкана) не должны излучаться волны крутильной поляризации. Поэтому для мониторинга ядерных взрывов (возможно, и для мониторинга сильных вулканических землетрясений), а также калибровки и среды и сейсмических станций, проблема регистрации крутильных колебаний является принципиально важной.

7. *Моментная теория упругости* в отличие от классической теории упругости является чисто математической, поскольку соответствующие исходным уравнениям движения скорости в природе не существуют (по крайней мере, в течение почти уже столетнего существования моментной теории такие скорости так и не были установлены). По-видимому, это может быть следствием, в основном, одной причины – пространство по отношению к таким напряжениям не является изотропным, вследствие чего соответствующие компоненты (проекции) момента количества движения не сохраняются.

И, тем не менее, в рамках классической теории упругости (симметричного тензора напряжений) удалось построить описанную в книге ротационную модель, использующую представления о напряжениях с моментом сил. Для объяснения физического смысла основного предположения модели – поворота блоков земной коры за счет внутренних источников, по-видимому, следует искать новые, отличные от принятых в механике, подходы, объясняющие взаимосвязь свойств пространства-времени и законов сохранения.

8. *Ротационная физика Земли.* Перечисленные выше проблемы уже, фактически, обозначены и, тем самым, намечены пути их возможного решения. В настоящей работе намечены пути подхода к решению и более общей проблемы, по сути, объединяющей все выше перечисленные задачи в одну – проблему ротационнообусловленных волновых движений.

Волны Эльзассера, Николаевского, Курлени-Опарина, ротационнообусловленные и др., по сути, представляют собой уединенные волны (солитоны), возможной «средой обитания» которых являются только иерархичные (блоковые) структуры с сильно нелинейными свойствами. В рамках «непрерывных» сред, описываемых линейными или нелинейными волновыми уравнениями, просто невозможно получить численные значения соответствующих тектоническим движениям скоростей.

В рамках ротационной гипотезы, описанной в разделе IV настоящей книги, тектонические движения достаточно просто обобщаются и на геологические отрезки времени. Это достигается путем включения в рассмотрение в соотношении (4.39) других характерных частот, соответствующих вращению Земли в солнечной системе (недели – десятки, сотни и, возможно, тысячи лет ...), в Галактике (галактический год и связанные с ним характерные периоды) и, возможно, в Метагалактике и всей Вселенной, в целом. Земля на таких масштабах рассмотрения, по сути, является «точкой». Поэтому этапы изучения структуры ее геотектонического поля в рамках ротационной гипотезы, по видимому, чем-то будут напоминать известные из истории науки пути познания строения материи, которые развивались в двух на первый взгляд «противоположных» направлениях, постепенно сливаясь. С одной стороны, изучались и продолжают изучаться различные части Земли, планета в целом, Солнечная система, Галактика, Вселенная и то, что было до Большого взрыва. С другой – ограниченный объем вещества, молекулы, атомы, элементарные частицы, их структура и излучение, которое, по видимому, только и существовало до Большого взрыва.

Все перечисленные новые направления, по сути, являются новым направлением в геофизике, которое можно назвать *вихревая геодинамика литосферы*.

Такая значимая для Земли (как, впрочем, и для других планет и их спутников в солнечной системе) роль вращательных движений позволяет предположить, что учет всего спектра вращательных эффектов может быть положен в основу *новой ротационной физики Земли*. В рамках такой физики естественной становится и волновая природа геофизических, тектонических и геологических процессов, протекающих на Земле и других планетах солнечной системы в течение всей ее жизни.

В рамках новой ротационной физики Земли, очевидно, необходимо будет переписать II, III, как следствие, VI и VII разделы. Из самых общих соображений можно предположить, что при этом изменения необходимо будет внести и в V, VIII и X разделы.

Представляется, что построение ротационной физики Земли, охватывающей все ее основные ныне существующие разделы, а также и, возможно, новые, дело не такого уж и далекого будущего.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
I. МАТЕРИЯ. ДВИЖЕНИЕ. ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ	4
Единство природы	4
1. Иерархия объектов в природе	4
2. Четыре вида фундаментальных взаимодействий	7
Вселенная, Галактика, Солнечная система, планеты – основные гипотезы происхождения и эволюции	10
Основы «холодной» модели происхождения солнечной системы	14
Модель горячей Земли	16
Ротации во Вселенной	20
Взгляд физика: вращательное движение как характерное свойство пространства-времени Вселенной	20
Взгляд геолога: вращательное движение и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли	30
Новый диалог с Природой	33
Предмет физики Земли	36
1. Земля в солнечной системе. Планеты земной группы и планеты-гиганты, их отличительные признаки	36
2. Предмет и задачи дисциплины, история ее установления как типично пограничной науки. Связь с другими науками	38
Литература	40
II. УЧЕНИЕ О ФИГУРЕ ЗЕМЛИ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ЕЕ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ	45
История вопроса	45
О связи фигуры Земли с ее происхождением, эволюцией, строением и процессами внутри планеты	46
Понятие об истинной фигуре Земли - геоиде, его математическое и геофизическое обоснование, геометрическое представление, место и условия наблюдения	46
Земля как 2- и 3-осный эллипсоиды вращения, размеры полуосей, геометрическое (полюсное и экваториальное) динамическое сжатия	50
Понятие о неустойчивости вращения Земли, периодах Эйлера и Чандлера, периодических и непериодических изменениях скорости ее вращения, нутации и прецессии	50
Колебания Чандлера и сейсмотектонический процесс	52
Геоид по спутниковым данным	52
Определение массы, средней плотности и момента инерции Земли, значение последнего для познания строения планеты. Земля как фигура равновесия неоднородной вращающейся жидкой массы (приближенно) и вытекающий отсюда вывод о ее слоистом внутреннем строении	55
Форма Земли и геодинамика	55
Парадокс Эверндена	56
Оценки М.В. Стоваса	57
Ответ на вопрос Дж. Эверндена	58
Литература	60

