

## Глава I. ЗЕМЛЯ: ГОРЯЧАЯ ИЛИ ХОЛОДНАЯ?

*Астрофизики отказались от модели “холодной” стационарной Вселенной в пользу “горячей” и расширяющейся. Вслед за ними, казалось бы, должны последовать геологи и геофизики, признав модель “горячей” и расширяющейся Земли.*

### I. 1. Земля: горячая или холодная; плутонисты или неплутонисты?

*Ранние гипотезы.* Проблему внутреннего устройства Земли по праву можно считать одной из древнейших и наиболее актуальных для человечества (Батюшкова, 1966). Естественно, еще самые древние мыслители задумывались над тем, как устроена Земля и изобретали на эту тему подчас совершенно невероятные модели. Согласно Гомеру [900 лет до н.э.], Земля представляла собой выпуклое блюдо, окруженное Океаном. Впервые о том, что Земля шар, стали говорить в древней Греции примерно 600 лет до н.э. Аристотель [350 лет до н.э.] знал точные размеры Земли. Оценкой размеров Земли занимались арабы, а так же в Египте и Китае. Со времен Аристарха [300 лет до н.э.] ведется дискуссия о суточном вращении Земли. Впервые идея о сплюснутости Земли была высказана географом Страбоном в 5 г. до н.э. Внутреннее устройство Земли всегда интересовало древних ученых. Наблюдения за вулканами и ростом температуры при спуске в шахты, привели их к выводу о том, что недра Земли горячие.

Модель горячей Земли была высказана впервые Рене Декартом в книге "Начала философии". Согласно Декарту, Земля состоит из шести оболочек. Внутри находится огненное ядро, имеющее ту же природу, что и Солнце. Ядро окружено плотным веществом, не встречающимся на Земле, затем следует земная кора, в которой образуются металлы. Поверхностная каменная оболочка частично скрыта водой. Шестая оболочка, это воздух. Землетрясения и вулканизм, по Декарту, обязаны как действию “центрального огня”, так и обрушениям каменной оболочки. Представления Декарта о Земле, состоящей из оболочек и центрального ядра, не утратили актуальности до наших дней.

Исследования Г.Лейбница, изложенные им в сочинении “Протогеа” [1639], принято считать развитием идей Декарта. Земля, по Лейбницу, образовалась из огненного расплава, а затем на её поверхности выделились шлаки. Рельеф Земли, у Лейбница, формировался за счет влияния центрального ядра и обрушений поверхности. Г. Лейбница, как и Р. Декарта, принято считать “плутонистами”.

О внутреннем, огненном ядре писал англичанин Т. Бернет. Земля, по его модели [1689], была горячей и состояла из четырех оболочек. Нетрудно и здесь видеть влияние Декарта. Огненное ядро у Земли предполагали: англичанин В.Уайстон [1789], француз В. Мелле [1748], датчанин Н. Стенон [1669] и другие. Всех их можно считать последователями Декарта - плутонистами. Идею горячей расплавленной Земли поддерживали англичанин Р. Гук [1705], у которого причиной землетрясений и горообразования был подземный огонь. По представлениям итальянца А. Моро [1751], центральная часть Земли огненно-жидкая и она окружена каменной оболочкой. Моро считают плутонистом и прямым предшественником Л. Буха и А. Гумбольта.

*Научный подход.* В 1672 г. Рише обнаружил, что часы, верно отсчитывающие секунды в Париже (49°N), отстают приблизительно на 2.5 мин в сутки, в Кайенне (5° N), где он был вынужден укоротить маятник. Примерно в это же время, один из членов Парижской академии предположил, что на экваторе тело весит меньше, чем на полюсах.

И. Ньютон, услышав об открытии Рише, высоко оценил его и в 1682 г. предпринял попытку установить состояние недр на основании расчетов степени сжатия Земли. Он пришел к выводу (как мы покажем ниже, не совсем правильному) о первоначально расплавленной Земле, на том основании, что она представляет собой фигуру вращения, несколько сплюснутую у полюсов. Работа Ньютона обогатила науку новыми данными как по величине сжатия Земли:  $e = (a_1 - a_3)/a_1$ , так и по теории тяготения (см. рис. 1-1).

В 1690 г. Гюйгенс, оценивая величину  $e$ , получил уравнение поверхности Земли в виде:

$$g(x_1^2 + x_2^2)^{1/2} - 1/2 \Omega^2 x_1^2 = const,$$

Здесь  $g$  - сила тяжести, а  $\Omega$  - частота вращения Земли.

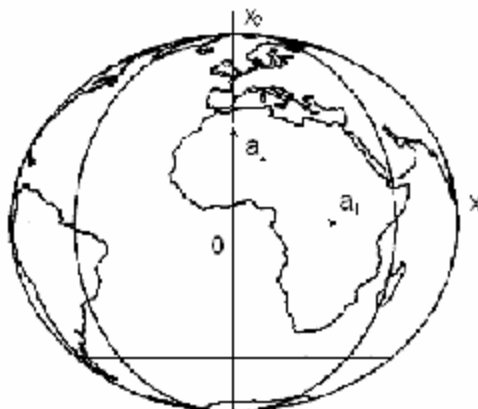


Рис. 1-1. Сжатие Земли (Буллен, 1978).

На основе выведенных французским математиком А. Клеро уравнений, оказалось возможным определить сжатие земного сфероиды. В 1735 г. Клеро, Буге и др. французские исследователи предприняли экспедиции к Северному Полярному кругу в Лапландию и к экватору в Перу, и получили доказательство того, что поверхность Земли имеет сплюснутую форму. В 1755 г. Эйлер впервые дал ясное описание гидростатического равновесия Земли. Заметный вклад в теоретическую геофизику внесли работы английских ученых Стирлинга [1735], Маклорена [1742] и Симпсона [1743]. После публикации в 1743 г. во Франции работы Клеро по теории фигуры Земли, теоретические исследования были продолжены. д'Аламбер [1717-1783], Кулон [1736-1806], Лагранж [1736-1813], Лаплас [1749-1827], Лежандр [1752-1833], Био [1777-1862], Пуассон [1781-1840] и Коши [1789-1857] продолжили теоретические исследования.

Французский естествоиспытатель Ж.Л. Бюфон, немецкий философ И. Кант и французский астроном, математик и физик П.С. Лаплас разделяли идею горячей Земли и связывали ее внутреннее строение с проблемой одновременного происхождения Земли и Солнечной системы. Планеты, в их построениях, либо отделялись от Солнца, либо образовались одновременно с ним из одного и того же вещества. Этим ученых объединяет общность подхода к проблеме и то, что все они были плутонистами.

Отметим работы по внутреннему строению Земли замечательного русского ученого М.В. Ломоносова: “О слоях земных” [1763] и “Слово о рождении металлов от трясения Земли” [1757]. Процессы горообразования и причину землетрясений он видел в том, что “..сила, подымавшая такую тягость, ничему приписана быть не может, как господствующему жару в земной утробе”.

Конец XVIII века в истории геологии проходил под знаком борьбы двух течений - нептоунизма и плутонизма. Нептунисты считали, что особенности поверхности Земли обязаны действию воды, не интересуясь при этом внутренним устройством Земли, внутренними силами и источниками энергии. Надо полагать, к таким выводам можно прийти, изучая осадочные породы и учитывая их практически повсеместное расположение на земной поверхности, а так же то, что 2/3 Земли покрыто Океаном. В противоположность нептоунистам, плутонистов больше интересовало внутреннее устройство Земли, причины образования гор, землетрясений, вулканов и т.п. Основоположником плутонизма, как учения, считают шотландца Д. Геттона, изложившего свои взгляды в книге “Теория Земли” [1788]. В основе его представлений, главенствующая роль отводится действию силы подземного огня. Земля, по Геттону, постепенно эволюционировала, хотя скорость её эволюции, на разных этапах, - существенно различалась.

По мнению плутонистов, наличие огненно-жидких недр Земли приводило к появлению радиальных сил, которые, в свою очередь, воздействовали на каменную оболочку, вызывая появление поднятий и гор. Гипотеза поднятия, таким образом, следовала из плутонических представлений о Земле. Эта гипотеза была развита в трудах немецких геологов Л. Буха и А. Гумбольта. Например, согласно представлениям Гумбольта, земная кора на ранней стадии эволюции Земли была тоньше, её прорывали более мощные, чем теперь, вулканические силы, заливая поверхность Земли расплавленным магматическим веществом.

Основоположник контракционной гипотезы француз Эли-де-Бомон считал, что земная кора окружает расплавленное ядро. В процессе его охлаждения, кора сморщивалась, а огненно-жидкие массы вытекали наружу. Эта гипотеза стала называться контракционной. Её развивал в своей книге “Лик Земли” австрийский геолог Э. Зюсс [1885]. Известным сторонником контракционной гипотезы был немецкий геолог К.А. Циттель [1873]. Земля, по его мнению, перешла из газообразного состояния в огненно-жидкое, а затем покрылась твердой корой. Он считал, что по мере охлаждения и утолщения земной коры, вулканические извержения становились всё реже и реже.

