

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ОТКРЫТЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра охраны недр и рационального природопользования**

**УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе**

**А.К.Порцевский**

## **ФИЗИКА ЗЕМЛИ**

**Зарегистрировано в Федеральном агентстве по образованию  
(№ 5375 от 16.11.2005.)**

**Учебное пособие для подготовки студентов**

**по направлениям:**

650200 «Технология геологической разведки»,

065100 «Прикладная геология»,

550600 «Горное дело»

**по специальностям:**

080100 Геологическая съёмка, поиски и разведка  
месторождений полезных ископаемых (МПИ)

080300 Поиски и разведка подземных вод и  
инженерно-геологические изыскания

080400 Геофизические методы поисков и разведки МПИ

080700 Технология и техника разведки МПИ

090200 Подземная разработка МПИ

090400 Шахтное и подземное строительство

090500 Открытые горные работы

**Москва 2005 г.**

## Введение

Курс «Физики Земли» предусмотрен в Государственном Образовательном Стандарте лишь для специальности 0807 «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых» (всего **50 часов**), хотя знания о глубинных причинах, о физике геологических и геодинамических процессов в литосфере, о природе электромагнитогравитационного поля, о геологической истории Земли, о рудогенезе, о происхождении жизни, о причинах природных катастроф - необходимы всем геологам, горнякам и людям, интересующимся нашей планетой.

Итак, по Образовательному Стандарту высшего профессионального образования дисциплина включает следующие **основные понятия**:

физика Земли, её место в системе наук о Земле; строение оболочек Земли; сейсмология и внутреннее строение Земли; сейсмическое районирование, прогноз; сейсмические волны, закономерности их распределения; гравитационное поле Земли; методы наблюдений, гипотеза изостазии; магнитное поле Земли, его происхождение, палеомагнетизм; магнетизм пород и минералов; тепловое поле Земли, тепловой поток, его измерение, источники тепла; вещество Земли в условиях высоких температур и давлений; развитие Земли, современные теории; космические циклы; ноосфера; учение В.И.Вернадского о био- и ноосфере; физические поля как индикаторы природных и антропогенных нарушений; физико-экологические модели; новые методы экогеофизических исследований; прикладные аспекты физических явлений.

**Цель** изучения дисциплины - получение знаний о происхождении Солнечной системы, планеты Земля, её геологической истории, о её полях и внутреннем строении.

Физика Земли, по существу, включает в себя базовые сведения о гипотезах возникновения Вселенной и планеты Земля, о природе материи в двух её модификациях – поля и вещества; о едином электромагнитогравитационном поле Земли, о пространстве и времени, о связи геологической истории планеты с появлением на ней жизни и известными катастрофами.

Учебное поле разбито на две части: первая - обязательная по Стандарту, и вторая – внеклассное чтение, факультатив, для углублённого изучения истории Земли.

## Часть первая. Стандарт.

### 1. Эволюция Вселенной

Как предполагают астрофизики, в первые три минуты после Большого Взрыва температура была столь велика, что Вещество состояло из электронов, протонов и нейтронов. При остывании синтезировались **лёгкие элементы** – водород (75%), а из него гелий (25%). Температура и плотность вещества быстро уменьшались, и поэтому более тяжёлые элементы не успели синтезироваться. Уже затем **в звёздах** синтезировались остальные элементы и через 20 минут современный нам вещественный состав Вселенной уже был сформирован. Пер-

вичное вещество Вселенной в процессе разлета распалось на множество относительно компактных скоплений, из которых в будущем образовались галактики.

Образования **одной на всю Вселенную** “суперзвезды” не происходит из-за того, что звёзды **вращаются** вокруг центра Галактики (так и Луна - хотя и притягивается Землёй, она на неё не падает из-за равенства центробежных и центростремительных сил).

По одной из гипотез, в момент очередного Большого Взрыва из почки - «чёрной дыры» вырывается зародыш новой Вселенной, он отрывается от Вселенной-родительницы и далее ведёт самостоятельное существование. Пузырьки мини-вселенной разбегаются от родительницы и теряют возможность обмениваться сигналами друг с другом, развиваются изолированно и независимо. Когда-нибудь, для нашей Вселенной это  $3 \cdot 10^{39}$  с, все галактики сожмутся в чёрные дыры, произойдёт распад всех протонов и нейтронов на фотоны, нейтрино и электронно-позитронные пары. Но в поле тяготения «чёрной дыры» рождаются новые частицы в виде квантов излучения (фотоны, нейтрино и гравитоны) и масса чёрных дыр постепенно испаряется. Пройдут многие миллиарды лет, и начнётся коллапс Вселенной, она начнёт уменьшаться в размерах, разогреваться, пока сама не превратится в «чёрную дыру», т.е. произойдёт, как шутят физики, Большой Всхлип – явление, противоположное Большому Взрыву. Затем всё повторится с небольшими мутациями («по Дарвину»).

По другой версии<sup>1</sup>, расширение Вселенной не сменится сжатием, а зафиксировано – когда силы тяготения станут равны силам антитяготения - и её пространственно-временной каркас застынет и останется таким «замороженным» навсегда.

Кроме этой гипотезы, известна теория Фридмана, дополненная акад. М.А.Марковым, согласно которой огромная Вселенная может оказаться в почти замкнутом мире (где энергия взаимного притяжения всех находящихся в нём тел равно энергии их общей массы, равной по Эйнштейну  $E = m \cdot c^2$ ) и её **внешние размеры могут быть микроскопическими**, с точки зрения внешнего наблюдателя. Таким образом, одни и те же объекты можно рассматривать и как **микромиры-фридмоны** и как макросистемы. Фридмоны имеют как бы горлышко (возможно, это «чёрная дыра»), через которое можно попасть внутрь сферы и выйти из неё в другой, внешний мир. Возможно и мир, в котором мы живём, не что иное, как фридмон.

Тем не менее, **вакуум** – это то, что получается, когда убирают все частицы и все физические поля, но при этом остаётся квантовое «кипение» пустоты – «вакуумная пена». Вселенная воспроизводит из «вакуумной пены», «ложного вакуума» сама себя с различными физическими свойствами, разными плотностями материи и антиматерии. Вакуум «кипит» виртуальными частицами микромира и энергия взаимодействия их хоть и мала, но отлична от нуля, а где есть хоть какая-либо плотность энергии, там обязательно появляются силы натяже-

---

<sup>1</sup> Черепашук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, чёрные дыры. – Фрязино: изд. Век-2, 2003. - 320 с.

ния и отталкивания, поэтому даже в вакууме есть гравитационные силы. Если гравитация – главная сила, управляющая движением материи во Вселенной, то нейтрино – это главная частица Вселенной, хотя она в 20 тыс. раз легче электрона и в 40 млн. раз легче протона. Наблюдения астрофизиков<sup>2</sup> показали, что **скрытой массы** нейтрино в областях скопления галактик должно быть в 20 раз больше, чем видимой массы, сосредоточенной в самих галактиках. Плотность вакуума составляет  $5 \cdot 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>, а средняя плотность светящегося вещества составляет  $2 \cdot 10^{-31}$  г/см<sup>3</sup>, средняя плотность тёмной материи (возможно, нейтрино)  $2 \cdot 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>, то есть на вакуум приходится 67% всей энергии мира, на нейтрино 30%, а на обычное вещество (барионы) – лишь 3%, на излучение – ещё в сто раз меньше.

Итак, обычное вещество по массе и по гравитационному воздействию составляет лишь 3-40% «примеси» к основной массе Вселенной. Сейчас галактики разбегаются, но по одной из версий через многие миллиарды лет расширение Вселенной сменится сжатием и причиной этого является именно нейтрино, плотность материи которого превышает критическую плотность Вселенной в  $10^{-29}$  г/см<sup>3</sup> (при меньшей плотности Вселенная расширялась бы вечно и безгранично). Некоторые астрофизики пришли к выводу, возможно ошибочному, что скорость распространения гравитационных волн во Вселенной на восемь порядков (т.е. в 100 миллионов раз) превышает скорость распространения света в вакууме.

Что же происходило в первые мгновения жизни **зародыша Вселенной**? В первые мгновения Большого Взрыва при температуре  $10^{13}$  Кельвинов одновременно рождалось и аннигилировало огромное количество пар частиц и античастиц. Среди них были электроны и позитроны, протоны и антипротоны, нейтроны и антинейтроны. «Кипящий котёл» содержал примерно одинаковое число частиц всех видов и их античастиц. Но почему-то число частиц и античастиц было всё же **не в точности одинаково**: на каждый миллиард пар частиц-античастиц приходилась одна «лишняя» тяжёлая частица. Когда миллиарды пар с понижением температуры взаимно уничтожились, превратившись в реликтовые фотоны, тогда «лишние» частицы остались, и из них возник весь окружающий нас мир звёзд, планет, межзвёздного газа. Причина – в несимметричности темпов реакций частиц и античастиц и в том, что с понижением температуры и разбеганием вещества скорость процесса аннигиляции падает и концентрация частиц оказывается «замороженной», а поскольку плотность материи обычной материи уменьшалась и на  $10^{-34}$  секунде после начала расширения сравнялась с плотностью «**ложного вакуума**», то его гравитация вызывает отталкивание. За период с  $10^{-34}$  до  $10^{-32}$  секунды все размеры во Вселенной увеличились в  $10^{50}$  раз. Но состояние этой «раздувающейся» Вселенной неустойчиво, температура и плотность стремительно уменьшаются, вещество переохлаждается. Плотность обычной материи становится совершенно ничтожной по сравнению с плотностью «ложного вакуума». В это время становится возможным **фазовый переход** из состояния «ложного вакуума» со сравнительно огромной

---

<sup>2</sup> а) Новиков И.Д. Как взорвалась Вселенная.- М.: Наука, 1988. - 175 с.; б) Новиков И.Д. Чёрные дыры и Вселенная.- М.: Молодая гвардия, 1985. - 190 с.

плотностью - в плотность массы обычной горячей материи с выделением огромной энергии и пар частиц-античастиц, Вселенная вновь разогревается.

Явление фазового перехода «ложного вакуума» схоже с процессом отвердения переохлажденной жидкости, появлением в ней первых кристалликов с разной ориентацией осей – доменов. Вот и мы **живём в таком домене Вселенной**, стенки которого отдалены от другого домена на расстояние  $10^{33}$  световых лет (при этом «горизонт видимости» у нас составляет всего  $10^{10}$  световых лет).

Как известно, ядра химических элементов состоят из электрически нейтральных частиц - нейтронов (**n**) и положительно заряженных частиц – протонов (**p**), между которыми действуют очень мощные короткодействующие (радиус действия около  $2 \cdot 10^{-15}$  м) ядерные силы. Благодаря этим силам ядра не разлетаются под действием сил электростатического отталкивания протонов. Массы протонов и нейтронов очень близки, ядерные силы, действующие между частицами **n-n**, **n-p**, **p-p** тождественны, поэтому часто используют общее название этих частиц – нуклоны.

И когда благодаря выделению потенциальной гравитационной энергии - температура звезды достигает нескольких миллионов градусов, тогда в центре звезды начинаются реакции синтеза гелия из водорода, и полученная при этом энергия **препятствует** дальнейшему **гравитационному сжатию вещества** звезды. Звезда находится в таком состоянии до тех пор, пока в центре звезды **не выгорит** значительная часть водорода. В случае Солнца длительность этого периода приблизительно равна  $10^{10}$  (10 миллиардов) лет. Современный возраст Солнца около 5 млрд. лет.

После выгорания водорода в центральной части звезды образуется гелиевое ядро, в котором энерговыделение уже прекращается, но оно всё ещё происходит в оболочке звезды. Масса гелиевого ядра при этом растёт, происходит его гравитационное сжатие, возрастает плотность и температура. Когда эти величины достигают приблизительно  $10^6$  г/см<sup>3</sup> и  $10^8$  °К, начинаются реакции “сгорания” гелия с образованием бериллия, углерода и кислорода. Эти реакции также идут с выделением энергии и задерживают гравитационное сжатие звезды. По мере завершения синтеза всё более тяжелых элементов происходит дальнейшее гравитационное сжатие и увеличение температуры звезды. Если масса звезды достаточно велика, то температура может достигнуть порядка  $2 \cdot 10^9$  °К, при которой синтезируются наиболее стабильные элементы. Формируется равновесный элементный состав звёздного вещества, в котором практически нет элементов тяжелее железа – они распадаются сразу после синтеза. При таком составе звездного вещества уже не может выделяться энергия ядерных реакций, поэтому ничто не препятствует гравитационному сжатию звезды.

Если масса звезды относительно невелика, давление электронного газа останавливает гравитационное сжатие. При  $M < 1.5 M_{\odot}$  ( $M$  - масса звезды,  $M_{\odot}$  - масса солнца) звезда превращается в **белый карлик** с размерами Земли и плотностью  $10^9$ - $10^{10}$  кг/м<sup>3</sup>.

Звезды, масса которых составляет  $M = (2-3) \cdot M_{\odot}$ , превращаются в **нейтронные звезды** с радиусом 10 км и плотностью  $10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>, т.е. с плотностью

ядерного вещества. Нейтронная звезда состоит практически из одних нейтронов, количество протонов и электронов - лишь около 1-2%.

Если масса звезды значительно превышает массу Солнца ( $M > 6 \cdot M_{\odot}$ ), то давление электронного газа не в состоянии противодействовать гравитационному давлению и происходит беспредельное катастрофическое сжатие звезды (гравитационный коллапс) в **чёрную дыру**. Никакие сигналы (свет, нейтрино) не могут выйти наружу и достигнуть внешнего наблюдателя. При этом высвобождается энергия 938 МэВ на один нуклон, т.е. приблизительно в 1000 раз больше, чем при ядерном распаде урана. Эта энергия придаёт остальному веществу звезды скорость порядка  $10^7$  м/с и светимость этого вещества на короткое время становится сравнимой со светимостью целой галактики, происходит **вспышка сверхновой**. В нашей Галактике сверхновые вспыхивают достаточно редко и всегда сопровождаются катастрофами на Земле (1006, 1054, 1181, 1572, 1604, 1667 гг.).