III. СТРОЕНИЕ И СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИИ	61
Определение науки сейсмологии. Классификация землетрясений по происхождению, глубине очага и силе. Способы оценки силы землетрясений: 12-балльная шкала, шкала магнитуд, и др. Географическое распределение (главные пояса сейсмичности и отдельные области). Прогнозирование землетрясений, сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство	61
Землетрясение, его очаг, гипоцентр, эпицентр и эпицентральное расстояние. Характер деформаций в очаге по теории упругой отдачи и за его пределами...	67
Сейсмичность Земли и физика землетрясений	69
Модель очага со множеством неровностей	70
Модель процесса землетрясения	72
Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения	72
Распространение упругих колебаний в теле Земли, понятие об изосейсмической поверхности и изосейсте, фронте волны и сейсмическом луче. Объемные (продольные и поперечные) и поверхностные (Релея, Лява и Стоунли) волны, скорости их распространения в Земле и последовательность прихода к точке записи на ее поверхности. Годографы различных типов сейсмических волн, их траектории внутри Земли	75
Определение скорости распространения сейсмических волн в Земле с помощью уравнения Гергольцта – Вихерта	80
Анализ данных о скоростях распространения продольных и поперечных волн по радиусу Земли; выделение границ раздела скоростей 1-го и 2-го рода; деление Земли на земную кору (слой "А"), мантию (верхнюю, переходную область и нижнюю - слои "В", "С" и "Д") и ядро (внешнее, переходная зона и внутренне - слои "Е", "F" и "G")	81
Проявление внешнего и внутреннего ядер Земли в особенностях выхода объемных сейсмических волн на поверхность Земли	82
Состояние слоев вещества Земли по данным сейсмологии. Распределение скоростей и сейсмических волн в земной коре (континентов и океана), типы земной коры (по данным сейсмологии). Скоростная модель земной коры континентов с инверсионным слоем, свойства последнего	82
Сейсмология и глобальная тектоника	86
Литература	87
IV. СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС	91
Постановка проблемы	91
Класс сильнейших землетрясений	96
Класс сильных землетрясений	96
Сейсмический цикл	98
«Элементарные» блоки	98
Повторяемость сильнейших землетрясений	99
Три стадии сейсмического цикла	101
Противоречивость данных о периодичности сейсмического процесса	103
Методика исследования распределений землетрясений во времени	103
Особенности распределения северо-западно-тихоокеанских землетрясений во времени	105
Класс сильных форшоков и афтершоков	106
Квазипериодичность сейсмического процесса	107
Миграция землетрясений	108
Взаимодействие землетрясений	109
Феноменологическая модель сейсмического процесса	111

Прогноз времени землетрясений и мест расположения их очагов	111
Механическая модель сейсмического процесса	112
Ротационная модель сейсмического процесса. Известные тектонические гипотезы, основанные на ротационном режиме Земли. Исходные физические данные, постановка задачи, решение задачи, оценки; следствия модели: дальное действие и землетрясения-дуплеты, спектр волн миграции землетрясений, природа нутации полюса Земли, ротационная модель очага землетрясения, ротационная тектоника Земли (введение в проблему)	115
Известные тектонические гипотезы, основанные на ротационном режиме Земли	115
Исходные физические данные модели	116
Постановка задачи	118
Решение задачи	118
Оценки	121
Следствия модели. Дальное действие и землетрясения-дуплеты	121
Спектр волн миграции землетрясений	123
Природа нутации полюса Земли	126
Ротационная модель очага землетрясения	128
Ротационная тектоника Земли (введение в проблему)	131
О скоростях движения тектонических плит	133
Ротационная гипотеза	138
Литература	139
 V. ПЛОТНОСТЬ, СИЛА ТЯЖЕСТИ И ДАВЛЕНИЕ ВНУТРИ ЗЕМЛИ.....	145
Исторические предпосылки создания теории определения плотности	145
Плотность пород земной группы и средняя плотность Земли	145
Определение плотности вещества внутри Земли с помощью уравнения Роша, Адамса - Вильямсона и способом Буллена; соответствующие им плотностные модели. Основы способа расчета силы притяжения на различных глубинах по радиусу Земли и ее гравитационная модель	146
Основы способа расчета давления, его величины и характера изменения по радиусу Земли. Значение данных о плотности, силе притяжения и давлении для изучения состояния вещества и процессов во внутренних зонах Земли	152
Новая модель геоизостазии	152
Принцип минимизации – основной закон эволюции планет	155
Роль землетрясений в минимизации гравитационной энергии	155
Высота геоида	157
Замечание по поводу сжатия Земли	158
Принцип минимизации энергии	158
Механизмы реализации принципа минимизации	159
Гидростатическое равновесие (на примере гравитационного поля планет)	160
Распределение плотности	162
Литература	164
 VI. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ И СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ	165
Из истории наблюдений	165
Глобальные волны геоида, отсутствие их связи с особенностями строения земной коры и вероятная интерпретация их появления на основе: представления о наличии плотностных неоднородностей в верхней мантии (гипотезы происхождения последних), крупномасштабных форм рельефа фазовых границ в слое "С" и на границе мантия – ядро	166