По мере развития науки, представления об огненно-жидком состоянии внутренности Земли усложнялись. В частности, ряд исследователей, и среди них американец Дж. Дэна [1873], считали, что охлаждение и отвердевание Земли идет как с поверхности, так и изнутри - со стороны её ядра, оставляя в средней части вязкий слой. Гипотезу контракции в конце XIX века стали дополнять (или заменять) гипотезой изостатического выравнивания, разработанной практически одновременно Д. Праттом, Д.Эри, Ч. Деттоном.

Представления о внутреннем строении Земли развивали не только геологи. Заметное участие в этой деятельности принимали астрономы и физики, причем, довольно часто их взгляды и выводы оказывались несовместимыми с геологическими исследованиями. Физики, в зависимости от изначально принятых ими моделей образования, эволюции и внутреннего устройства Земли, приходили подчас к противоречивым и взаимно исключающим выводам. Наряду с гипотезой “флюидизма”, т.е. жидкого состояния недр Земли, они принимали гипотезы о их твердом, вязком и даже газообразном состоянии. К флюидистам в свое время относили: физика и астронома Д.Ф. Араго, математика Ж. Фурье, астронома Л. Кордье, физика А. Перре. В частности, Перре пришел к оригинальному выводу относительно связи землетрясений с лунными приливами, которая, по его мнению, должна указывать на жидкое состояние недр Земли. Он выдвинул три закона, названных в его честь законами Перре. Долгое время многие сейсмологи полагали, что эти законы отражают реальную ситуацию. Справедливость законов Перре была подвергнута сомнению С.Ю. Хомутовым (1995), который показал, что четкой зависимости сейсмичности Земли от фазы Луны, - реально не наблюдается.

Надо сказать, что ученые в своих исследованиях внутреннего устройства Земли, приходили к совершенно противоположным выводам относительно того, в каком состоянии находится вещество в центре Земли. Некоторые из них полагали, что земные недра представляют собой твердое вещество. Сторонников этой гипотезы называли “регидистами”. К их числу относят, например, русского профессора А.А. Иовского [1828], немецкого ученого Ф. Мора [1868] и крупнейшего геолога, англичанина Ч.Лайеля, который в противовес теории катастроф, развил учение о медленном и непрерывном изменении земной поверхности под влиянием постоянных геологических факторов. Он отрицал представление о раскаленных недрах Земли, приписывая внутренний источник тепла протеканию химических реакций [1866]. Аналогичных взглядов придерживались французский физик С.Д. Пуассон [1837], английские физики В. Гопкинс [1839] и В.Томсон [1867]. По их мнению, Земля должна быть абсолютно твердой, по крайней мере, на глубину не менее 2000 км.

Английский астроном Д. Дарвин [1880], на основе разработанной им теории приливов, оценки величины нутации и изучения статистики землетрясений, пришел к выводу о вязком, но вместе с тем и твердом, состоянии глубинных масс. Он одним из первых использовал свойства сейсмических волн для исследования внутреннего строения Земли.

*Газообразное ядро.* Ряд ученых полагали, что ядро Земли настолько нагрето, что находится в газообразном и, вместе с тем, в твердом состоянии. По мнению немецкого геофизика Цёпритца [1882], газообразное вещество, из которого состоит земное ядро, имеет такую же плотность, как абсолютно твердое тело, обладая при этом свойствами газов. Вокруг газообразного (и твердого) ядра, по утверждению Цёпритца, располагается оболочка диссоциированных газов, затем переходная оболочка от газов к жидкости, потом расплавленная масса и твердая кора. К сходным представлениям пришли шведский физик С. Аррениус [1900], русские геологи Ф.Ю. Левинсон-Лессинг [1902] и И.Д. Лукашевич [1908].

*Современные представления.* В 1912 г. Гейгер и Гутенберг, анализируя годографы сейсмических волн, решили, что состав мантии плавно (не скачком) меняется с глубиной. В 1914 г. Гутенберг, изучая записи землетрясений с эпицентрными расстояниями более 80° от сейсмостанции Геттинген, обнаружил, что на глубине 2900 км скорость продольных волн уменьшается от 13.5 км/с до 8.5 км/с и что радиус ядра равен приблизительно 3500 км. В 1936 г. датчанка-сейсмолог Ингре Леман выдвинула предположение, что ядро состоит из двух частей: внешней и внутренней, и что скорость сейсмических волн во внутреннем ядре больше, чем во внешнем.

Гутенберг и Рихтер сделали попытку определить радиус границы между этими двумя частями ядра [1938] и нашли, что переход от внешнего ядра к внутреннему начинается на расстоянии примерно 1500 км от центра Земли и охватывает зону протяженностью около 300 км. Джеффрис (1960) в 1939 году установил, что в слое между внешним и внутренним ядром скорость волн уменьшается и что в подошве этого слоя, относящегося к внешнему ядру, на границе с внутренним ядром имеет место разрыв скорости (рис. 1-2). В 1957 г. Гутенберг, анализируя прохождение волн различной длины волны через переходную зону, показал, что ядро внутреннее и внешнее состоит из одного и того же вещества, находящегося в различных фазах. К. Буллен (1978) предложил выделить и обозначить оболочки Земли [1953], используя границы отражений сейсмических волн. Эта классификация существует и в наше время (см. рис. 1-2).

Вопрос о том, твердое ли внутреннее G-ядро, до недавних пор оставался не ясным. Единственная до недавнего времени публикация о регистрации РКЖР-волн, проходящих через внутреннее ядро, и показывающих его жесткость (Julian et al., 1972), ни разу не была подтверждена и поэтому в течение четверти века оставалась сомнительной. Несмотря на эти неудачи, принято считать, что внутреннее ядро - твердое. Основным аргументом в пользу такого вывода является попытка объяснить увеличение скорости Р-волн на границе внутреннего ядра. Как известно, внешнее ядро жидкое, скорость распространения Р-волн в нем:  $v_p = (K/r)^{1/2}$ . Плотность внутреннего ядра не может быть меньше чем внешнего, модуль сжатия  $K$  тоже не может увеличиться. Так как принято считать G-ядро состоящим из кристаллического железа, а скорость Р-волн:  $v_p = [(K + 4/3m)/r]^{1/2}$ , где  $m$  модуль сдвига, то этот подход позволял оценить скорость S-волн во внутреннем ядре ( $v_s = 3.56$  км/с). Знание скоростей волн позволяет оценить величины плотности земных оболочек. Заметим, что .. “наши знания о составе нижних слоев мантии и внутреннего ядра основываются главным образом на данных об их плотности” (Браун и Массет, 1984, стр. 52).

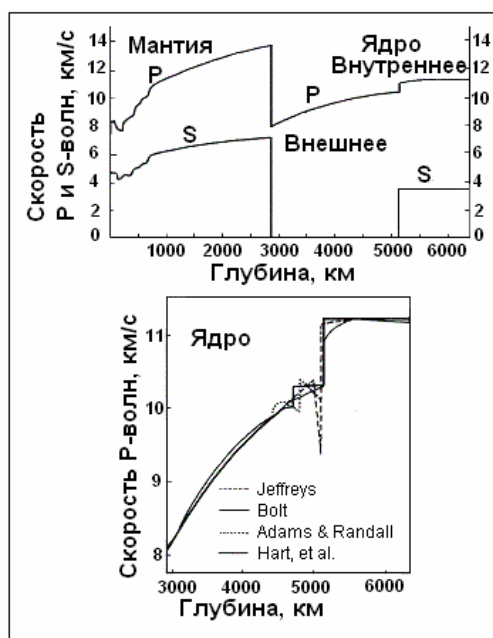


Рис. 1-2. Распределение скоростей сейсмических волн (Браун, Массет, 1984).

Совсем недавно ситуация резко изменилась. Был найден, наконец, “святой грааль сейсмологии” (Tromp, 1995; Кузнецов, 1997): т.е. экспериментально обнаружена волна, проходящая через внутреннее ядро, как сдвиговая (РКЖКР). Авторы этой работы (Okal, Cansi, 1998) идентифицировали РКЖКР-волну, распространяющуюся через внутреннее ядро Земли с периодом колебаний 2-10 секунд, возникшую в результате глубокофокусного землетрясения Flores Sea 1996 года. Эта РКЖКР-волна была зарегистрирована на 8 станциях Французской сейсмической сети. Полученный результат свидетельствует о наличии жесткости у внутреннего ядра, которая ранее была выведена только из рассмотренных нами выше косвенных свидетельств. Авторы оценили скорость распространения РКЖКР-волн, которая оказалась равной  $v_s = 3.65$  км/с. Кроме этого, они объяснили результат, полученный группой (Julian et al., 1972) по регистрации ими волны со скоростью 2.95 км/с. Оказалось, что это было поверхностное отражение рРКЖКР-волны. Французы считают, что большая величина коэффициента Пуассона (0.44) может быть объяснена нормальной кристаллической структурой внутреннего ядра без того, чтобы привлекать идею частичного плавления, якобы возникающего из-за громадного давления в центре Земли.