На ранних стадиях эволюции Вселенной было очень много массивных звезд и, соответственно, часто происходили вспышки сверхновых. После вспышки сверхновой в космическом пространстве возникает облако космической пыли, содержащее всю таблицу Менделеева. После остывания этого облака из него вновь может образоваться звезда, которую называют **звездой второго поколения**. Солнце является звездой второго или даже третьего поколения.

## 2. Образование Солнечной системы и Земли

Спектральный анализ излучения Солнца показывает, что приблизительно на 70% Солнце состоит из водорода, на 28% из гелия и только около 2% приходится на другие, более тяжёлые элементы.

На рис. 1 схематически изображена зависимость давления насыщенных паров для двух элементов – тугоплавкого и летучего. Если температура и давление паров этих элементов соответствует точке **A**, то для тугоплавкого элемента  $P > P_{\text{нас}}$  должна идти его конденсация, а летучий  $P < P_{\text{нас}}$  – будет оставаться в газовой фазе.

Таким образом, вблизи Солнца, где была высокая температура, могли конденсироваться **только тугоплавкие элементы**. Внешние же планеты состоят из более лёгких, летучих элементов.

Температура первичной Земли была равна 1000-1500 °К, причём наибольшая температура была вблизи поверхности планеты, на глубине 100-200 км. Очень важно, что Земля изначально обладала огромным запасом тепловой энергии, источником которой была потенциальная гравитационная энергия облака космической пыли, из которого она образовалась.

Таким образом, первичная Земля была однородной (средняя плотность  $\rho = 5.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), твёрдой и имела температуру около 1500°C. Согласно астрофизическим данным, аккреция<sup>3</sup> Земли продолжалась около 100 миллионов лет и закончилась приблизительно 4.55 миллиарда лет тому назад.

---

<sup>3</sup> **Аккреция** – образование космического тела из облака космической пыли.

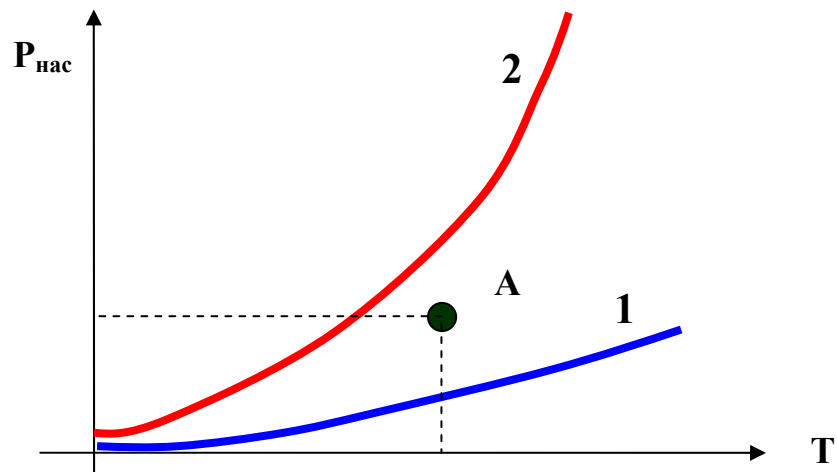


Рис.1. Зависимость давления насыщенных паров от температуры, граница перехода вещества из газообразного состояния в твёрдое состояние

- 1 – тугоплавкий (тяжёлый) элемент с низким давлением паров (Si, Fe) и  
 2 – летучий (лёгкий) элемент (H, C)

В настоящее время плотность горных пород, находящихся на поверхности Земли, приблизительно равна  $3 \text{ т/м}^3$ , а плотность вещества в центре Земли (согласно современным сейсмическим данным), составляет  $12 \div 15 \text{ т/м}^3$ . Произошла дифференциация вещества. Тяжёлые компоненты опустились в центр и образовали ядро Земли, а лёгкие вещества поднялись на поверхность.

### Характеристика планет Солнечной системы

Земля является третьей из девяти планет Солнечной системы. В табл. 1 представлены основные общие характеристики всех 9 планет Солнечной системы.

Все планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) сравнительно малы. В процессе своего образования они не смогли удержать наиболее распространенную в космосе водородно-гелиевую материю (Солнце и планеты-гиганты именно такие). Все они имеют дефицит воды, метана, аммиака. Основными составляющими планет земной группы являются силикаты и железо. Ко второй группе относятся остальные планеты Солнечной системы (кроме Плутона – с 2002 г. уже и не планета). Различие между двумя группами заключается не только в расстоянии от Солнца, но и в массе, плотности, объёме и химическом составе.

Крупнейшим **астрономическим открытием** последних лет стал астероидный пояс между орбитами Нептуна и Плутона, в котором насчитывается более 300 малых планет. Пояс назван в честь американского астронома Дж.Койпера, давно предсказавшего их существование. В 2002 году Плутон классифицировали не как планету - а как астероид и самый крупный объект пояса Койпера.

Планеты земной группы имеют намного бóльшие средние плотности (все, кроме Марса)  $\rho > 5.0 \text{ г/см}^3$ , чем планеты дальней группы  $0.68 < \rho < 1.84 \text{ г/см}^3$ .

Таблица 1

## Общие характеристики всех девяти планет Солнечной системы (хотя Плутон – не планета)

Название планеты	Продолжительность суток	Диапазон наклона плоскости экватора к плоскости эклиптики <sup>1</sup>	Продолжительность года	Расстояние до Солнца в а.е.	Масса, относительно Земли	Объём, относительно Земли	Плотность в г/см <sup>3</sup>	Диаметр в км	Число спутников
Меркурий	59 с.	0 <sup>0</sup>	88 с.	0.387	0.055	0.055	5.52	4865	0
Венера	243 с.	±178 <sup>0</sup>	225 с.	0.723	0.815	0.861	5.22	12102	0
Земля	23ч. 53м.	±23.5 <sup>0</sup>	365.26 с.	1.000	1.00	1.000	5.517	12756	1
Марс	24ч. 37м.	±25.2 <sup>0</sup>	690.7 с.	1.524	0.107	0.150	3.97	6800	2
Юпитер	9ч. 50м.	±3.1 <sup>0</sup>	11.862 г.	5.203	317.82	1344.8	1.30	141700	9
Сатурн	10ч. 14м.	±26.4 <sup>0</sup>	29.458 г.	9.539	95.28	770	0.68	120200	10 (3)
Уран	10ч. 45м.	±98 <sup>0</sup>	84.015 г.	19.19	14.56	61	1.32	50700	4
Нептун	15ч. 48м.	±29 <sup>0</sup>	164.79 г.	30.06	17.28	57	1.84	49500	21
Плутон	6 сут.	?	250.6 г.	39.75	0.11 ?	0.1	?	6000	1

<sup>1</sup> Плоскость эклиптики - плоскость, в которой происходит вращение планеты вокруг Солнца.



Вокруг Солнца все планеты вращаются практически в одной плоскости – плоскости эклиптики, и колебания собственной оси вращения планет относительно этой плоскости – небольшие (от 0 до  $29^{\circ}$ ), за исключением Венеры и Урана. Известно, что земная орбита вокруг Солнца – эллиптическая, и максимальное расстояние от Солнца до Земли равно  $1.52 \cdot 10^{11}$  м, а минимальное –  $1.47 \cdot 10^{11}$  м, причем максимальное расстояние приходится на июль, а минимальное – на январь. Жителям Северного полушария повезло – нас «солнечный ветер» и зимой и летом не очень сильно прожаривает.

### Электромагнитное поле Солнца

Бывает неподвижное электрическое поле – электростатическое (без магнитного) и бывает магнитное поле, без движения электричества, - создают его ферромагнетики. Т.е. тело может долгое время поддерживать противоестественное состояние – избыток электронов или их недостаток (как известно, бывает электронная и дырочная проводимость) или намагниченность диполя, домена в кристаллах. Магнитное поле формирует материю космического облака в тороидальный диск, так сформировалась солнечная система, спиральная галактика (см. рис. 2). Японские астрофизики Ю.Софуэ и М.Фудзимото определили структуру магнитного поля Галактики. Их выводы сводятся к тому, что магнитное поле вытянуто вдоль спиральных рукавов и направление поля меняется при переходе из одного рукава к другому: в одном рукаве магнитное поле направлено к центру Галактики, в другом – выходит из него. В солнечной системе движение плазмы по спирали уже точно установлено, при этом поле имеет секторную структуру: в двух секторах отрицательно заряженные частицы движутся к Солнцу, в двух остальных – от Солнца. «Солнечный ветер» представляет собой неравномерный поток плазмы с примерно равными объёмными плотностями положительно и отрицательно заряженных частиц, расположенных в соседних секторах гелиомагнитного поля (см. рис. 3). Это поле вращается, и Солнце стегает Землю знакопеременными потоками частиц. В классической физике говорят – существует электрическое поле, но ведь электричество это просто движение (движение – это скорость, и электричество – это движение заряженных частиц, электронов в магнитном поле; а в квантовой физике энергия выражается через скорость и температуру), мы же не говорим – есть скоростное поле автомобиля.

Поток частиц имеет чёткое отличие от излучения, носит чисто корпускулярный характер, ведь магнитное поле ещё не разогнало частицы до нужных скоростей, не зарядило их энергией до фазы колебания поперёк силовой линии. В состав ядра атома, кроме магнитоактивных протонов, входят другие частицы: нейтроны, пи-мезоны; и если протон и электрон, вращаясь, проявляют себя электрически, то нейтроны представляют собой симбиоз протона и электрона со слабым вращением, а, следовательно, и со слабым зарядом.

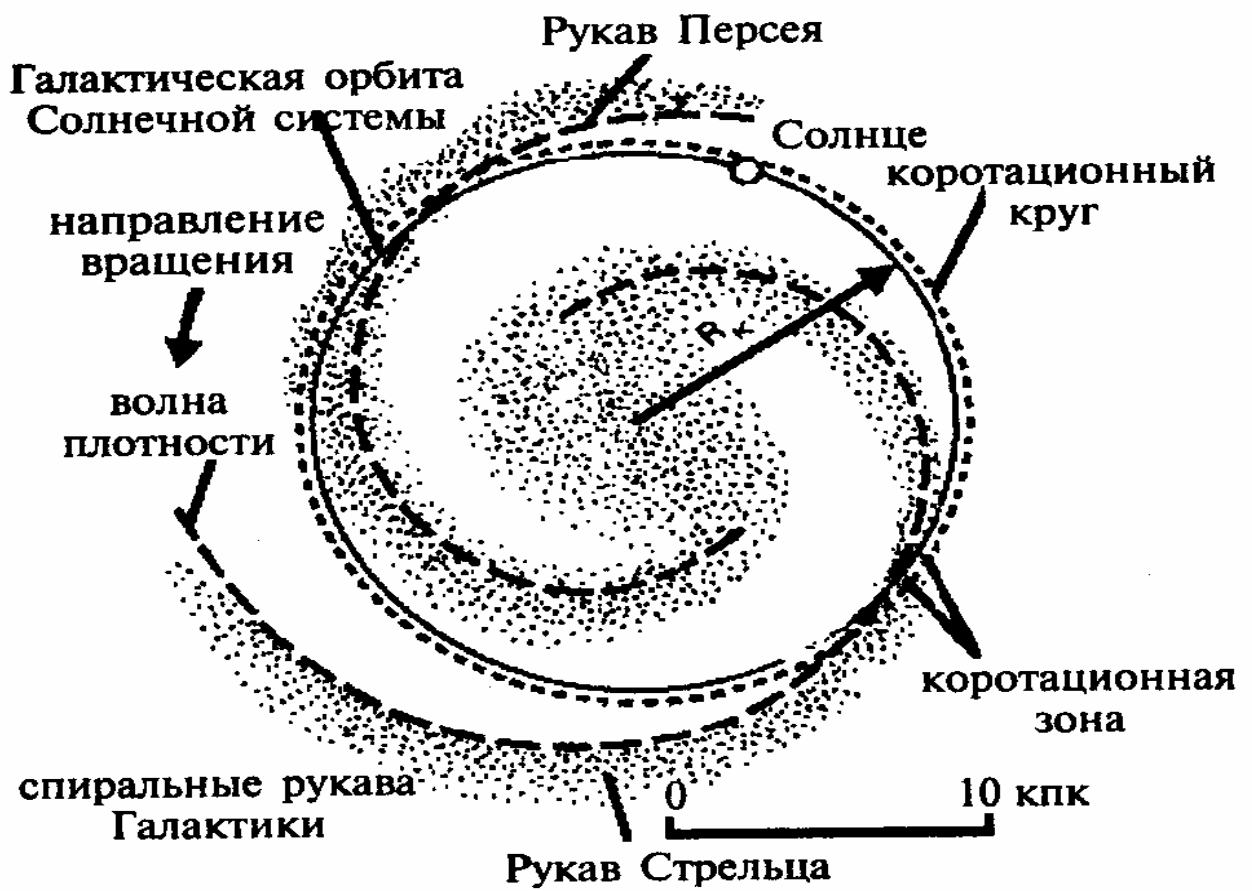


Рис. 2. Галактический «пояс жизни»

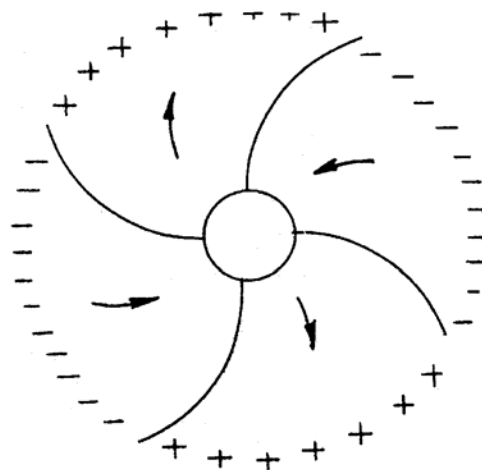


Рис. 3. Секторная структура вращающегося гелиомагнитного поля

## Пульсация Солнца

Солнце находится от Земли всего лишь в 107 его диаметрах.