Аномалии силы тяжести. Поправка за высоту. Аномалия в свободном воздухе (аномалия Фая). Поправка за притяжение промежуточного слоя (аномалия Буге). Принципы изостазии	169
Отклонения от принципа изостазии	174
Изостазия и колебательные движения земной коры. Проблема вековых изменений силы тяжести, ее современное состояние	175
Сопоставление данных наблюдений для Земли с гидростатической теорией ...	175
Литература	177
VII. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ ЗЕМЛИ	179
Магнитное поле Земли	179
Возникновение науки о магнитном поле Земли	179
Методы исследования магнитного поля Земли	180
Структура магнитного поля Земли	182
Вековые вариации геомагнитного поля	182
Палеомагнетизм	185
Гипотеза дрейфа континентов	185
Реконструкция континентов в палеозое	187
Разрастание дна океанов и дрейф континентов	189
Тектоника плит	190
Электрические эффекты	193
Магнитогидродинамические параметры земного ядра	194
Электромагнитное взаимодействие оболочки и ядра	195
Механизм генерации геомагнитного поля – это «проблема №1» в физике Земли	196
Литература	197
VIII. ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛИ	199
Введение в проблему	199
Геотермические измерения на континентах и в океане. Определение теплового потока и геотермического градиента, их связь с основными, структурными единицами земной коры	200
Уравнение теплопроводности, ее виды в Земле. Оценка температуры в верхней части литосферы (до глубин около 100 км) по данным геотермических измерений (теплового потока), магматической деятельности (по температуре лав) и электропроводности	206
Магматическая деятельность Земли как показатель температуры земных недр ..	209
Температура верхних частей Земли по данным об электропроводности	210
Понятие о нижнем температурном пределе в мантии и его оценка с помощью адиабатического температурного градиента. Обоснование верхнего температурного предела в мантии как температуры плавления	210
Экспериментальное определение температуры плавления в мантии; результаты и трудности. О термодинамической формуле Клаузиуса-Клайпейрона. Определение температуры плавления в мантии по гипотезам плавления Линдемана и Жаркова. О реальных температурах в мантии	211
Температура в ядре Земли, ее оценка с помощью уравнений для состояния железа при давлении и плотности в ядре; температура плавления железа; адиабатическая температура и др.	212
Обобщенная температурная кривая по радиусу Земли. Источники тепла Земли и их относительный вклад в общий тепловой баланс планеты. Гипотезы и варианты тепловой истории Земли	213
Термическая история Земли	216

Гипотеза холодного происхождения	217
Химическое разделение элементов	218
Литература	219
 IX. О ПРИРОДЕ ОСНОВНЫХ СЛОЕВ ЗЕМЛИ И ГРАНИЦ РАЗДЕЛА МЕЖДУ НИМИ	
Природа и характер границы Мохоровичича между земной корой и мантией. Земная кора континентов и океанов, ее строение и особенности, состав образующих кору слоев по геологическим и геофизическим данным	221
Происхождение земной коры, гипотезы дифференциации, зонной плавки и океанизации, их сущность и критика	222
Строение мантии. Строение и состав верхней мантии (слой «В»), геологические данные и геофизические модели. Астеносфера (волновод) и ее вероятная природа	224
Переходная область (слой «С») как область аномально быстрого изменения физических свойств земного вещества с глубиной; гипотезы, объясняющие это явление и критические замечания к ним	224
Ядро Земли. Физические свойства, состав и состояние его слоев (Е, F и G), доводы в пользу преобладания в его составе железа. Основные претенденты на роль легких элементов в составе ядра. Дискуссионность представлений о составе ядра и гипотезы о его происхождении. О природе границы Гутенберга (продолжение)	228
Литература	230
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
	231