Одним из последних достижений в области изучения внутреннего ядра явилось обнаружение на его границе цилиндрической анизотропии и супервращения. Сейсмическая волна, касающаяся внутреннего ядра в области экватора, приходит на 2-4 с раньше, чем аналогичная волна, касающаяся внутреннего ядра в области полюсов. Аналогичные результаты получены при анализе спектров собственных колебаний внутреннего ядра, после сильного землетрясения.

*Железное ядро.* В любом, даже самом кратком обзоре об эволюции представлений, касающихся внутреннего строения Земли, нельзя обойти вниманием спор ученых, который не окончился ещё и в наши дни, это спор о химическом составе ядра Земли, спор о том, железное оно или не железное.

Идея железного ядра имеет очень давнюю историю. С момента открытия земного магнетизма и магнетизма железа, это сопоставление представлялось очевидным. Одним из первых научных трактатов на эту тему, по-видимому, была книга В.Гильберта “Земля - большой магнит”, изданная в Англии в 1600 г. Значительно позже немецкий геолог Г. Штеффенс [1801] пришел к аналогичному выводу на основе магнитных наблюдений. Идея, связывающая магнетизм Земли и магнетизм железа, развивалась немцами К.

Шмидером [1802] и К. Гоффом [1824]. С другой стороны, учеными высказывалась и вторая предпосылка: плотность внутренних слоев Земли (так же как и железа) значительно превосходит плотность земной коры, которая, в свою очередь, существенно ниже средней плотности Земли. Третья предпосылка состоит в следующем. Русский ученый Э.Ф. Хладни [1794], французские геологи А. Добре [1866] и С. Менье [1896], а так же известный русский химик Д.И. Менделеев [1877], на основании аналогии химического состава Земли и метеоритов, пришли к выводу о том, что ядро Земли, так же как и метеориты, состоит из никелистого железа. Впоследствии это предположение было развито в научную гипотезу, ставшую господствующей с начала XX века и до наших дней. По поводу связи химического состава ядра Земли и метеоритов, имеет смысл привести слова Б. Гутенберга: “Преобладающее мнение, что главным элементом в ядре является железо, иногда основывается на его обилии в метеоритах. Однако здесь надо опасаться порочного круга: 1) метеориты, которые первоначально были частями планеты, часто содержат железо, и поэтому можно думать, что оно является главной компонентой Земли; 2) поскольку средний состав всех известных нам метеоритов приблизительно соответствует составу Земли (включая железное ядро), то можно считать, что они прежде являлись частями планеты” (Гутенберг, 1963, стр. 141).

*Критика идеи железного ядра.* Однако не всегда, и не всех устраивала эта гипотеза. Её первую предпосылку опровергли после того, как было оценено распределение температуры по земному радиусу, с одной стороны, и определена температура Кюри магнитных материалов, в частности железа, с другой. В качестве альтернативы второй предпосылки, В.Н.Лодочников предлагал свою модель, согласно которой увеличение плотности пород с глубиной возможно за счет изменения их структуры (например, удельный вес минералов, состоящих из углерода: антрацита - 1.7; графита - 2.25; алмаза - 3.5). Возражением против довода о сходстве состава Земли с составом метеоритов явилась оригинальная гипотеза Лодочникова [1939] о происхождении метеоритов. По его мнению, метеориты, это продукты извержения земных вулканов (сейчас можно было бы добавить: и не только земных, а вулканов других планет и их спутников). Действительно, если метеориты не являются обломками внутренних частей какой-то планеты, то нельзя проводить аналогию между их составом и составом ядра Земли.

С похожей гипотезой относительно изменения плотности вещества с глубиной выступил финский ученый В. Рамзей [1948]. Он утверждал, что ядро состоит из вещества, слагающего мантию, но находящегося в металлических фазах, и что прежде чем атомы главных элементов (кислорода, кремния, магния и железа) совершенно разрушатся, могут существовать другие фазовые переходы. Венгр Эдьед [1957] предложил гипотезу, отличную от гипотезы Рамзея. Он так же полагал, что Земля “состоит из трех фаз одной и той же однородной ультраосновной силикатной массы. Во внутреннем ядре структура материала подобна решетке, которая не подвержена влиянию давления внутри Земли. Состояние вещества, слагающего внешнее ядро, соответствует следующей фазе сверхвысокого давления, где жесткость пренебрежимо мала по сравнению с другими упругими модулями, так что наблюдаются только продольные волны” (Гутенберг, 1963, стр. 142). Интересную гипотезу рассмотрели Кун и Ритман [1941], в которой они предположили, что в ядре содержатся заметные количества водорода, оставшегося от первичной материи, из которой образовалась Земля.

Можно привести общепринятые возражения относительно всех этих гипотез. В настоящее время предпочтение отдается гипотезе железного ядра. Согласно этой гипотезе, внешнее ядро состоит из расплавленного железа, а внутреннее - из твердого. Б. Гутенберг еще 40 лет назад написал слова, которые не потеряли своей актуальности и в наше время: “Будущие наблюдения и теоретические исследования вещества, составляющего ядро, при давлениях 1.5-3.5 млн. атм. и температурах в тысячи градусов Цельсия, *могут привести к изменению прежних взглядов*” (Гутенберг, 1963, стр. 142, подчеркнуто мной).

Какие же возражения можно привести против идеи железного ядра? Перечислим некоторые из них.

1. Плотность внутреннего (G, по Буллину) ядра ниже, чем плотность железа при условиях, существующих в области внутреннего ядра.
2. Скорость S-волн в G-ядре очень мала и, если бы там было железо, то она должна бы быть около 6 км/с.
3. Скорость P-волн практически не возрастает к центру Земли (см. рис. 1-2), оставаясь постоянной вдоль радиуса ( $v_p^2 = dp/dr$ ), что не характерно для конденсированного вещества, а соответствует состоянию сжимаемого газа, т.к. скорость звука в газе практически не зависит от  $p$  и  $r$ , которые однозначно связаны друг с другом ( $p = rkT/mn$ ,  $m$  - молекулярный вес,  $m$  = масса протона).
4. Практическое совпадение измеренной величины скорости S-волн с вычисленной по модели Земли и уравнению Адамса и Вильямсона означает, что внешнее (E) ядро и внутреннее (G), состоят из одного вещества. Однако вязкость вещества внешнего ядра, оцененная по астрономическим данным, значительно (на несколько порядков) больше, чем измеренная в лабораторных условиях вязкость расплавленного железа.
5. Мы уже отмечали, что внутреннее ядро не может быть кристаллической фазой вещества внешнего ядра, т.к. такой экзотермический процесс кристаллизации без отвода тепла из центра Земли термодинамически не возможен.
6. Земля открытая диссипативная, самоорганизующаяся структура, включающая два фазовых перехода: конденсацию и кристаллизацию. В системе, на фазовых переходах происходит постоянный рост энтропии. Энтропия центральной части Земли, где, согласно нашей модели, находится вещество в газообразном, плазменном состоянии, должна быть самой большой, и она должна скачком уменьшаться в области фазовых переходов, по мере увеличения радиуса Земли при перемещении от её центра к периферии. Этому очевидному правилу из необратимой термодинамики противоречит модель кристаллизации внутреннего ядра внутри расплавленного железного внешнего ядра.
7. Чтобы железо было бы твердым, необходимо, чтобы температура внутреннего ядра была бы ниже, чем температура внешнего, что представляется абсурдным даже разработчикам модели холодной Земли. Поэтому в принятой холодной модели используется адиабата Пуассона. Это неверно, т.к. адиабата Пуассона характеризует только идеальный газ, участвующий в бездиссипативных процессах, что не может быть применено для Земли. В оценках температурного хода в недрах Земли необходимо пользоваться адиабатой Гюгонио, и т.п.

*Магнитное поле.* Гаусс более 150 лет тому назад доказал, что источник генерации геомагнитного поля находится в её недрах. После того как обнаружили, что точка Кюри для железа достигается в нижних слоях земной коры, потребовалась другая гипотеза геомагнетизма. Одним из первых был Эльзассер, который сначала [1939] предложил идею генерации геомагнитного поля за счет термоэлектрических токов в ядре, а позже [1947] он высказал предположение о том, что источником магнитного поля являются медленные движения в земном ядре, которые могут возбуждать электрические токи, подобно тому, как это происходит в динамо-машине. Независимо от Эльзассера, с аналогичной гипотезой выступил известный физик теоретик из России Я.Б. Френкель [1948]. Идею магнитного динамо развивали Буллард [1948], Ранкорн [1954], Вестин [1954] и др. Эта идея, вытеснив все альтернативные, завоевала абсолютное преимущество в физике Земли. Однако, несмотря на победное шествие в течение 50 последних лет, ясного понимания процессов генерации геомагнитного поля нет до сих пор. В последнее время все чаще и чаще у различных специалистов возникают мысли о несостоятельности этой идеи. А ведь проблема генерации геомагнитного поля поставлена под «номером один» в физике Земли

и составляет, по мнению А.Эйнштейна, одну из трех главных задач современной физики (Буссе, 1984).