На фотосфере по обе стороны от экватора (в пределах  $5^{\circ}$ - $40^{\circ}$ ) возникают солнечные пятна. Они существуют от нескольких дней до месяцев, и затем пропадают. Установлено, что перед появлением солнечных пятен напряжение магнитного поля Солнца возрастает примерно в 3000 раз по сравнению с обычным напряжением. И в местах ослабления магнитного поля происходят гигантские выбросы энергии в виде факелов или протуберанцев. В настоящее время установлена прямая связь между хромосферными вспышками на Солнце и скоростью вращения Земли (см. рис. 4). Например, 23 февраля 1956 г. после огромной хромосферной вспышки вращение Земли несколько замедлилось, и сутки удлинились на 2,5 микросекунды. Швейцарский астроном Вольф предложил измерять активность Солнца числами, пропорциональными общей площади, занимаемой солнечными пятнами, видимыми в данный момент на поверхности Солнца. С середины XIX века эта величина получила названия «числа Вольфа», и чем больше пятен, тем активнее Солнце. В проявлении солнечной активности наблюдаются ритмы. В настоящее время известны солнечные ритмы в 11, в 22-23, в 80-90 лет и в 1800 лет.

В умеренных широтах количество осадков увеличивается с увеличением солнечной активности, т.к. возрастает повторяемость циклонов; уменьшение же солнечной активности приводит к засухам. Массовое появление вредителей леса, сельскохозяйственных культур, грызунов, а, следовательно, и эпидемий болезней - также зависит от 11-летнего цикла солнечной активности. А.Л.Чижевский<sup>2</sup> указывает, что каждые 11 лет возрастает смертность от инфаркта миокарда, от чумы, от дифтерии и возвратного тифа.

Майк Локвуд с коллегами проанализировал **напряжённость магнитного поля** Солнца и заявил, что в течении XX века она **увеличилась в 2,3 раза**. В то же время, за последние 120 лет магнитный момент Земли уменьшился на 6%, а северный магнитный полюс сместился на запад вдоль параллели на  $4^{\circ}$  и на север вдоль меридиана – на  $8^{\circ}$ . Некоторые данные говорят о том, что 400 лет назад дипольное поле было на 10% сильнее современного.

Магнитное поле Земли непрерывно меняется, планеты движутся вокруг Солнца по эксцентричным орбитам, то, приближаясь, то, удаляясь относительно Солнца, возмущая его магнитное поле. Временами они оказываются в узком секторе (парад планет), и если это совпадает с их перигелиями, то солнечная активность достигает максимума, при этом основным возбудителем 11-летнего цикла солнечной активности является Юпитер. А **Юпитер** – это в далёком будущем полноценная звезда и наша Солнечная система станет типичной двойной звёздной системой, каких во Вселенной - большинство. Спутник Юпитера, Европа, имеет размер с Землю, на поверхности температура – минус  $150^{\circ}\text{C}$ , но под толщей льда находится океан с действующими вулканами и **там возможна жизнь** (наподобие той, что существует у чёрных курильщиков в глубинах земного океана).

---

<sup>2</sup> Чижевский А.Л. Солнце и мы. М.: изд. «Знание», 1963.

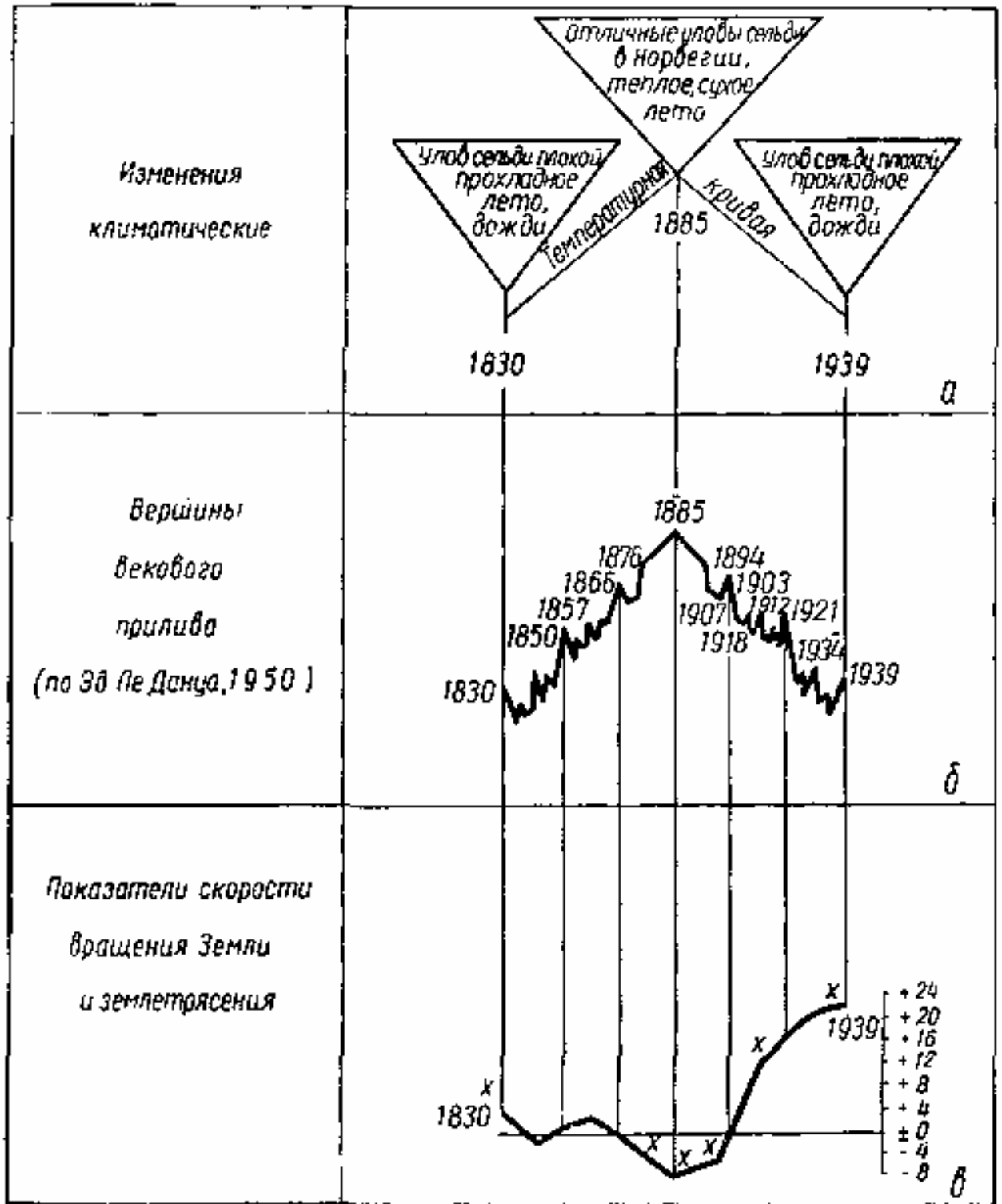


Рис. 4. Связь приливов со скоростями вращения Земли, землетрясениями и климатом (по Б.Л.Личкову)

### 3. Эволюция Земли

Итак, как теперь считают учёные-планетологи, планетная система из протосолнечной туманности стала образовываться около 4.55 миллиарда лет назад, а химические элементы образовались из Хаоса еще раньше - в ходе реакции нуклеосинтеза (продолжавшейся свыше 10 миллиардов лет после взрыва Сверхновой звезды вблизи будущей Солнечной системы). Затем, около 4 млрд. лет назад, Земля пережила некий катаклизм, скорее всего от удара с крупным астероидом (которых в то время было множество), в результате чего она лишилась части верхней оболочки (рис. 5), из которой впоследствии, возможно, образовалась Луна (рис. 6). По данным геологов, возраст пород земной суши 4-4,5 миллиардов лет, а возраст пород океанической коры не более 0,2 миллиарда лет и столь огромную разницу возрастов не может объяснить никакая теория о поднятии и опускании континентов.

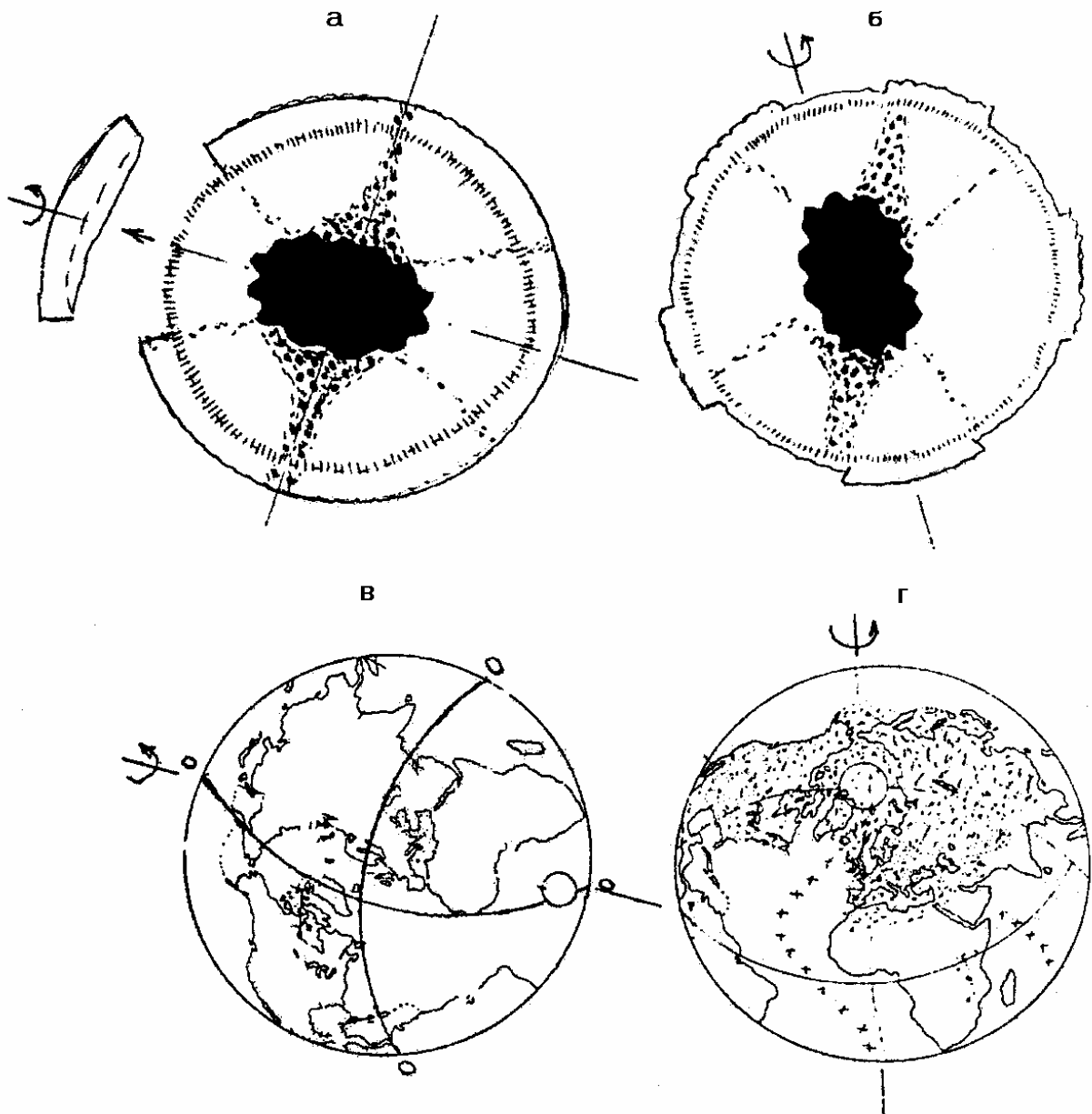


Рис. 5. Разрыв Земли и её перестройка:  
а, б, в, г – последовательность перестройки

Согласно современной теории происхождения планет (О.Ю.Шмидт) Земля образовалась путём «холодного слипания», аккумуляции твёрдого рассеянного вещества в виде частиц и тел различных размеров. Постепенно мельчайшие частицы и метеориты объединялись в более крупные тела — астероиды, которые затем соединялись и падали на образующуюся Землю. Выделившейся при таком ударе энергии достаточно, чтобы нагреть на сотни градусов слой толщиной больше поперечника упавшего тела. Следовательно, при диаметре астероида 1000 км глубина разогрева достигала 1000 км. В.С.Сафронов полагает, что заметная часть **энергии падения** больших тел оставалась внутри Земли и могла нагреть верхние её слои на 1000°C.