*Тектонические гипотезы.* С начала XX века появились различные тектонические гипотезы, которые обычно сосредоточивали внимание исследователя на какой-либо одной стороне развития Земли. Однако не нужно забывать, что любая “разумная” гипотеза, охватывающая всего одну сторону многоликой Земли, основывалась на определенных представлениях о её образовании, эволюции и внутреннем строении. Поэтому и тектонические гипотезы вносили определенный вклад в науку о строении Земли.

Выше мы упоминали о контракционной гипотезе, которая в начале XX века стала терять свой приоритет. Это было вызвано тем обстоятельством, что представления о сжимаемости земной коры, расположенной вокруг огненно-жидкого ядра, оказались несовместимыми с железным ядром, радиоактивным разогревом и сейсмическими данными. В это время возникла идея перемещения, дрейфа материков, сначала у англичанина Ф.Тейлора [1910], а затем эта гипотеза была развита А. Вегенером [1915], который основывался на совпадении очертаний береговых линий Африки и Южной Америки, резком различии по высоте океанов и материков и концепции изостазии. Теорию спрединга морского дна предложил А. Холмс в 1929 г., а в 1939 г. Д. Гривс ещё ближе подошел к главной идее тектоники плит. Он утверждал, что горные сооружения и сейсмические пояса, окаймляющие Тихий океан, создаются конвективными течениями, которые поднимаются в центре бассейна и опускаются на его окраине. Триумф плитной тектоники начался после публикации в 1962 г. статьи Г. Хесса об истории океанических бассейнов, посвященной спредингу морского дна. Надо отдать должное авторам книги по тектонике плит, которые считают, что “тектоника плит не закрыла науки о Земле из-за того, что все проблемы решены. Наоборот, она дала надежную основу для исследований по многим новым направлениям” (Кокс, Харт, 1989. стр. 15).

*Гипотеза расширяющейся Земли.* К тектоническим гипотезам относится и гипотеза расширения Земли. Как будет следовать из текста этой книги, модель горячей Земли в геологическом аспекте адекватна модели расширяющейся и пульсирующей Земли. Эта идея была высказана ещё в 1889 г. русским ученым И.О. Янковским. Модель в современном виде берет начало от работ О.С. Хильденберга [1933]. Идея расширяющейся Земли нашла наиболее полное и законченное развитие в трудах австралийского геолога С. Кери (Carey, 1976). В развитие этой идеи существенный вклад внесли геологи Б. Линденман [1929], М. Боголепов [1922], Д.К.Е. Халм [1935], Л. Эдьед [1956], Х. Оуэн [1973] и др. Однако все авторы, и в том числе С. Кери, не могли найти причин, согласно которым Земля может расширяться. Заканчивая свою замечательную книгу, Кери написал: “Я знаю, что Земля расширяется, но я не знаю почему”. Разные авторы задумывались над этой проблемой и многие из них приходили в своих предположениях к весьма экзотическим (и неверным) идеям. Возможные аспекты физики расширения Земли рассмотрены В.Ф. Блиновым (1984). Он полагал, что все схемы расширения и возможные причины можно рассмотреть применительно к формуле гравитационного ускорения в центрально-симметричном поле тяготения:

$$g = GM/R^2.$$

Блинов полагает, что параметры в этой формуле связаны с изменением земного радиуса  $R$ . Он выделяет три возможных причины изменения  $R$ : Первая связана с увеличением массы со временем. Это направление основано Янковским, оно развивалось Хильденбергом, И.В.Кирилловым, В.Б.Нейманом, самим Блиновым и др. Этому направлению отдавал предпочтение и Кери. В этой модели, Земля аккумулирует энергию (возможно, энергию гравитационных волн), которая преобразуется в её недрах в массу, посредством реализации выражения из специальной теории относительности Эйнштейна:  $E = mc^2$ . Эта идея пришла по душе многим геологам, в частности, на кафедре геофизики МГУ. По



поводу этой идеи мне пришлось выступить с критикой (Кузнецов, 1996). Второе направление связано с уменьшением гравитационной постоянной со временем. В свое время с этой идеей выступил известный физик, Нобелевский лауреат П. Дирак. Это направление было поддержано Л. Эдьеом, Р. Дике, Д.Д. Иваненко, М.У. Сагитовым и др. Третье направление представлено теми работами, в которых увеличение радиуса происходит за счет разуплотнения вещества. Как будет ясно в дальнейшем, это направление является базовым и в нашей модели горячей Земли. Эта идея наименее экзотическая из трех, перечисленных нами.

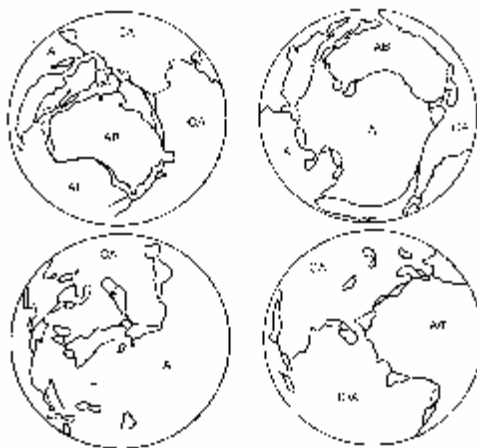


Рис. 1-3. Расположение материков на сфере внешнего ядра Земли (Гораи, 1984).

Надо заметить, что практически все разработчики модели расширяющейся Земли стремились “уложить” континенты один к другому таким образом, чтобы не оставалось “зазора” между ними. Рис. 1-3 демонстрирует один из таких вариантов, предложенный в книге Гораи (1984). Наибольшего успеха в этом деле достиг немецкий инженер из Потсдама К. Вогель, создавший прозрачный глобус, на внешней поверхности которого были расположены материки, а внутри размещался еще один шар, меньшего диаметра, на котором материки занимали положения, примерно так же, как это изображено на рис. 1-3. Профессором Британского музея натуральной истории Х.Оуэном был создан атлас, в котором представлено расположение материков в различные эпохи и т.п. В каждой из моделей расширения авторы придерживались некоей общей схемы, изображенной на рис. 1-4 и заимствованной мной из книги Кери. Этот рисунок отражает тот факт, что материки в процессе расширения Земли не претерпели существенных изменений, а само расширение обязано образованию океанов, заполнивших пространство между ними.

Мне кажется, что ни один из разработчиков идеи расширяющейся Земли не был полностью удовлетворен своими моделями. Дело в том, что современные наблюдения за дрейфом материков и плит, а также многочисленные тензометрические измерения в шахтах показывают, что Земля в настоящее время скорее сжимается, чем расширяется. По оценке П.Н.Кропоткина (1984), только 5% современной Земли подвержено растяжению в зонах спрединга, остальные 95% находятся под влиянием сжимающих усилий. Все геологи-практики неоднократно фиксировали, что на Земле в прошлом имели место, как процессы глобального растяжения земной коры, так и её сжатия. Таким образом, идея контракции-сжатия и идея расширения Земли требовали объединения.

Пульсирующая гипотеза возникла, как попытка примирить наблюдаемые на поверхности Земли следствия процессов сжатия и расширения. Она была высказана в тридцатых годах американскими геологами В.Бухером и А.В.Грабау и детально разработана русскими академиками М.А.Усовым, В.А.Обручевым и др. Тем не менее, идеи, основанные на модели горячей Земли, по ряду причин не получили достойного

развития и, более того, были отвергнуты. Абсолютное и бесспорное преимущество получила модель холодной Земли.



Рис. 1-4. Модель расширения Земли по Кэри (Fig 25, с. 48, Carey, 1976)

## I. 2. Почему Земля холодная?

К началу второй половины нашего века, в связи с успехами сейсмологии был построен скоростной разрез Земли. Выяснилось, что земная мантия твердая на глубину почти 3 тыс. км. Возникло непреодолимое в то время противоречие: каким образом первоначально расплавленная Земля могла остыть и кристаллизироваться на такую большую глубину за столь “короткое” время ее существования (4.5 млрд. лет). По оценкам, выполненным с учетом величины теплопроводности земного вещества, за это время (которое было оценено благодаря развитию методов “радиоактивных часов”), земное вещество могло “успеть” кристаллизироваться на глубину, никак не большую чем 800 км. Эта загадка оказалась неразрешимой, что практически свернуло исследования модели горячей Земли.