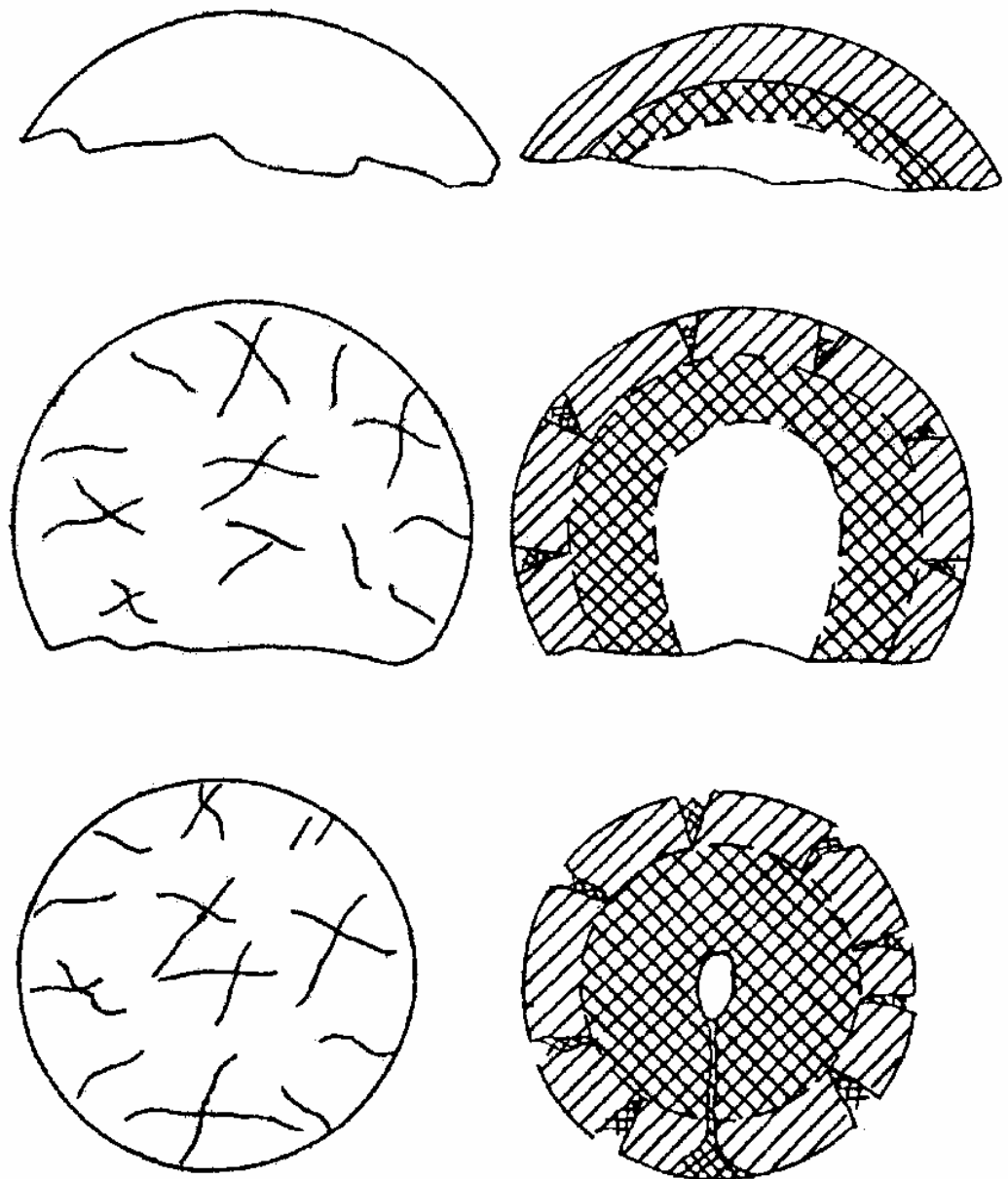


Рис. 6. Формирование Луны и других крупных спутников из сферических сегментов разрушенных планет

Гравитационная дифференциация массы вещества различного химического состава за первый миллиард лет существования Земли привела к разделению недр на условно ферромагнитное железо-никелевое ядро и силикатную оболочку. При этом выделяющаяся гравитационная энергия в центре Земли составляет  $9,2 \cdot 10^{31}$  Дж, что вдвое больше необходимого, чтобы расплавить ядро. То, что недра Земли именно такие, подтверждают метеориты – осколки столкнувшихся астероидов, они бывают лишь двух видов: каменные (хондриты и ахондриты) и железо-никелевые метеориты, соответственно из внешних и внутренних осколков астероидов. Хотя плотное ядро планет земной группы, по видимому, теряет право называться железо-никелевым, т.к. чрезмерные напряжения здесь приводят к раздавливанию и молекул и атомов и ядер. Остатки молекул, атомов и ядер, обладающие электрическим зарядом, под воздействием вращения Земли - выстраиваются в диполь (теперь плюс у Южного полюса, а минус – у Северного), так возникает магнитная ось Земли. Эта ось не совпадает с географической осью вращения Земли на  $11^\circ$ , видимо, из-за воздействия сил Лоренца.

Формирование Земли как планеты, сопровождавшееся падением астероидов и метеоритов, продолжалось около 100 млн. лет, т.е. **образование Земли** из астероидов и метеоритов **заняло лишь 2% времени** от всей жизни нашей планеты. Таким образом, первоначально недра Земли были разогреты, и на глубине нескольких десятков километров существовал слой, где породы были в расплавленном состоянии, эти расплавы изливались на земную поверхность. Таким образом, стадия «бомбардировки» Земли сменилась более продолжительной по времени стадией почти сплошных вулканических излияний. В этот период жизни нашей планеты, который длился много сотен миллионов лет, её поверхность была почти сплошь усеяна вулканами, извергавшими лаву. Излившаяся лава застывала - так образовалась первичная земная кора. И водная оболочка Земли (гидросфера) - тоже возникла в результате излияния базальтов и выноса в этом процессе воды в виде пара. Температура на поверхности Земли со временем понижалась, и наступил момент, когда выделявшиеся из недр Земли водяные пары сконденсировались в жидкую воду (сплошные потоки воды с небес – **первый Всемирный потоп**, но его никто не видел).

С этого времени начинается геологическая стадия развития Земли. Геологические процессы разделяют на два типа. С одной стороны, это подземные вулканические и иные силы, приводящие к излиянию лав и подъёму или опусканию земной коры; с другой — процессы разрушения, эрозия горных пород, перенос их водами и ветром по земной поверхности.

Пока на Земле вода была только в парообразном состоянии, переноса горных пород практически не происходило. Вулканические горы ещё не размывались, а пониженные места рельефа между вулканами **не заполнялись осадками**. С появлением же на Земле жидкой воды впервые возникли осадочные породы, отлагавшиеся в неглубоких тогда ещё морских водоёмах. В результате поверхность планеты стала более ровной, т.к. высокие вулканы разрушались и постепенно исчезали с земной поверхности (если, конечно, подземный очаг переставал работать). Хотя поверхность планеты уже остыла, на небольшой глубине земные породы были по-прежнему разогреты и потому доста-

точно пластичны. В этот период земная кора ещё не трескалась и крупных **разломов не существовало**.

Примерно 300-500 млн. лет назад Земля вступила в современную стадию эволюции, которую называют **океанической**, важнейшей особенностью этой стадии является **уничтожение мощной континентальной коры** и превращение её в тонкую (5-7 км), в океаническую. Но для полного уничтожения континентов потребуются ещё сотни миллионов лет. Главной особенностью процесса океанообразования является то, что, начавшись в пределах относительно узкой линейной зоны, он затем постепенно расширялся, захватив к настоящему времени пространство, превышающее площадь материков. Какие глубинные условия определяли начало процесса океанообразования, остаётся неизвестным, предполагают, что в основе лежит разогревание Земли в результате гравитационного сжатия и радиоактивного распада.

В последние 20 лет сенсацией стали переводы Захария Сичина (США), Эрика фон Дэникена (Швейцария) и других исследователей Месопотамии - **шумерских клинописных табличек** с текстом о сотворении Земли и людей<sup>1</sup>. Все эти новые сведения подтверждаются данными планетологии, геологии, археологии и других наук. Итак, примерно 4-5 миллиардов лет назад планета Тиамат, находившаяся на орбите между Марсом и Юпитером, столкнулась с астероидом, размером с Марс, из планетной системы блуждающей малой звезды Нибиру (период обращения которой 3600 лет). В результате столкновения Тиамат, на 3/5 покрытая водой, была выбита со своей орбиты, потеряла свою первичную атмосферу (состоявшую из водорода, инертных и мантийных газов и имевшую температуру около 600<sup>0</sup>С) и раскололась, так образовался пояс астероидов. На новой орбите расколота планета возродилась как Земля с огромной впадиной на 40% её поверхности глубиной до 19 км, в которую тут же собралась почти вся вода и до сих пор эта оспина постепенно зарастает базальтом, а первичная земная кора, частично расплавившись и расколовшись на ряд блоков-плит, заново кристаллизуется. Тогда же, 4 млрд. лет назад, окончательно сформировалось ядро Земли, чуть позже – современная атмосфера и гидросфера, активное же выделение земной коры из мантии продолжалось, вероятно, вплоть до палеозоя.

### **Природа пластичности твёрдых тел**

Атомы твердых тел находятся в узлах условной кристаллической решётки (см. рис. 7). С энергетической точки зрения каждый атом кристаллической решетки находится в потенциальной яме (см. рис. 8).

**Глубина потенциальной ямы ( $U_0$ )** - это та энергия, которую надо затратить, чтобы “вытащить” атом из кристаллической решетки. Эта энергия равна энергии сублимации<sup>2</sup> твердого тела в расчёте на один атом. Например, для железа энергия сублимации порядка  $4.4 \cdot 10^5$  Дж/моль. Атомы, находящиеся в уз-

---

<sup>1</sup> а) Конелес В.Ю. Сошедшие с небес и сотворившие людей.- М.: Вече, 2000, 576 с.; б) Däniken E. von. The Gold of the Gods. New York, Bantam Book, 1972.

<sup>2</sup> **Сублимация** – процесс перехода вещества из твёрдого состояния в газообразное, минуя жидкостное.



лах кристаллической решетки, совершают колебания около положения равновесия. Средняя энергия этих тепловых колебаний порядка  $E_T \approx kT$ , где  $k$  – постоянная Больцмана ( $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К). При комнатной температуре ( $T=300$  К)  $E_T=4 \cdot 10^{-21}$  Дж, а при температуре  $T=1000$  К – уже  $E_T=1.4 \cdot 10^{-20}$  Дж.

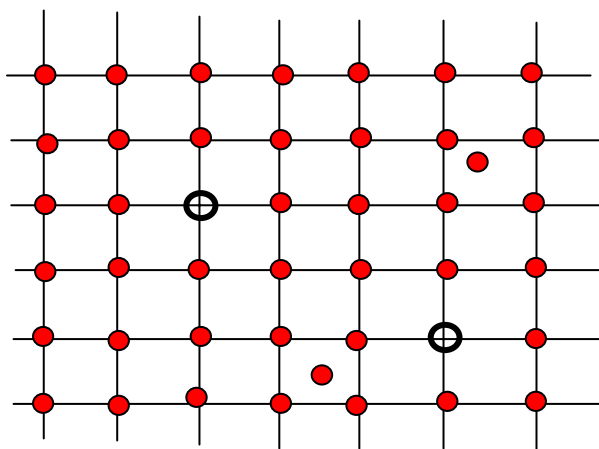


Рис. 7. Схема кристаллической решетки

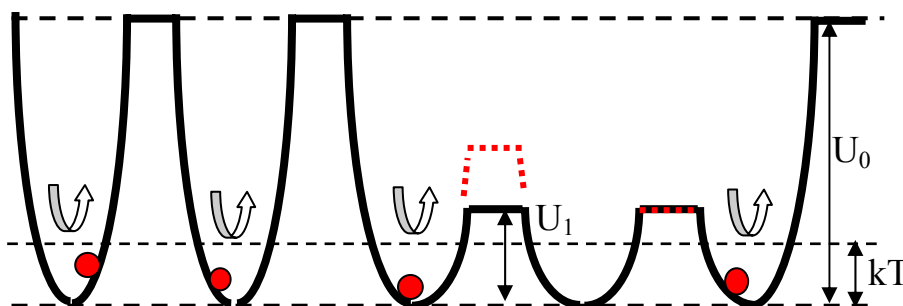


Рис. 8. Энергетические ямы

Очевидно, что при умеренных температурах средняя энергия теплового движения значительно меньше  $U_0$ . Но в макроскопическом теле всегда есть некоторое количество частиц, энергия которых в несколько раз превосходит среднюю энергию теплового движения. Если атом приобретает энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера ( $E > U_0$ ), то он может покинуть “свой” узел решетки и начать движение между атомами, находящимися в узлах решетки. В том месте, где находился атом, образуется вакансия (незакращенные кружки на рис. 7). Если атом в процессе своего движения окажется вблизи такой вакансии – произойдет рекомбинация: атом займёт свободное место и исчезнет свободный атом и вакансия. При отсутствии **внешних воздействий** вакантный узел будет занят любым из соседних атомов и вакансия будет совершать случайные движения по телу.

Но если тело находится в напряжённом, деформированном состоянии, то появляется преимущественное направление движения вакансий. Действительно, в результате деформации нарушается симметрия потенциальной энергии вблизи вакансий, например, у всех вакансий высота потенциального барьера

слева становится больше, чем высота правого барьера (см. рис. 8). В результате увеличивается вероятность того, что вакансии будут заняты атомами, находящимися справа, и вакансии, в среднем, переместятся направо. В результате направленного движения вакансий происходит изменение формы тела, и уменьшаются действующие в этом теле напряжения.

С ростом температуры тела тоже растёт движение вакансий и время релаксации<sup>3</sup> упругих напряжений равно:

$$\text{при } T=300 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \tau \approx 10^{39} \text{ с} \approx 3 \cdot 10^{31} \text{ лет}$$

$$T=600 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \tau \approx 10^{13} \text{ с} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ лет}$$

$$T=700 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \tau \approx 2 \cdot 10^9 \text{ с} \approx 60 \text{ лет}$$

$$T=900 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \tau \approx 2 \cdot 10^4 \text{ с} \approx 6 \text{ часов}$$

$$T=1000 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \tau \approx 400 \text{ с}$$

Рассмотрим **физический смысл времени релаксации**. Если время воздействия меньше времени релаксации, то вещество ведёт себя как твёрдое тело. Время релаксации упругих напряжений холодных пород, которые находятся вблизи поверхности Земли ( $T=300-400 \text{ } ^\circ\text{K}$ ) превосходит возраст Земли, поэтому во всех геологических процессах эта часть Земли ведёт себя как твёрдое, хрупкое тело. При увеличении температуры с глубиной - время релаксации уменьшается, однако оно зависит не только от температуры, но и от температуры плавления, которая тоже изменяется с глубиной.