Другой, не менее существенный аргумент против горячей Земли был сформулирован В.А.Магницким (1965). Магницкий оценил величину гравитационной энергии Земли. Затем, поделив энергию на приемлемое значение теплоемкости, он оценил начальную температуру вещества Земли, равную  $\approx 30\,000^\circ\text{K}$ . Магницкий писал: “однако такая оценка бессмысленна, т.к. разогрев Земли целиком определяется принятой схемой образования планеты из протопланетного облака, поскольку при этом возникают огромные потери тепла через излучение” (Магницкий, 1965. стр. 41).

Повторим еще раз, что в течение последних примерно 50 лет в науках о Земле безраздельно господствует модель “холодной” Земли. В значительной степени её преимущество (над “горячей” моделью) обязано работам О.Ю. Шмидта. В 1952 г. Шмидт писал: «Идея первично горячей Земли была внесена в геологию не столько по геологическим, сколько по космогоническим соображениям, на что, в частности, давно указывал В.И. Вернадский. Сейчас среди геологов начинается отход от этой позиции. Те же из геологов и геофизиков, которые продолжают держаться за отмирающие представления, теряют ориентировку и заходят в тупик, как, например, Б. Гутенберг, в 1952 г. писавший, что в 1939 г. внутреннее строение Земли представлялось более ясным, чем сейчас» (Шмидт, 1955).

Теория образования Земли и планет, развитая Шмидтом, его учениками и последователями, базировалась на ряде посылок:

- столкновения частиц от пылинок до тел астероидных размеров сопровождается рассеянием энергии при переходе механической энергии в тепловую,
- протопланетное облако было существенно неоднородным, что и определило различный химический состав планет,
- тепловая энергия планет определяется наличием радиоактивности,

- после радиоактивного разогрева планеты и после того, как её недра стали пластичными, началось перемещение вещества – опускание тяжелых глыб и всплывание легких.

Скорость роста массы планеты, по Шмидту, дается выражением:

$$dM/dt = \pi R_E^2 r v (-R_E^2 s),$$

где  $r$  и  $s$  - соответственно объемная и поверхностная плотность участвующего в аккреции вещества,  $v$  – средняя скорость планетезималей относительно растущей планеты,  $R_E$  её «текущий» радиус, который увеличивается с уменьшением величины  $v$ , согласно формуле, приведенной Рингвудом (1982):

$$R_E^2 = R^2(1 + 2GM/Rv^2) = R(1 + v_e^2/v^2),$$

где  $R$  – геометрический радиус растущей планеты,  $v_e$  – скорость “ускользания” вещества с её поверхности (1-я космическая скорость).

Главный постулат модели холодной Земли, это её железное ядро. Все другие модели были отменены в ходе развития физики Земли, как науки. Вопрос о том, железное оно, или нет, не подвергается сомнению. Речь может идти только о том, какие могут быть примеси и в каком количестве, например, никель, сера или кислород. Внутри жидкого железного ядра находится твердое, кристаллическое и то же железное. Эта аксиома определяет всю «термодинамику» холодной Земли. Очевидны т.н. «реперные» точки на температурной зависимости. Внутреннего источника энергии быть не должно: ведь Земля холодная. Для объяснения теплового потока предлагается учитывать радиоактивность гранитов. Материки и плиты раздвигаются и источник разрастания океанической коры – спрединг, обнаружен. Самое простое решение, это предположить наличие глобальной конвекции. Несмотря на совершенно очевидный вывод об отсутствии и даже о невозможности такой конвекции в мантии, плитная тектоника, как парадигма продолжает завоёвывать научные геологические школы во всех странах мира. В этой проблеме особое место занимает субдукция, где якобы плита должна «утонуть», каким-то образом «просочиться» сквозь нижнюю мантию, жесткость которой выше чем у стали и, затем, - «всплыть» в зоне действия спрединга. Сама же мантия при этом остается строго стратифицированной, а имеющиеся на Земле гравитационные аномалии на два порядка меньше, чем те, которые должны были бы получаться, если такая конвекция имела бы место.

Одна из главных проблем физики Земли, это проблема генерации её магнитного поля. Очевидно, что если эта задача будет понята, то все остальные вопросы должны быть решены автоматически. Ситуация с этой проблемой очень близка к положению с холодной Землей. Сегодня «в законодательном порядке» определено, что генерация геомагнитного поля обязана действию магнитогидродинамического динамо во внешнем ядре. Этот тезис не дискутируется, обсуждается только, какое динамо:  $\alpha$ -,  $\Omega$ -, или  $\alpha\Omega$ -имеют предпочтение. Такая ситуация с «проблемой № 1» физики Земли продолжается более 50 лет. В течение этого времени модель динамо не смогла объяснить ни одной из особенностей геомагнетизма.

Наконец, Земля образовалась 4.5 млрд. лет назад такой, согласно холодной модели, какая она сейчас. И эта идея не подвергается сомнению, несмотря на то, что геологами фиксируются тектонические, магматические и прочие циклы, трансгрессии и регрессии, глобальные вымирания, оледенения и потопы, смена полярности геомагнитного поля, суперхроны и суперплюмы и много других различных глобальных и повторяющихся явлений. Как всё это можно объяснить, если на Земле нет источника энергии, способного обеспечить протекание всех этих грандиозных процессов. Земля, согласно холодной модели, – закрытая система, в которой нет причин для эволюции и саморазвития. Согласно модели “холодной” Земли, она находится в равновесном состоянии, и её термодинамические параметры – суть константы. Однако линейная термодинамика необратимых процессов заставляет нас признать, что циклические колебания не могут происходить относительно равновесного состояния. Это означает, что холодная модель в

принципе не способна найти объяснение большинству наблюдаемых глобальных процессов динамики геосфер.

### 1.3. В чем ошибочна холодная модель и нужна ли новая физика Земли?

В первом приближении модель холодной Земли убедительна и непротиворечива. Она принята научным сообществом и опубликована во всех учебниках, даже школьных. На все поставленные нами выше вопросы найдены ответы. Если не разбираться в сути этих ответов, то, казалось бы, нет проблем и нет причин к поиску других, альтернативных вариантов. В частности, нет причин возвращаться к модели горячей Земли, которая была «закрыта» 50 лет назад.

Однако попытаемся ответить на вопрос, поставленный в заголовок этого параграфа. О некоторых проблемах модели холодной Земли мы уже упоминали выше. Что можно добавить? Начнем с того, что эта модель представляет собой набор разрозненных объяснений наблюдаемых явлений. В преобладающем большинстве случаев, для объяснения того или иного факта, используется каждый раз новый физический принцип, подчас несовместимый с другим принципом, привлеченным для объяснения другого явления, хотя объясняемые ими факты и явления из истории Земли, явно связаны. Приведем несколько примеров.

1.3.1. Продолжим критику холодной Земли с модели её образования. Распространим теорию Шмидта на другие планеты. Будем придерживаться нити рассуждений Рингвуда (1982): «Эта теория приводит к заключению, что аккреция Земли (на 98 %) происходила на протяжении около  $10^8$  лет, и это значение широко используется в литературе. Однако согласно этой теории время аккреции Урана и Нептуна оказывается порядка  $10^{11}$  лет, т.е. более чем 10 раз больше возраста Солнечной системы. Попытки обойти эти трудности, - неубедительны. Кроме того, возникает сложность и с оценкой времени аккреции Марса, для которого оно составляет  $2.6 \times 10^9$  лет. Подсчет кратеров, хотя и не очень точный метод, указывает на гораздо более древнюю его поверхность. Если принять столь сравнительно молодой возраст завершения аккреции Марса, то приходится предполагать сильную бомбардировку Земли и Луны вплоть до  $2 \times 10^9$  лет тому назад. Однако изучение Луны показывает, что период частой бомбардировки закончился, по крайней мере, около  $3.9 \times 10^9$  лет тому назад» (с. 95). Как видно из этой цитаты, даже сторонники и разработчики холодной модели сами сомневаются в правомерности модели её образования путем слипания холодных частиц.

Более того, как было недавно обнаружено с помощью космических телескопов Хаббл и Спитцер, процесс образования планет у «молодых» звезд возрастом  $\sim 100$  тыс. лет уже закончился, у очень «старых» звезд, с возрастом больше солнечного - ещё существуют пылевые кольца

1.3.2. Считается, что тепловой поток Земли обязан наличию радиоактивных элементов, которые в основном сосредоточены в гранитах материковой коры. В базальтах, покрывающих морское дно и в значительной мере соответствующих химическому составу вещества мантии, их почти нет. В связи с этим возникают вопросы. Почему тепловой поток на материках и океанах практически одинаков? Почему, если источник тепла находится на поверхности Земли, чем глубже, тем теплее? Почему раньше Земля была значительно горячее, и около 4-х миллиардов лет тому назад, по выражению некоторых геологов, океаны кипели? Если источник тепла – радиоактивность, то температура Земли со временем должна возрастать, тогда почему она явно уменьшается?