### **Температура плавления и реология горных пород**

Горная порода обычно состоит из нескольких минералов, которые имеют разную температуру плавления. Температура, при которой плавится наиболее легкоплавкий минерал, называется **температурой солидуса**, а температура плавления наиболее тугоплавкого – температурой ликвидуса. Очевидно, что механические свойства горной породы (прочность, пластичность) определяются температурой солидуса, иначе - температурой плавления горной породы.

Известно, что температура плавления горных пород возрастает с глубиной: в среднем она увеличивается на  $3 \text{ } ^\circ\text{K}$  на каждый километр глубины. Температура плавления силикатов при атмосферном давлении порядка  $1100-1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Зависимость температуры  $T_S$  солидуса от глубины изображена на рис. 9.

Температура  $T$  массива также увеличивается с глубиной. Скорость роста температуры называется геотермическим градиентом и обозначается  $\Gamma$ . Непосредственное измерение температуры и определение геотермического градиента возможно только до глубины порядка  $10 \text{ км}$  (глубокие и сверхглубокие научные скважины). Величина  $\Gamma$  различна в разных районах Земли, его обычное значение  $\Gamma=(0.01 \div 0.02) \text{ К/м}$ . Легко оценить глубину  $Z_1$ , на которой должна достигаться температура солидуса (пересечение пунктирной и сплошной линий на рис. 9), если скорость изменения температуры на больших глубинах такая же, как и вблизи поверхности:

$$Z_1=(70 \div 160) \text{ км}$$

---

<sup>3</sup> **Релаксация** – снижение уровня внутренних напряжений.

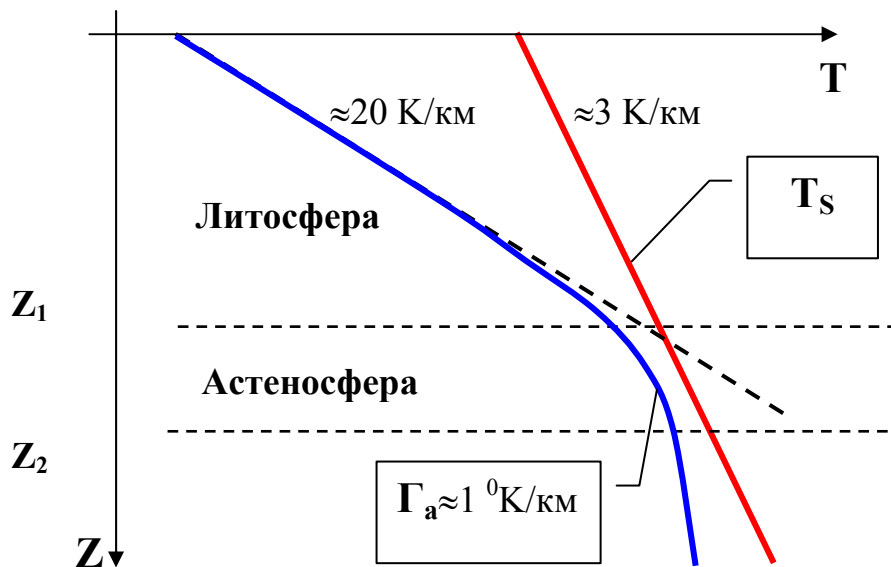


Рис. 9. Зависимость температуры  $T_s$  солидуса от глубины

Ниже горизонта  $Z_1$  порода должна была бы находиться в расплавленном состоянии. Согласно сейсмическим данным на глубине 100-300 км действительно фиксируется снижение скорости распространения сейсмических волн и увеличение скорости их затухания, что интерпретируется как частичное (3-7%) плавление горных пород. Температура пород на больших глубинах (более 300-500 км) увеличивается с глубиной со скоростью порядка 1 К/км (см. рис. 9) и разница между температурой породы и температурой плавления возрастает. Поскольку эффективная вязкость зависит от того, насколько температура породы близка к температуре плавления, то выделяют интервал глубин, где вязкость породы минимальна. Этот наиболее пластичный слой и называется **астеносферой**. Вышележащие холодные твердые породы называются **литосферой**.

### Адиабатический градиент температуры

На рис. 10 приведена зависимость внешнего давления (**а**) и температуры тела (**б**) от глубины. Скорость изменения температуры тела с глубиной, вызванная его сжатием,  $\Gamma_a = \Delta T / \Delta Z$  называется адиабатическим градиентом температуры.

Если температура некоторого объемного тела выше температуры среды ( $T_{a1} > T_0$ ), то его плотность меньше, и тогда появляется выталкивающая сила (сила Архимеда)  $F_a$ . Если температура среды увеличивается с глубиной, но скорость увеличения температуры всё же меньше адиабатического градиента температуры  $\Gamma_2 < \Gamma_a$  - тогда тоже появляется выталкивающая сила.

Но если температура среды увеличивается с глубиной быстрее, чем при адиабатическом сжатии  $\Gamma_2 > \Gamma_a$ , то при перемещении этого тела вниз его температура оказывается меньше, чем температура окружающей среды. В этом случае сила Архимеда направлена вниз.

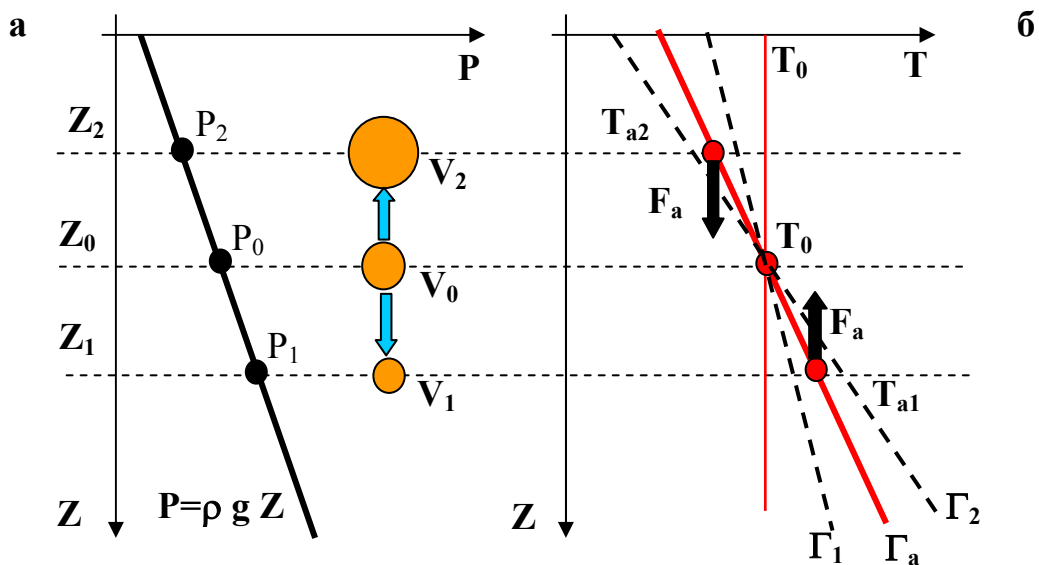


Рис. 10. Зависимость внешнего давления ( $P$ ) и температуры тела (объёмом  $V$ ) от глубины ( $Z$ )

Следовательно, если скорость увеличения температуры с глубиной (градиент температуры) меньше адиабатического градиента температуры  $\Gamma < \Gamma_a$ , то **среда устойчива**. Случайные перемещения масс в такой среде приводят к появлению сил, стремящихся вернуть эти массы в исходное положение.

Среда **неустойчива**, если скорость увеличения температуры с глубиной (градиент температуры) превосходит адиабатический градиент температуры  $\Gamma > \Gamma_a$ . Тогда случайное, сколь угодно малое перемещение любых масс вещества вверх или вниз приводит к появлению силы, которая стремится удалить эти массы от первоначального положения. В такой среде может самопроизвольно возникнуть движение вещества (**вулканизм**).

Самопроизвольное движение вещества в поле сил тяжести под действием градиента температуры (температура увеличивается с глубиной) называется свободной **тепловой конвекцией** (СТК).

Величина адиабатического градиента определяется в основном коэффициентом температурного расширения и удельной теплоёмкостью вещества:

- для воды  $\Gamma(T=300 \text{ } ^\circ\text{K})=0.14 \text{ K/км}$ ;
- для пород на глубине 200-300 км  $\Gamma(T=1500 \div 2000 \text{ } ^\circ\text{K})=(0.25 \div 0.6) \text{ K/км}$ .

В верхней части земной коры геотермический градиент приблизительно равен  $20 \text{ K/км}$ , т.е. значительно превосходит адиабатический градиент температуры, среда неустойчива, но движение пород здесь невозможно, т.к. холодные породы не пластичны.

На глубинах свыше 100-200 км породы пластичны и при выполнении условия  $\Gamma > \Gamma_a$  возможно свободное тепловое движение вещества, т.к. появляются

силы Архимеда, но в среде действуют и силы вязкости, которые препятствуют движению.

### Кондуктивная и конвективная теплопередача

Кондуктивная теплопередача - это передача тепловой энергии по неподвижному телу (от горячего участка к холодному). Скорость передачи зависит от материала тела и называется **теплопроводностью**, теплопроводность вещества равна плотности теплового потока при единичном градиенте температуры (1 °К на 1 м).

За счёт кондуктивной теплопередачи Земля за время своего существования успела бы остыть лишь на 370 км. Эта величина значительно меньше радиуса Земли ( $R=6370$  км).

Более эффективно передача тепловой энергии осуществляется вместе с движущимся веществом (магмой). При движении мантийных пород со скоростью порядка 1 см/год теплопередача имеет, в основном, конвективную природу, причем в геологическом масштабе времени (десятки миллионов лет) изменение температуры может достигать сотен градусов.

### Свободная тепловая конвекция

При наличии конвективного движения жидкости поток тепловой энергии возрастает в несколько (число  $Nu$  - число Нуссельта). Он равен единице при отсутствии движения жидкости. Число Нуссельта показывает, во сколько раз полный тепловой поток (кондуктивный + конвективный) больше, чем чисто кондуктивный тепловой поток.

Поток тепловой энергии пропорционален разности температур  $\Delta T$ . Если постепенно увеличивается эта величина, то при достижении критического значения  $\Delta T^*$  начинается конвекция и одновременно, скачком, в 10 раз увеличивается поток энергии от горячей поверхности к холодной. Схематически зависимость потока тепловой энергии от разности температур  $Q=Q(\Delta T)$  изображена на рис. 11.

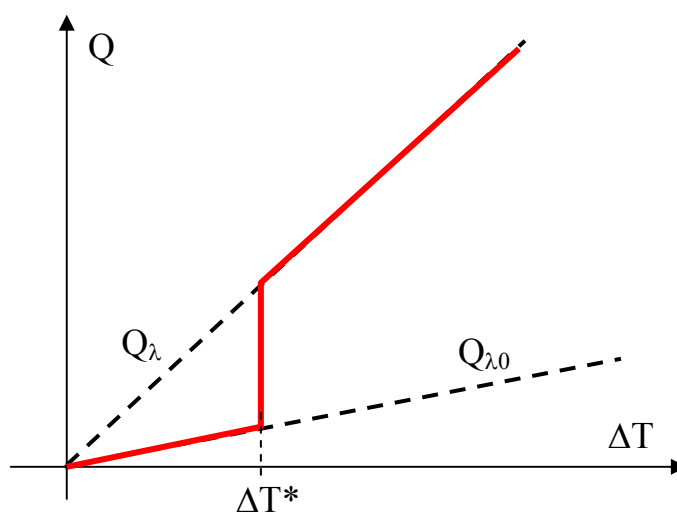


Рис. 11. Зависимость потока тепловой энергии от разности температур

Верхняя часть мантии (интервал глубин 150-650 км) характеризуется следующими параметрами:

- эффективная вязкость  $\eta=10^{21}$  Па\*с;
- плотность  $\rho=3*10^3$  кг/м<sup>3</sup>;
- кинематическая вязкость  $\nu=\eta/\rho=3*10^{17}$  м<sup>2</sup>/с;
- температуропроводность  $a=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;
- объёмный коэффициент температурного расширения  $\beta = 3*10^{-5}$  К<sup>-1</sup>;
- толщина слоя  $b\approx 500$  км.

Поэтому в верхней мантии всегда **происходит конвекция вещества** и эффективность теплопередачи в верхней мантии в  $Nu\approx 20$  раз больше, чем в случае неподвижного вещества. А резкое уменьшение градиента температуры в верхней мантии (на глубине 150 –650 км) вызвано конвекцией мантийного вещества. Ниже, кондуктивный механизм теплопередачи в литосфере изменяется на гораздо более эффективную конвективную теплопередачу в астеносфере.

### Радиационная геохронология Земли

Относительный возраст осадочных горных пород (не подвергавшихся тектоническим подвижкам) приближенно определяется глубиной залегания: глубже залегают породы, имеющие бóльший возраст. Для определения абсолютного возраста пород используют различные радиоизотопные методы. Абсолютный возраст пород имеет громадное значение, без этого невозможно разрабатывать модели геологических процессов.

Как известно, все элементы (кроме водорода и гелия) образовались в недрах массивной звезды – предшественницы Солнца и имеют возраст порядка 6-7 миллиардов лет. Тяжёлые элементы, масса которых больше железа, образовались на заключительной стадии эволюции этой звезды. В космическом облаке, образовавшемся после взрыва сверхновой, находилось большое количество нестабильных, радиоактивных изотопов. В результате  $\alpha$ - и  $\beta$ -распада,  $\gamma$ -излучения ядер - большинство из этих изотопов превратились в стабильные элементы. В настоящее время существует только три элемента, обладающие **естественной радиоактивностью**: уран (изотопы  ${}_{92}\text{U}^{235}$  и  ${}_{92}\text{U}^{238}$ ), торий  ${}_{90}\text{Th}^{232}$  и калий  ${}_{19}\text{K}^{40}$ .