Высказанные рядом геологов предположения о том, что Земля, за счет радиоактивного нагрева, - расплавилась, а потом уже развивалась как - горячая, тоже не выдерживает критики. Дело в том, что этом случае действует тот же самый аргумент, из-

за которого отклонили модель горячей Земли: мантия, за 4.5 млрд. лет эволюции Земли, не может кристаллизироваться на всю её толщину.

1.3.3. Общепринятое значение скорости РКЖР-волны  $v_s = 3.56$  км/с практически совпадает с его измеренной величиной ( $v_s = 3.65$  км/с). По-видимому, имеет смысл остановиться на том, как была оценена величина этой скорости до её прямого измерения. Воспользуемся уравнением Адамса и Вильямсона. Оно следует из вполне разумных предположений об однородности химического состава Земли и допущении, что гидростатическое давление выражается формулой:

$$dp = -rgdr,$$

где  $r$  и  $g$  плотность и ускорение силы тяжести при радиусе  $r$ . Модуль сжатия  $K$  представляет собой отношение приращения давления к величине возникшего при этом сжатия (при условии, что количество тепла и масса вещества не изменяются), т.е.

$$K = r dp/dr.$$

Учитывая, что  $v_s^2 = m/r$ ;  $K/r = v_p^2 - (4/3)v_s^2 = f$ , здесь  $f$  - сейсмический параметр, получаем:

$$dr/dr = -rg/f.$$

Это и есть известное в физике Земли уравнение Адамса и Вильямсона. Решение этого уравнения совместно с  $g = Gm/r^2$ , если известен сейсмический параметр, находит распределение плотности по радиусу Земли ( $G$  – гравитационная постоянная).

Известно, что на границе внутреннего ядра скорость Р-волн возрастает примерно на 6 %. Считается, что внешнее ядро жидкое и  $m = 0$ , а  $v_p^2 = K/r$ . Невозможно представить, чтобы плотность уменьшалась с увеличением глубины. Имеется ряд соображений, что модуль сжатия  $K$  не может быть настолько выше, чтобы обеспечить скачек скорости Р-волны. Ситуация легко разрешается, если предположить, что внутреннее ядро, в противоположность внешнему, имеет конечное значение модуля сдвига  $m$ . Подставляем  $m$  в выражение для скорости Р-волн и определяем его значение, а, заодно, и величину  $v_s$  скорости РКЖР-волн.

Факт практического совпадения вычисленной и измеренной величин скорости сдвиговых волн подтверждает важный вывод, следующий из уравнения Адамса и Вильямсона об однородности состава ядра внешнего и внутреннего. И, скорее всего, **это не железо**. В пользу такого заключения говорит очень высокое значение коэффициента Пуассона: он намного больше, чем у железа ( $\sigma = 0.28$ ). (К примеру,  $\sigma$  SiO<sub>2</sub> = 0.18; льда = 0.35; резины = 0.47; жидкости = 0.5). Если бы во внутреннем ядре находилось железо ( $v_p = 11.2$  км/с), то скорость S-волн должна бы быть около 6 км/с.

Кроме этого, оцененные величины вязкости вещества внешнего ядра значительно превышают вязкость расплава железа. Этот факт так же не находит объяснения в модели холодной Земли.

1.3.4. Принято считать, что внешнее ядро Земли жидкое, а мантия и внутреннее ядро – находятся в кристаллическом состоянии. Известно, что энтропия вещества, находящегося в газообразном состоянии максимальна, она меньше у вещества в конденсированном состоянии и ещё меньше, если оно кристаллизовалось. Следовательно, энтропия вещества в центре Земли меньше, чем на периферии, во внешнем ядре, а затем, в мантии она снова уменьшается. Для равновесной системы, а именно такой должна быть Земля после медленного накопления своего вещества в процессе образования, эта ситуация неприемлема. Здесь явно нарушаются теорема Гиббса и Н-теорема Больцмана, согласно которым в системе должно наблюдаться естественное изменение энтропии, и её производство в процессе эволюции такой диссипативной структуры как Земля.

Для обсуждения модели Земли с позиции второго начала термодинамики, запишем основное термодинамическое равенство:

$$dE = T dS - p dV,$$

откуда следует выражение для энтропии системы:

$$S = 1/T \int dE + 1/T \int p dV .$$

Охлаждение системы, и следующие за этим конденсация и кристаллизация вещества, приводят к росту энтропии. К примеру, производство энтропии при кристаллизации вещества из пересыщенного раствора, согласно (Мартюшев, Селезнев, 2000), выражается формулой:

$$dS/dt = -j \tilde{N}m$$

где  $j$  – поток кристаллизующегося компонента,  $\tilde{N}m$  – градиент химического потенциала.

В процессе эволюции диссипативной, открытой, самоорганизующейся системы, такой как Земля, происходит увеличение энтропии ( $S$ ). Как известно, Земля состоит из внутреннего ( $G$ ), внешнего ( $E$ ) ядра и мантии ( $D$ ). Энтропия Земли складывается из суммы энтропий её компонент:  $S = S_G + S_E + S_D$ . Распределение температуры по радиусу Земли очевидно:  $T_G > T_E > T_D$ . Именно таким должно быть и распределение энтропий:  $S_G > S_E > S_D$ . (Несмотря на то, что  $S \sim 1/T$ , а связанная энергия  $TS \sim U$ , т.е.  $S \sim U$ , где  $U$  – теплота фазового перехода). Следствием этого распределения должно быть газообразное (плазменное) состояние вещества внутреннего ядра. Представляется логичной идея строения Земли: мантия – кристаллическое вещество, внешнее ядро – жидкость, а внутреннее ядро – газ. Такая система может эволюционировать посредством “работы” двух фазовых переходов первого рода: “конденсация-испарение” ( $U_k$ ) – на границе внутреннего ядра и “кристаллизация-плавление” ( $U_n$ ) – на границе ядро-мантия. На каждом таком фазовом переходе происходит резкое уменьшение энтропии ( $U_k > U_n$ ), если “смотреть” из центра Земли к её периферии. Совсем не так выглядит распределение энтропии в случае т.н. модели холодной Земли, согласно которой внешнее ядро представляет собой расплав, а внутреннее ядро и мантия – кристаллическое состояние:  $S_G < S_E > S_D$ , что невозможно.

1.3.5. Рассмотрим, может ли вообще реализоваться процесс кристаллизации железа внутри расплавленного железного шара. В модели холодной Земли утверждается, что в однородном жидком сферическом ядре происходит затвердевание, кристаллизация его центральной части. Считается, что ядро Земли, в основном, железное, однако имеется примесь (Fe-X), концентрация которой ( $\zeta$ ) может меняться. Будем придерживаться канвы рассуждений, изложенных в (Fearn, 1989). В модели кристаллизации внутреннего ядра принимается несколько вполне разумных предположений. Например, таких как, 1) температура возрастает с глубиной (и величиной давления)  $T = T(p)$ ; 2) температура жидкости  $T_L$  зависит от давления и концентрации  $\zeta$  примеси X:  $T_L(p, \zeta)$ ; 3) градиент  $dT_L/dp$  не может быть круче, чем адиабатический  $dT_A/dp$ ; 4) концентрация примеси в твердом внутреннем ядре меньше, чем в жидком внешнем; 5) в центре ядра температура всегда выше, чем температура кристаллизации:  $T > T_L$ ; 6) изменение концентрации примеси приводит к росту внутреннего ядра:  $I = (\zeta - \zeta_s) dM/dt$ , здесь  $\zeta_s$  – концентрация примеси во внутреннем ядре (эта величина равна нулю, если внутреннее ядро состоит из чистого железа); 7) на границе внутреннего ядра:

$$dT_L/dp = (\partial T_L / \partial p)_\zeta + (\partial T_L / \partial \zeta)_p d\zeta/dp.$$

Температура  $T_L$  уменьшается, когда  $\zeta$  возрастает так, что  $(\partial T_L / \partial \zeta)_p < 0$ . Так как  $dM/dt$  и  $d\zeta/dp$  возрастают,  $dT_L/dp$  уменьшается. В результате, на границе внутреннего ядра может возникнуть ситуация:

$$dT_L/dp < dT/dp,$$

т.е. температура будет ниже, чем температура замерзания. Эта ситуация эквивалентна хорошо известному в химии структурному фазовому переходу. Казалось бы, можно считать доказанным возможность образования твердой кристаллической фазы внутри расплава, однако это не совсем верное доказательство. Покажем, что эта задача имеет совсем другое решение.

Предположим, что фронт затвердевания движется по переохлажденной жидкости с постоянной скоростью (задача Стефана). В системе координат, в которой фронт покоится на сферической поверхности ( $r = const$ ), можно записать уравнение теплопроводности для движущейся среды (решение Лангера, изложенное Ждановым и Трубниковым, 1991):

$$rc_p T + div q_T = 0, \quad q_T = -k\nabla T + rc_p Tv.$$

Здесь  $r$  - плотность,  $c_p$  - удельная теплоемкость,  $q_T$  - количество тепла,  $Tv$  - скорость изменения температуры ( $dT/dt$ ). Обозначим амплитуду возмущения фронта фазового перехода (ФП) через  $a(t, x, y)$ , тогда поверхность возмущенного ФП имеет нормаль  $N = (N_x, N_y, N_z)$ ,  $N \sim a$ .

На фронте ФП (рис. 1-5): 1)  $T_1 = T_2 = T_{пл}$ . Температуры жидкой (1) и твердой (2) фаз равны температуре плавления. 2) условие согласования скачка тепловых потоков:

$$-cN\nabla T_2 = -cN\nabla T_1 + rUv,$$

где  $c$  - коэффициент теплопроводности;  $U$  - теплота ФП плавления,  $U = T(S_1 - S_2)$ ;  $S$  - энтропии соответствующих фаз;  $1/v$  - характерное время процесса. Отсюда следует очевидное условие:  $T_1 > T_2$ , что не выполняется на границе внутреннего ядра, где реализуется ФП. Это условие говорит о тривиальном факте, что твердое тело всегда холоднее его расплава. Очевидно, что на Земле:  $T_1 < T_2$ , что противоречит идее «нормальной» кристаллизации внутреннего ядра из материала внешнего.

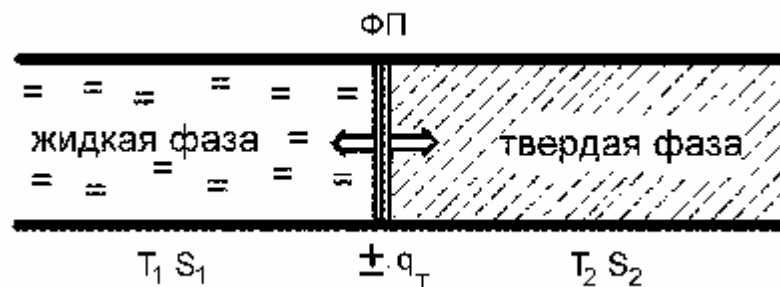


Рис. 1-5. Схема промерзания: ФП – область фазового перехода, кристаллизации.

Далее Жданов и Трубников показывают, что к аналогичной системе уравнений сводится задача о поведении на фронте промерзания некоторой примеси (с концентрацией  $n_{1,2}$ ), описываемой уравнением диффузии для движущейся среды:

$$n'_t + div q_n = 0, \quad q_n = -D\nabla n + nv.$$

При этом в отличие от потоков тепла, имеющих скачок на фронте, обусловленный выделением теплоты плавления, потоки примеси не должны иметь скачка (!), и поэтому для них должно выполняться граничное условие

$$-DN\nabla n_2 = -DN\nabla n_1 + (n_1 - n_2)(v - a'_t)n,$$

где  $v = an$  - вектор скорости границы фазового перехода.

На фронте контакта фаз их химические потенциалы должны совпадать  $m_1 = m_2$ . Химические потенциалы фаз зависят от концентрации, вообще говоря, различным образом. Однако при длительном контакте фаз в системе должно установиться термодинамическое равновесие и концентрации должны принять такие равновесные значения  $n^o_{1,2}$ , чтобы выполнялось равенство  $m_1(n_1^o) = m_2(n_2^o) = m^o$ , где  $m^o$  - общий для всех фаз равновесный химический потенциал. Полученные Лангером решения задачи Стефана показывают, что только за счет изменения концентрации примесей достичь эффекта кристаллизации невозможно. Поэтому, общепринятый в физике Земли подход к проблеме кристаллизации внутреннего ядра из расплава внешнего, по всей видимости, не верен.

1.3.6. Принято считать, что земной радиус постоянен. Утверждается, что это экспериментальный факт (ведь мы видим, что он не меняется). Какой физический закон “заставляет” земной радиус сохраняться постоянным в течение всего периода эволюции? В физике такого “закона” нет, а в геологии есть – это принцип актуализма, согласно которому “всегда было так, как сейчас”.

Однако геологи сами признают, что раньше горы были меньше, а тепловой поток (мы уже говорили об этом) был больше; раньше, например, магнитное поле на Луне было, а потом оно исчезло. Почему?

1.3.7. Принято считать, что выяснение механизма генерации геомагнитного поля, - это «проблема № 1» в физике Земли. Более того, (как мы уже упоминали) Буссе утверждает (1984), что 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, Ганимеди, а потом исчезло? (Похоже, что на Ганимеди 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 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.

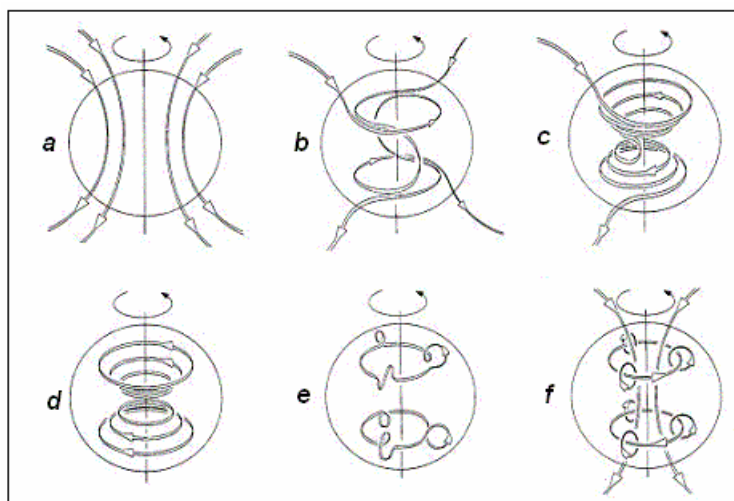


Рис. 1-6. Модель  $\alpha\omega$ -динамо (Love, 1999)

Остановимся на теоретической проблеме динамо. Модель генерации геомагнитного поля базируется на совместном решении нескольких уравнений. Они описывают очень сложный вид движения (см. рис. 1-6) вязкой проводящей жидкости, заполняющей сферическую полость внешнего ядра. Жидкость подвергается воздействию гравитационных, гидродинамических, инерционных и электромагнитных сил. Движение жидкости описывается: гидродинамическим уравнением Навье-Стокса, уравнением индукции, связывающим магнитное поле с движением жидкости, уравнениями неразрывности и термодинамики.

Уравнение Навье-Стокса в векторной форме:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\eta}{3} \nabla (\text{div } \mathbf{v}) - 2(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{1}{r} \nabla p + \mathbf{g} - \frac{m}{4\pi r} \text{rot } \mathbf{H} \times \mathbf{H},$$



где  $t$  – время,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости,  $h$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\mathbf{w}$  – вектор угловой скорости вращения Земли,  $r$  – плотность вещества внешнего ядра,  $p$  – давление,  $\mathbf{g}$  – ускорение массовых сил,  $m$  – магнитная проницаемость,  $\mathbf{H}$  – вектор напряженности магнитного поля.

Уравнение индукции в векторной форме:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{v} \wedge \mathbf{H}) + nh_m \Delta \mathbf{H},$$

где  $h_m$  – коэффициент «магнитной диффузии» (магнитная вязкость).

Уравнения неразрывности и диффузии тепла:

$$\nabla(\mathbf{v} \wedge \mathbf{H}) = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T = Pr^{-1} \nabla^2 T$$

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 (рис. 1-6), 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.

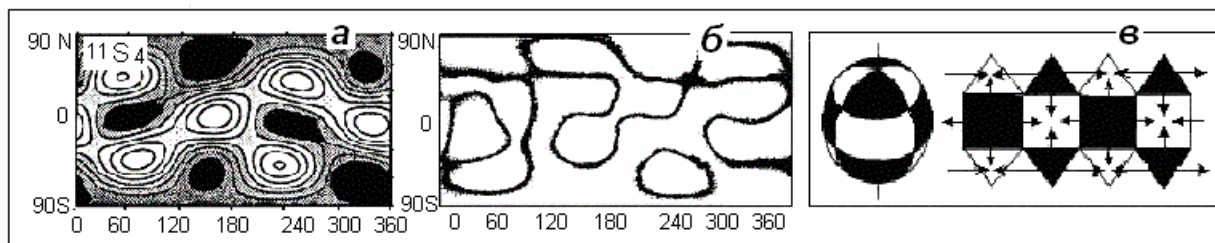


Рис. 1-7. Картины splitting функций внешнего ядра (a) (Giardini et al., 1988), дифракция сейсмических лучей на D''-слое (б) (Wyssession, 1996), интерпретация данных в виде модели Рэлей-Бенаровской конвекции (в) (Кузнецов, 1998).

Обратим внимание на экспериментальные данные, полученные сейсмологами по анализу структуры внешнего ядра с помощью т.н. splitting функций и дифракции сейсмических лучей на слой, отделяющий ядро от мантии (рис. 1-7 а, б) и интерпретацию этих результатов (рис. 1-7-в). Легко видеть, насколько эти данные не похожи на постулируемый в динамо модели характер конвекции.