Возраст химических элементов не имеет никакого отношения к возрасту горных пород. Под **возрастом пород** понимают время, прошедшее после кристаллизации (затвердевания) этой породы. До этого события элементы, образующие решетку, могут относительно свободно перемещаться в пространстве, находясь в газовой или жидкой фазе. Но после образования кристаллической решетки атомы (например, урана) зафиксированы в решетке, и после превращения урана в свинец количество урана в образце уменьшается, а количество свинца – увеличивается. Поэтому, чем больше возраст породы - тем больше относительное содержание свинца в этой породе.

Если в момент образования кристаллической решётки в рассматриваемом образце породы было некоторое количество атомов изотопов урана ( $\text{U}^{238}$  и  $\text{U}^{235}$ ) и свинца, а весь имеющийся в настоящее время свинец ( $\text{Pb}^{206}$  и  $\text{Pb}^{207}$ ) образо-

вался при распаде урана, тогда уравнение радиоактивного распада урана можно записать в виде:

$$\frac{Pb^{206}}{Pb^{207}} = \frac{U^{238}}{U^{235}} \cdot \frac{e^{-\frac{t}{\tau_1}} - 1}{e^{-\frac{t}{\tau_2}} - 1}$$

где  $t$  - это время, прошедшее после того, как в кристаллической решетке было зафиксировано суммарное количество урана и свинца, т.е. возраст горной породы;

$\tau$  - время жизни радиоактивного изотопа урана;

$U^{238} / U^{235}$  и  $Pb^{206} / Pb^{207}$  - современное соотношение количества атомов изотопов урана и свинца, определяется экспериментально методами масспектрометрии.

### Догеологическое развитие Земли

На рис. 12 приведена геохронологическая таблица. Цифры на рисунке соответствуют количеству миллионов лет до настоящего времени. Например, палеозой начался 600 и закончился 230 миллионов лет до настоящего времени. Толстая красная полоса в левой части рисунка с цифрой 100 соответствует периоду образования Земли из межпланетного облака, который продолжался приблизительно 100 миллионов лет.

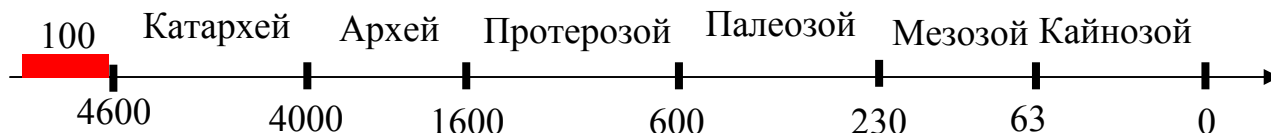


Рис. 12. Геохронология Земли

Самые древние обнаруженные на Земле породы имеют возраст около 3.6-3.8 миллиарда лет, т.е. относятся к Архейскому периоду. А первые 600 миллионов лет не оставили следов в каменной летописи Земли, поэтому этот период называют догеологическим. Что происходило на Земле в этот период - было обосновано В.С.Сафроновым в результате физико-математического моделирования процесса аккреции и начального этапа эволюции Земли.

Итак, образование первоначальной Земли из облака космической пыли продолжалось приблизительно 100 миллионов лет. Изменения температуры с глубиной от поверхности Земли в первоначальный период её истории - приведены на рис. 13.

Температура имела наибольшее значение (около 1600 °K) на глубине около 1000 км, причём в экваториальной области температура была выше, чем у полюсов, т.к. вращалось межпланетное облако примерно в одной плоскости эклиптики и падение планетозималей происходило, в основном, в экваториальной области. На поверхности температура была значительно ниже оттого, что Земля охлаждалась с поверхности, излучая тепловую энергию в космос. Низкая тем-

пературы центра Земли (около  $800^{\circ}\text{K}$ ) объясняется неравномерным выделением энергии в процессе аккреции. Основная часть потенциальной гравитационной энергии выделялась на заключительной стадии создания планеты, когда **на её поверхность падали громадные глыбы** и даже небольшие планеты (планетозимали), образовавшиеся самостоятельно в процессе аккреции на большом расстоянии от основной планеты.

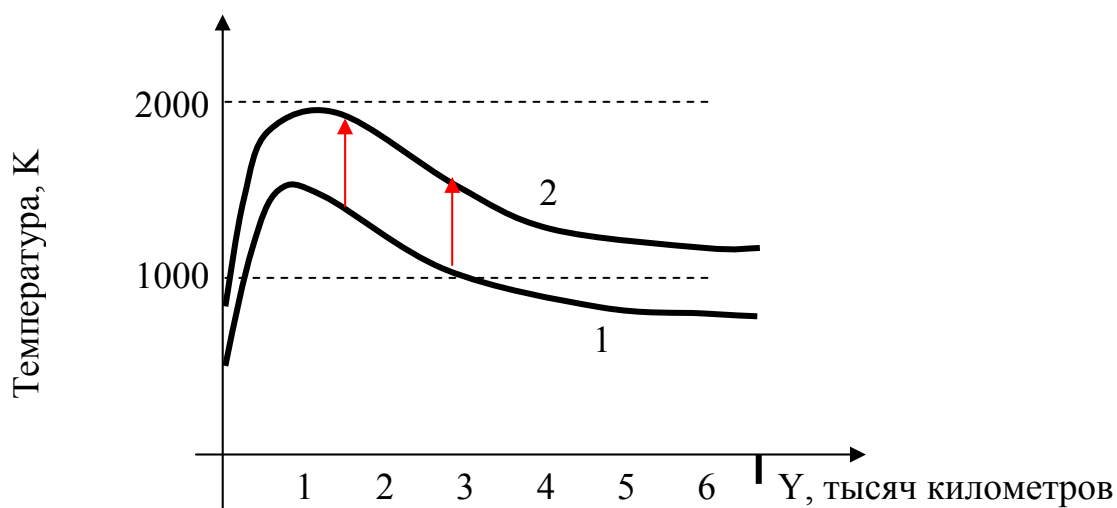


Рис. 13. Изменения температуры среды с глубиной первоначальной Земли:  
 1 – в конце первых 100 млн. лет;  
 2 – в начале первых 600 млн. лет

Предполагается, что планета была приблизительно **однородной по составу**, и, например, кубический километр вещества из центра Земли, в среднем, имел тот же элементный состав (доля железа, кремния и т.д.) что и вблизи поверхности. Однородность только что образовавшейся Земли связана с механизмом слипания отдельных глыб, а именно. Планетозималь, образовавшаяся из космической пыли в центре межпланетного облака, окажется в центре Земли, а такая же планетозималь, но образовавшаяся на периферии этого облака, достигнет поверхности Земли в конце процесса аккреции и будет находиться в поверхностном слое Земли.

Температура земных недр была относительно невелика, вязкость очень большая – т.е. вещество Земли было пока твёрдым (не пластичным). **Конвективное движение вещества в недрах Земли было невозможно.**

В то время Земля вращалась вокруг своей оси гораздо быстрее – сутки продолжались около 6 часов. По одной из версий, **Протолуна** была самостоятельной небольшой планетой, вращающейся вокруг Солнца и она была захвачена гравитационным полем Земли во время процесса аккреции. Расстояние от Земли до Луны в то время было в несколько раз меньше, чем сейчас и большую роль в образовании и ранней эволюции Земли сыграло приливное взаимодействие этих планет. Твёрдая Земля испытывает приливные деформации – подъём обращенной к Луне поверхности Земли в настоящее время составляет около 0.5



м, а 4.5 миллиарда лет тому назад высота приливной волны твердой Земли достигала **15 м**.

В процессе приливной деформации Земли и Луны происходит **превращение механической энергии системы Земля-Луна в тепловую энергию**, следствием этого процесса является нагрев Земли. Кроме того, уменьшается скорость вращения Земли вокруг своей оси (увеличивается продолжительность суток), а скорость вращения Луны вокруг своей оси замедлялась и, наконец, Луна остановилась, и поэтому мы всегда видим лишь одну сторону Луны.

На начальной стадии эволюции Земли существовало два основных внутренних источника энергии, за счёт которых происходило увеличение температуры земных недр: выделение энергии лунных приливов, радиогенное тепло-выделение нестабильных изотопов (в первую очередь - уран, торий, калий), содержащихся в веществе Земли.

Например, в результате радиоактивного распада урана образуется  $\alpha$ -частица (ядро атома гелия), имеющая скорость порядка  $10^7$  м/с и обладающая кинетической энергией в несколько Мэв. При соударении с окружающими атомами  $\alpha$ -частица теряет эту энергию (которая и идёт на нагрев массива) и, захватывая электрон, - превращается в атом гелия. В конечном итоге нестабильное ядро тория превращается в свинец и результатом цепочки распада является выделение тепловой энергии и **замена урана на свинец и атом гелия**.

Согласно теоретическим моделям, разогрев твердой первоначальной Земли за счёт приливной и радиационной энергии продолжался приблизительно 500 млн. лет. На глубине 500-1000 км, в первую очередь в экваториальной области, была достигнута температура солидуса (см. кривая 2 на рис. 13), и начался процесс плотностной дифференциации вещества Земли. Как правило, более тугоплавкие компоненты горной породы имеют большую плотность и после плавления легкоплавкой компоненты тяжёлые тугоплавкие зёрна опускаются на “дно” этой области, вытесняя лёгкие компоненты наверх (см. рис. 14).

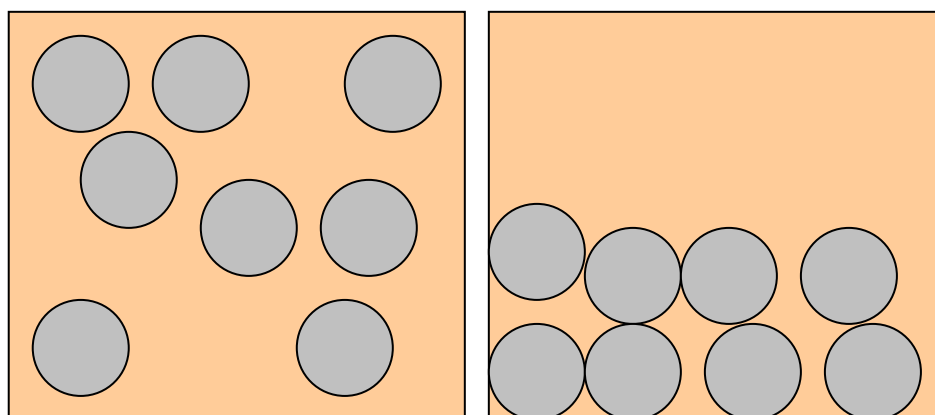


Рис. 14. Плотностная дифференциация неоднородного вещества при плавлении лёгких компонентов среды

При этом потенциальная гравитационная энергия тугоплавких зёрен уменьшается, т.к. она идёт на **нагрев системы за счёт вязкого трения**, возникающего в пластичной компоненте при опускании тугоплавких зерен. Например, при вертикальном опускании зёрен на 100 км в результате плотностной дифференциации температура может возрасти приблизительно на 100 °К. Причём плотностная дифференциация идёт с ускорением, т.к. она сопровождается увеличением температуры среды и, соответственно, уменьшением вязкости пластичного компонента.

Опускание вниз тяжёлых тугоплавких компонентов сопровождается подъёмом вверх часть лёгких пластичных компонентов (**в узком диапазоне глубин**), которые находились ниже и имели более высокую температуру. Таким образом, к верхней, твёрдой границе области дифференциации вместе с пластичным компонентом поступает большое количество тепловой энергии, что способствует расплавлению вышележащего вещества и тогда происходит увеличение размеров области дифференциации (**мощность расплавленной толщи растёт**).

Итак, предполагается, что к началу Архейского периода в результате увеличения толщины области плотностной дифференциации Земля могла иметь следующее строение (см. рис. 15):

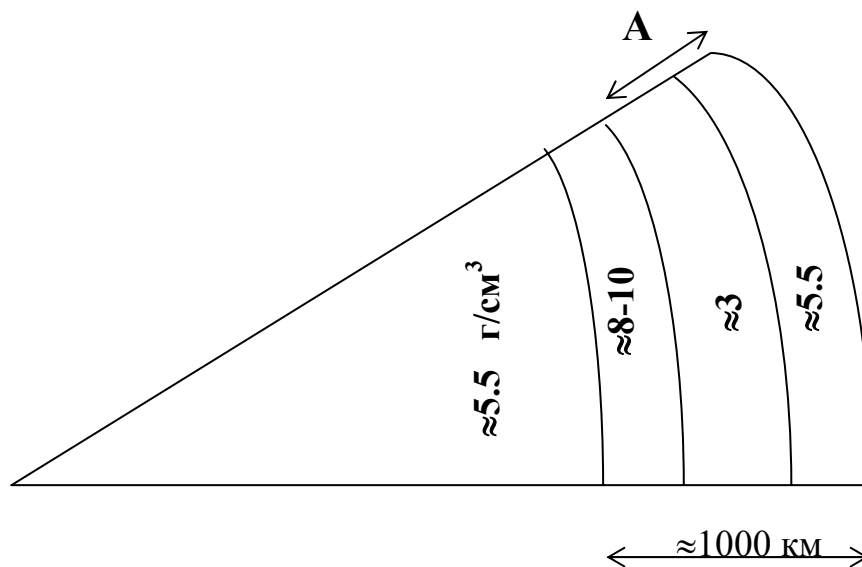


Рис. 15. Дифференциация внутренних областей Земли к началу Архейского периода

Верхняя, твёрдая оболочка Земли состоит из первоначального недифференцированного вещества и имеет плотность около 5.5 г/см<sup>3</sup>. Непосредственно под ним находится пластичное вещество с большим содержанием силикатов и плотностью около 3 г/см<sup>3</sup>. Ниже находятся тугоплавкие компоненты с большим содержанием железа и плотностью 8...9 г/см<sup>3</sup>. Ещё глубже находится снова первоначальное недифференцированное вещество с плотностью 5.5 г/см<sup>3</sup>.