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:  $S \gg T/mr^2$ , где  $T$  – длительность процесса в годах,  $m$  – магнитная постоянная, а  $r$  – толщина внешнего ядра. 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 функции) не подтверждают принятую модель конвекции, а, скорее, ей противоречат.
- Нет единой теоретической модели динамо. Огромное количество противоречащих друг другу моделей ( $\alpha\omega$ -динамо,  $\alpha^2$  – динамо, динамо Рикитаки, диск Фарадея и т.д.) говорит о сомнительности этих подходов.
- 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 бы окружено сверхпроводящим экраном. Однако, если бы по какой-либо нелепой причине, на границе ядра оказался бы сверхпроводящий экран, то мы могли бы судить о его наличии с помощью электромагнитного зондирования.

1.3.8. Согласно общепризнанной концепции тектоники плит, материки и плиты перемещаются по слою астеносферы, находящемуся в литосфере на глубине порядка сотни километров и обладающему особыми свойствами, в частности, пониженной величиной вязкости. Эти зоны обнаруживаются методами сейсмического и электромагнитного просвечивания. Однако, как было показано Алексеевым и др. (1977), эти зоны локализованы в тектонически активных регионах (см. рис. 1-8) и их нет в пассивных областях планеты. Следовательно, нет того слоя, по которому могли бы дрейфовать плиты и материки. Общепринятая точка зрения относительно того, что причиной понижения скоростей сейсмических волн в астеносфере перегрев вещества вплоть до частичного плавления, тоже подвергается сомнению. Например, Карато считает (Karato, 1990), что изменение термодинамических свойств астеносферы обязано не плавлению, как принято считать, а повышению концентрации водорода в зонах присутствия астеносферы.



Рис. 1-8. Схема астеносферных зон СССР (Алексеев и др., 1977).

1.3.9. Ньютон рассчитал степень сжатия вращающейся жидкой Земли, - величина, обратная сжатию, оказалась равной  $1/\epsilon = 232$ . Впоследствии эта величина была определена для реальной Земли,  $1/\epsilon = 298$ . Джеффрис (1960), а за ним и Эвернден (1997) показали, что Земля, если она была всегда такой, как сейчас, никогда не была гидростатичной и, следовательно, на Земле никогда не было глобальной конвекции, которая, как известно, является двигателем плит.

1.3.10. В последние годы усилиями сейсмологов были выявлены удивительные особенности строения Земли. В этих исследованиях использовались два метода. Один состоит в том, что изучается время прохождения двух сейсмических лучей под очень близкими эпицентрными углами. Причем, один луч касается какой-либо оболочки Земли, а другой – нет. Этот метод получил название *travel-time*. С помощью этого метода удалось выявить тонкую структуру D''-слоя и обнаружить анизотропию внутреннего ядра. Эти результаты были подтверждены с помощью анализа спектров расщепления собственных колебаний Земли (*splitting* функций), возникающих как реакция на сильные землетрясения. Выяснилось, что структура D''-слоя очень похожа на структуру F-слоя и они обе близки к картине распределения высот геоида. Кроме этого, данные по структуре *splitting* функций можно интерпретировать как, то, что во внешнем ядре происходит 12-ти ячеистая конвекция и что эта конвекция совсем не напоминает ту, которая должна приводить к генерации геомагнитного поля посредством реализации динамо-эффекта (см. рис. 1-7 и сравни его с рис. 1-6). Эти данные оказались неустраиваемыми моделью холодной Земли, возможно именно потому, что они ей противоречат.

1.3.11. Согласно плитной тектонике, как основной тектонической гипотезе холодной модели, плиты образуются в зонах спрединга и поглощаются в зонах субдукции. Следовательно, плита, поглощаемая в зоне субдукции, должна иметь все более и более «молодой» возраст, если проследить его от зоны субдукции по направлению к спредингу. В действительности, это совсем не так в зонах субдукции на западном берегу Тихого океана. Этот факт ставит под сомнение справедливость гипотезы плитной тектоники, а значит, и холодной модели Земли.

1.3.12. Сейсмичность, в соответствии с основными принципами модели холодной Земли, является результатом столкновения плит и должна проявляться исключительно на их границах. В действительности, землетрясения и вулканы располагаются и вне границ плит, что, тоже находится в противоречии с плитной тектоникой и холодной моделью.

#### Выводы.

В модели холодной Земли встречаются непреодолимые сложности при объяснении:

- резкого увеличения массы океанов в течение последних 200 млн. лет;
- несоответствия с моделью палеоданных о значительно большей температуре поверхности Земли в докембрии;
- невозможности совмещения материков на шаре с радиусом, равным современному (парадокс Мезервея);
- многих вопросов, связанных с земным магнетизмом и магнетизмом планет, в частности, наличие в прошлом магнитного поля у Марса, Луны и спутников других планет;
- изменения величины силы тяжести в течение эволюции Земли и, в частности, отсутствие на Земле в более ранние времена высоких гор;
- отсутствие ясности в вопросе о большей скорости вращения Земли в прошлом и несоответствии фигуры Земли современной скорости;
- отсутствие экспериментального подтверждения наличия на Земле в прошлом интенсивных тектонических процессов т.п.

Все факты и аргументы, касающиеся модели холодной Земли, о которых шла речь в этой главе, могут служить основанием для разработки модели горячей Земли (Кузнецов, 1990), альтернативной холодной.

### *Литература*

- Алексеев А.С., Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н. и др. Схема астеносферных зон Советского Союза. ДАН СССР. Т. 234. № 4. 1977. С. 790-793.
- Батюшкова И.В. Внутреннее строение Земли. М.: Наука. 1966. 194 с.
- Блинов В.Ф. Основные направления исследований расширяющейся Земли. В кн. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.
- Браун Д., Массет А. Недоступная Земля. М.: Мир. 1984. 262 с.
- Буллен К.Е. Плотность Земли. М.: Мир. 1978. 442 с.
- Буссе Ф. Магнитная гидродинамика земного динамо. В кн. Вихри и волны. М.: Мир. 1984. 335 с.
- Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра. 1984. 110 с.
- Гутенберг Б. Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 263 с.
- Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и строение. М.: ИЛ. 1960. 484 с.
- Жданов С.К., Трубников Б.А. Квазигазовые неустойчивые среды. М.: Наука. 1991. 175 с.
- Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. М.: Мир. 1989. 427 с.
- Кропоткин П.Н. Пульсационная геотектоническая гипотеза В.А.Обручева и мобилизм. В кн. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.
- Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990. 217 с.
- Кузнецов В.В. Правильны ли новые подходы к физике Земли? Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 6. С. 286-290.
- Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли. УФН. 1997. Т.167. № 9. С. 1001-1012.
- Кузнецов В.В. Связь фрактальных свойств и масштабной инвариантности инверсий магнитного поля с изменением режима конвекции в ядре Земли. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38 № 2. С. 166-170.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.
- Мартюшев Л.М., Селезнев В.Д. Принцип максимальности производства энтропии как критерий отбора морфологических фаз при кристаллизации. ДАН2000. Т. 371. С. 466-468.
- Рингвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Недра. 1982. 293 с.
- Хомутов С.Ю. Исследование зависимости глобальной сейсмичности от положения луны. Геол. и геофизика. 1995. Т. 36. № 4. С. 88-102.
- Шмидт О.Ю. Происхождение и ранняя эволюция Земли. В кн. Вопросы внутреннего строения Земли. М. ИФЗ. 1955. С. 5-10.
- Эвернден Дж. Ф. О чем говорят параметры фигуры Земли  $\epsilon_a = 1/298$ ,  $C/Ma^2 = 0.333?$  Физика Земли 1997. № 2. С. 85-94.
- Carey S.W. The Expanding Earth. Elseiver. Amsterdam. 1976. 488 p.
- Fearn D.R. Compositional convection and the Earth's core. Geomagnetism and Palaeomagnetism. Ed. Lowes et al., NATO ASI Ser. 1989. V. 261. P. 335-346.
- Giardini D., Li X. D., Woodhouse J. H. Splitting functions of long period normal modes of the earth J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P.13716-13742.
- Julian B.R., Davis D., Sheppard R.M. PKJKP. Nature. 1972. V. 235. P. 317-318.
- Karato S-i The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. Nature. 1990. V. 347. P. 272-273.
- Love J. Reversal and excursions of the geodynamo, Astronomy and Geophysics, December 1999. V 40. P. 6.14 -6.19.
- Okal E.A., Cansi Y. Detection of PKJKP at intermediate periods by progressive multi-channel correlation. Earth Planet. Sci. Lett. 1998. V. 164. P. 23-30.
- Tromp J. Normal-mode splitting observations from the great 1994 Bolivia and Kuril island earthquakes: constraints on the structure of the mantle and inner core. GSA TODAY. 1995. V. 5. N. 7.
- Wysession M.E. Large-scale structure at the core-mantle boundary from diffracted waves. Nature. 1996. V. 382. P. 244-248.