Область А (см. рис. 15) **гравитационно неустойчива**, т.к. плотное вещество находится дальше от центра, чем менее плотное. Поэтому на определенной стадии увеличения размеров расплавленной области происходит **разрушение твёрдой оболочки** Земли, и она тонет в силикатном расплаве. Температура

этого расплава значительно выше, чем температура оболочки, поэтому она скоро нагревается, и происходит быстрая дифференциация этого вещества. При этом резко увеличивается скорость опускания тугоплавких зёрен – т.е. скорость образования тяжелого (железосодержащего) вещества, из которого в дальнейшем сформируется **ядро Земли**.

А на поверхности Земли в начале архейского периода оказывается силикатный расплав, он охлаждается и затвердевает, - так образовались наиболее **древние архейские породы**.

Следующим этапом эволюции является “затекание” тяжёлого ядерного вещества в центр Земли, из которого одновременно вытесняется относительно лёгкое вещество первичной Земли. Этот процесс сопровождается выделением большого количества гравитационной энергии, значительным увеличением температуры Земли и быстрым увеличением массы ядерного вещества.

Выделяют 4 временных **интервала эволюции ядра** (см. рис. 16).

I этап 4600-4000 миллионов лет до настоящего времени: процесс плотностной дифференциации ещё не начался, масса ядерного вещества равна нулю, идет постепенное увеличение температуры Земли за счёт выделения приливной и радиогенной энергии.

II этап 4000-3500 миллионов лет до настоящего времени: происходит формирование ядерного вещества на глубине 500-1000 км, первичная кора Земли погружается в силикатную магму, процесс идёт с всё возрастающей скоростью.

III этап 3500-2500 миллионов лет до настоящего времени: происходит “затекание” ядерного вещества в центр Земли, выделяется очень большое количество энергии, скорость плотностной дифференциации наибольшая.

IV этап 2500 миллионов лет до настоящего времени и в будущем следующие 3-5 миллиардов лет: в центре Земли находится “железное” ядро, масса которого постепенно увеличивается в процессе конвективного движения вещества в мантии, т.е. в области между твёрдой оболочкой Земли (литосферой) и ядром.

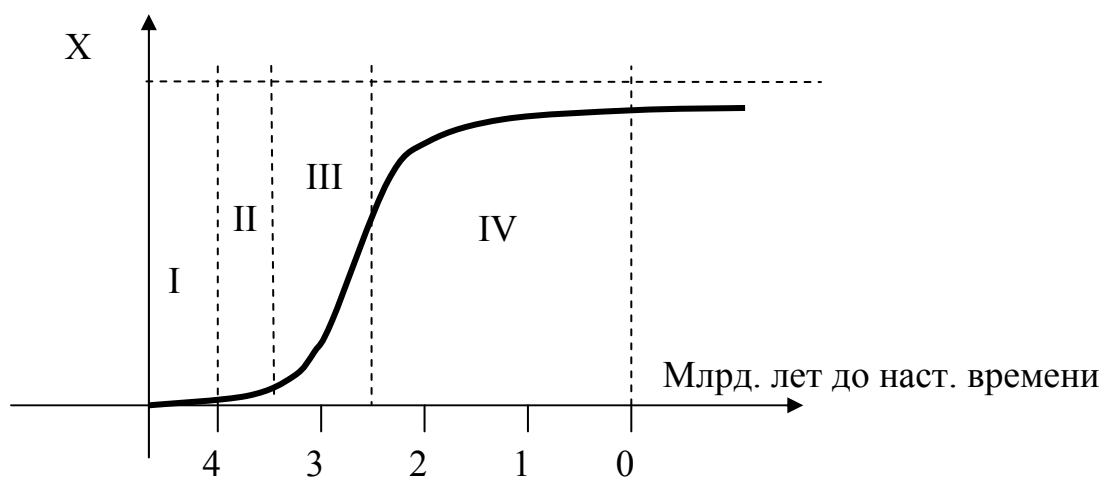


Рис. 16. Этапы формирования ядра Земли

В результате плотность вещества в центральной части ядра радиусом 3470 км приблизительно равна  $12 \text{ г/см}^3$ , а плотность внешней части Земли – около  $4 \text{ г/см}^3$ . И в последние 3 миллиарда лет выделяется энергия ( $\approx 0.15 \cdot 10^{32}$  Дж), вызванная вязким трением вещества при движении масс в недрах Земли.

#### 4. Физика геологических процессов

Ещё в 1855 г. было установлено (Эри и Пратт), что сила земного притяжения в горных районах, где сосредоточены громадные массы пород, практически не отличается от силы притяжения в равнинных районах. Объяснение просто: менее плотная литосфера плавает в более плотной, но пластичной мантии, как льдина плавает в более плотной воде.

Среднее значение плотности литосферы  $\rho_1 = 2800 \text{ кг/м}^3$ , а плотности мантийного вещества  $\rho_2 = 3300 \text{ кг/м}^3$ .

На рис. 17 схематически изображена равнинная и горная литосфера, имеющая плотность  $\rho_1$ , и мантия с плотностью  $\rho_2$ . Толщина горной литосферы равна  $(h+H)$ . Давление во всех точка плоскости, лежащих на определенной глубине (на глубине  $L$ ), должно быть одинаковым (явление **изостазии**), иначе – мантийное вещество должно было бы прийти в движение, которое выровняло бы давление.

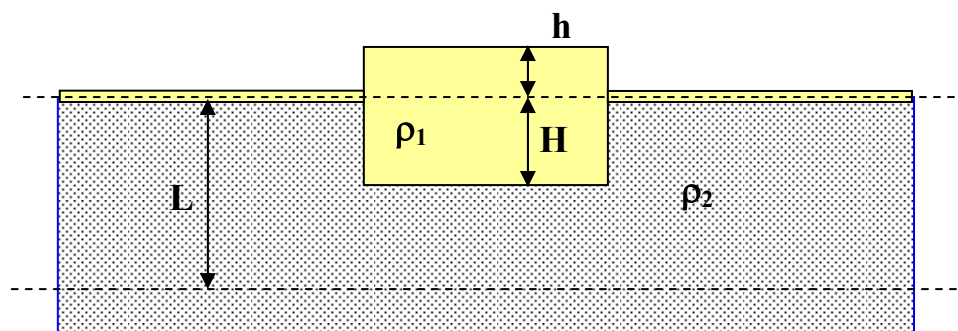


Рис. 17. Схема, поясняющая изостазию – равенство в мантии давления под горной и под равнинной литосферой

Таким образом, экспериментально наблюдаемое равенство сил гравитационного притяжения в равнинных и в горных районах объясняется пластичностью мантийного вещества. Следствием этой гипотезы является существование “**корней гор**” – в горных районах должно быть значительное увеличение толщины литосферы, погруженной в мантию. Толщина этой части литосферы должна в 5-6 раз превышать высоту гор, т.е. она может достигать 40-50 км. Существование “корней гор” было подтверждено сейсмическими исследованиями, что является доказательством явления изостазии.

Другим доказательством существования твердой литосферы, плавающей в пластичной плотной мантии, является **последледниковое поднятие литосферных плит**. Известно, что 20-40 тыс. лет тому назад в северном полушарии было на 7-15 градусов холоднее, чем в настоящее время. На Балтийском щите было материковое оледенение толщиной 1-3 км, и под действием веса матери-

кового льда Балтийский щит погрузился в мантию. Приблизительно 11 тыс. лет тому назад произошло резкое потепление. В геологическом масштабе времени материковый лед растаял практически мгновенно и Балтийский щит начал постепенно “**всплывать**”. К настоящему времени центральная часть щита поднялась приблизительно на 100 м, а, например, Кольский полуостров – приблизительно на 40 м. Скорость послеледникового поднятия Балтийского щита может быть использована для оценки эффективной вязкости мантии, в которой “плавает” Балтийский щит (литосферная плита).

На рис. 18 схематически изображены три этапа:

I - положение литосферной плиты диаметром  $D$  перед оледенением;

II - плита погрузилась в мантию на глубину  $h$  под действием льда, имеющего массу  $M$  и толщину  $h_i$  ( $\rho_i \cdot g \cdot h_i = \rho \cdot g \cdot h$ ).

III – лёд растаял и на плиту действует выталкивающая сила  $F$ , равная весу растаявшего льда. Под действием этой силы плита всплывает со скоростью  $V$ .

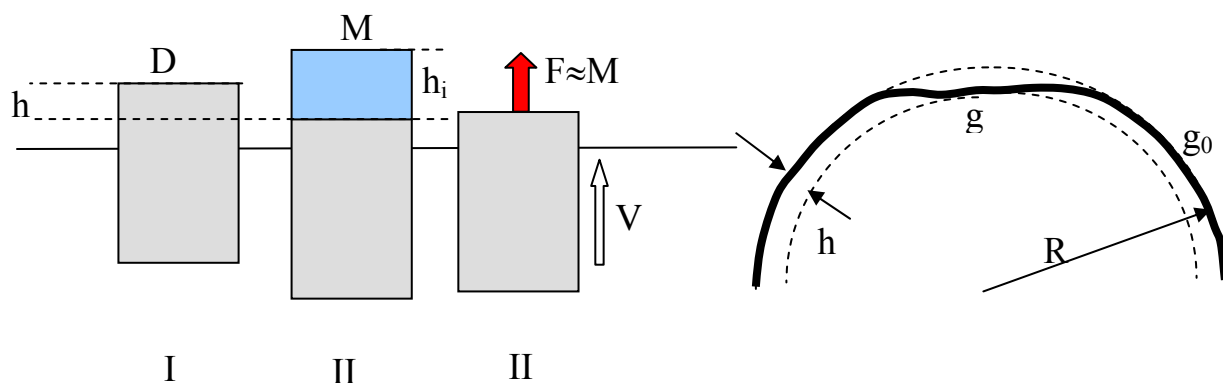


Рис. 18. Схема к расчёту вязкости мантии, испытывающей опускание и поднятие под весом льда

Скорость всплывания  $V$  определяется вязкостью  $\eta$  мантийного вещества. Время всплывания  $t_{\text{уп}} \approx 5000 \text{ лет} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ с}$ ,  $\rho \approx 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ . Если принять толщину слоя мантии с малой вязкостью (толщину астеносферы)  $L \approx 100 \text{ км}$ , то для вязкости этого слоя получаем:  $\eta \approx 5 \cdot 10^{20} \text{ Па/с}$ .

В настоящее время в районе Балтийского щита фиксируется отрицательная гравитационная аномалия около 40 мГл (1 галл = 1 см/с<sup>2</sup>,  $g_0 = 981 \text{ Гл}$ ). По этой величине можно оценить **будущее поднятие Балтийского щита** (до геоида) – оно составляет примерно 250 м.

Оттого, что литосферные плиты определённых размеров плавают в плотной и пластичной мантии, - появляются **латеральные напряжения**<sup>1</sup> в плитах (см. рис. 19).

<sup>1</sup> Латеральные – боковые, практически горизонтальные напряжения

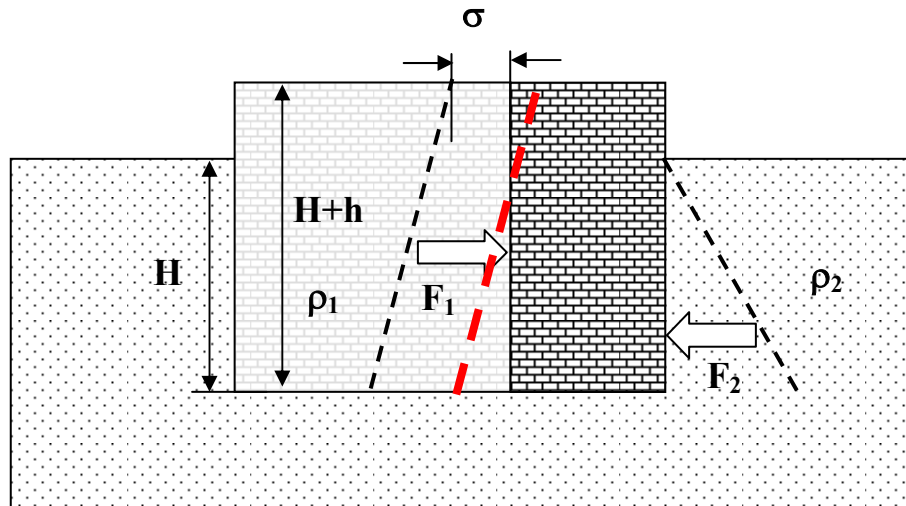


Рис. 19. Схема к расчёту латеральных напряжений в континентальной литосфере

Пусть плита, имеющая плотность  $\rho_1$  и толщину  $H+h$  ( $H$  – толщина той части плиты, которая находится ниже уровня поверхности мантии), плавает в мантии с плотностью  $\rho_2$ . Краевая часть литосферной плиты, испытывает выше некоторого уровня мантии растягивающее латеральное напряжение  $\sigma$  и только на глубине примерно в 9 км литостатическое напряжение возрастает настолько, что появляются силы сжатия.

### Внутреннее строение Земли

Данные о строении, составе и свойствах внутренних областей Земли получены за счёт косвенных наблюдений, т.к. прямые наблюдения доступны только по результатам, полученным из скважин, а самая глубокая скважина глубиной 12.6 км расположена на Кольском полуострове, но её глубина составляет лишь 0.2% от радиуса. До глубинных сейсмологических исследований представления о внутреннем строении Земли строились лишь на гипотезах.

На рис. 20 и 21 представлено схематически внутреннее строение Земли с изменением плотности земного вещества. В центре Земли расположено внутреннее твёрдое ядро. Оно имеет радиус около 1300 км и максимальную плотность. Далее идёт жидкое внешнее ядро, которое простирается до 3500 км от центра Земли. Жидкое и твёрдое ядро разделяет переходный слой около 200 км. Твёрдое ядро как бы “плавает” в жидком ядре.

На границе ядра наблюдается скачкообразное падение скорости сейсмических волн (от 13.6 до 8 км/с). Внутри ядра скорость постепенно возрастает и увеличивается скачком на границе внутреннего ядра (до 11.3 км/с). В твёрдом ядре скорость распространения сейсмических волн практически не меняется. Мощность мантии 2900 км. Ядро и мантию разделяет переходный слой около 200 км, в котором скачком снова изменяются характеристики среды. Мантия делится на слои **B** и **C**, образующие верхнюю мантию (толщиной 850-900 км), и слой **D** - нижнюю мантию (толщиной 2000 км).

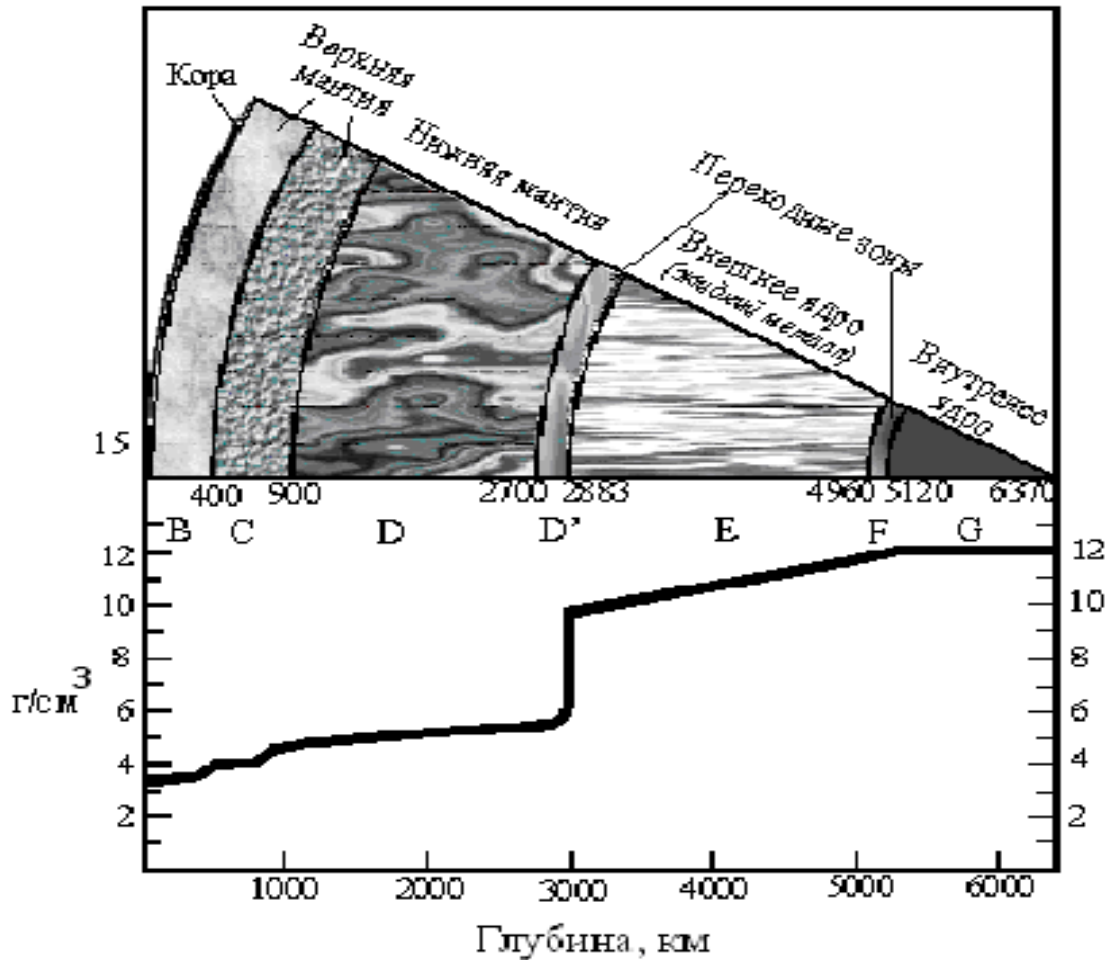
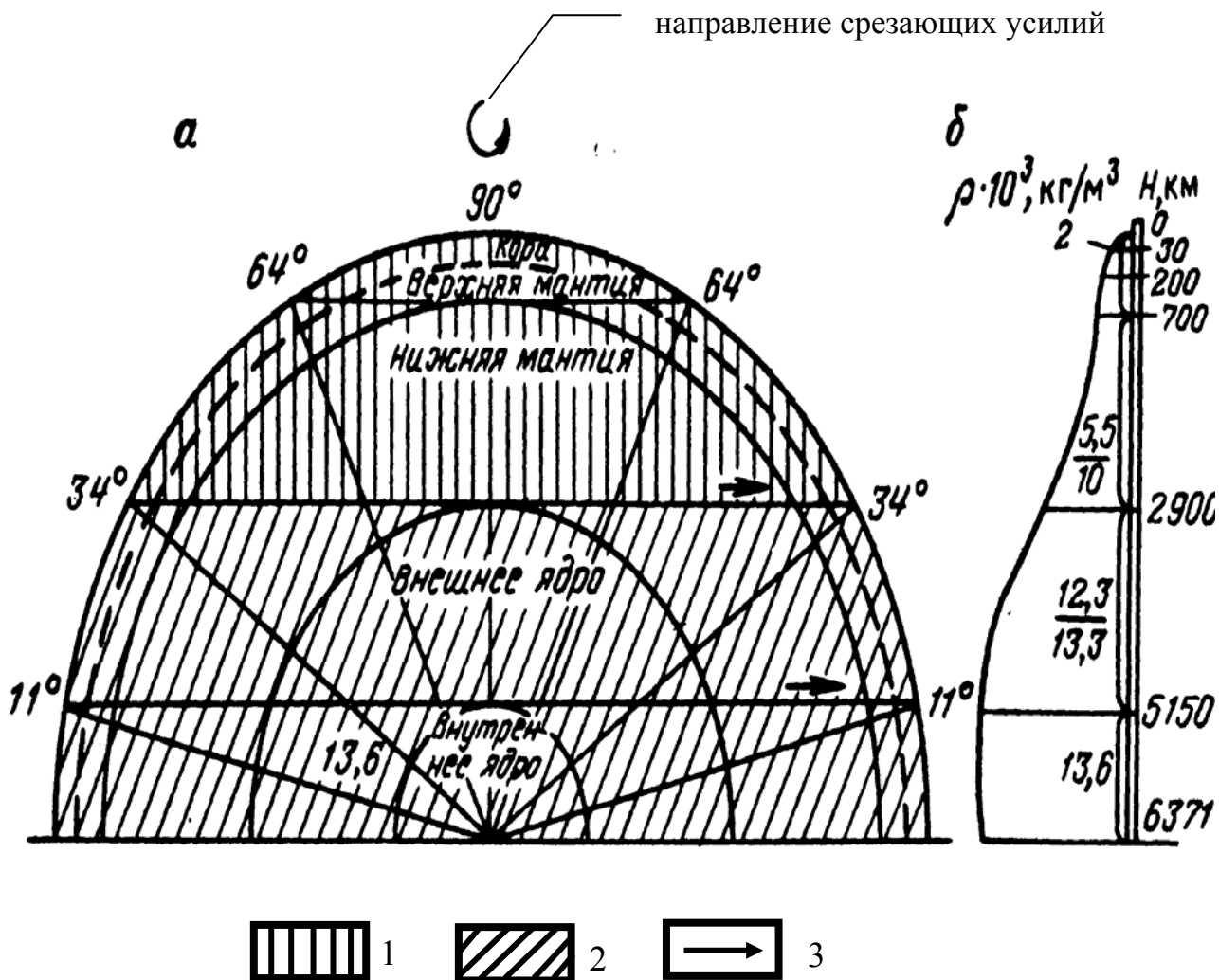


Рис. 20. Строение Земли с глубинами геосфер и изменение плотности земного вещества с глубиной

Нижнюю часть верхней мантии (слой **В**) называют слоем Гутенберга или астеносферой. **Астеносфера** расположена на глубине около 100 км под континентами и на глубине около 50 км под океанами. Нижняя граница астеносферы находится на глубине 250-350 км. Вязкость вещества в астеносфере резко уменьшается до  $10^{19}$  -  $10^{21}$  Па·с - по сравнению с окружающими астеносферу слоями ( $10^{23}$  Па·с), а температура вещества – наоборот, повышается до  $1500^{\circ}$  -  $1800^{\circ}\text{C}$  и близка к температуре плавления. В астеносфере обычно лежат очаги, подпитывающие вулканы.

Лежащий ниже астеносферы слой **С** называют слоем Голицына, он характеризуется быстрым нарастанием скорости сейсмических волн с глубиной от 8 до 11.3 км/с для поперечных волн и от 4.9 до 6.3 км/с для продольных волн. Предполагается также увеличение плотности вещества с глубиной от 3.6  $\text{г/см}^3$  до 4.5  $\text{г/см}^3$ .



**Рис. 21. Модель внутреннего строения (а) и график изменения плотности Земли «ρ» с глубиной «Н» (б):**  
 1 - верхняя "шапка" Земли; 2 - центральная часть;  
 3 - направление смещения земных масс

В нижней мантии плотность вещества постепенно возрастает с  $4.5 \text{ г/см}^3$  до  $5.6 \text{ г/см}^3$ , а на границе ядра скачкообразно меняется в переходной зоне до  $10 \text{ г/см}^3$ . Затем плотность с глубиной продолжает постепенно расти - до  $12.5 \text{ г/см}^3$  в центре Земли. Давление растёт с глубиной, но температура мантии не превышает температуру плавления.

Наружная сфера "твёрдой Земли" - земная кора. Это самая неоднородная и сложная земная сфера.

Кора отделяется от мантии **поверхностью Мохоровичича (Мохо)**, именно здесь скачком изменяется плотность вещества (с  $2.9\text{-}3.0 \text{ г/см}^3$  до  $3.1 - 3.5 \text{ г/см}^3$ ) и возрастают скорости сейсмических волн:

- для продольных волн с  $6.7\div 7.6 \text{ км/с}$  до  $7.9\div 8.6 \text{ км/с}$ ;
- для поперечных волн с  $3.6\div 4.2 \text{ км/с}$  до  $4.4\div 4.7 \text{ км/с}$ .



Земная кора подразделяется на две группы:

– континентальную кору (до 70 км глубины), состоит из трех слоев: осадочного (до 20 км), гранитного (от 10 до 40 км) и базальтового (от 10 до 70 км); базальтовый слой отделяется от гранитного - **поверхностью Конрада**;

– океаническая (менее 10 км), состоит из тонкого осадочного слоя (сотни метров), промежуточного (1-2,5 км) и базальтового слоя (около 5 км)

Встречается несколько типов промежуточного строения коры: субконтинентальный (под островными дугами и архипелагами) и субокеаническая (в глубоководных впадинах).

Кору (см. рис. 21), слой Мохоровичича, и верхнюю часть слоя мантии **В** называют **литосферой**. Химический состав коры представлен на рис. 22.

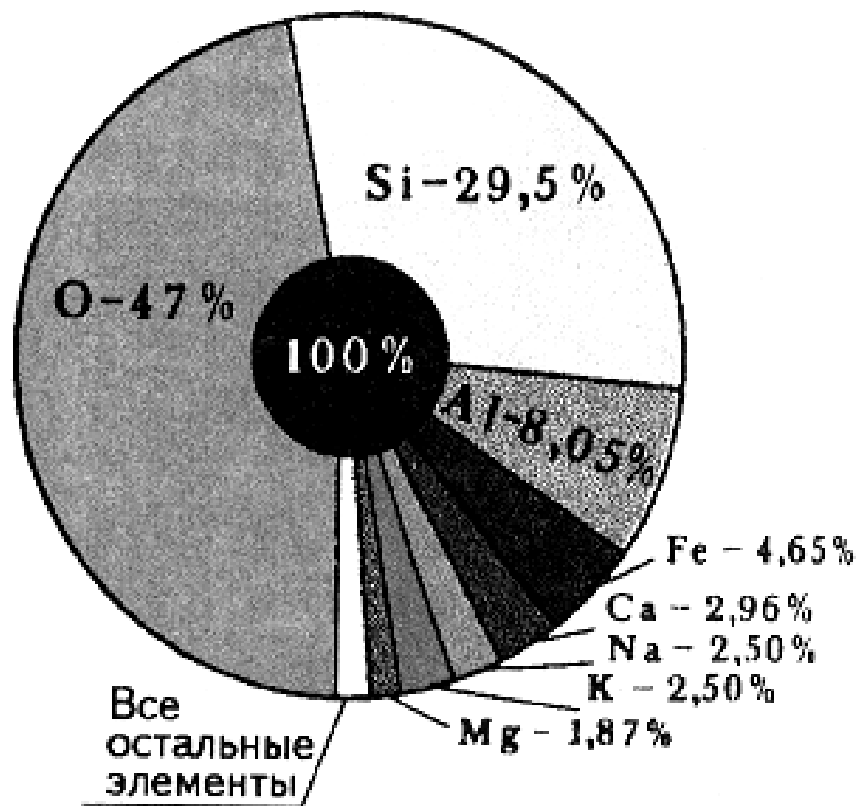


Рис. 22. Состав земной коры

Сейсмические исследования показали, что породы, лежащие ниже литосферы на глубине 100-670 км обладают аномальными свойствами: скорость распространения сейсмических волн в этом слое ниже, а скорость затухания (скорость уменьшения амплитуды) этих волн больше, чем в литосфере и в нижележащей мантии. Этот слой получил специальное название - астеносфера. Эффективную вязкость астеносферы можно оценить, например, по скорости послеледникового поднятия. Вязкость астеносферы **под континентальными литосферными плитами** оценивается величиной  $\eta=10^{20}\div 10^{21}$  Па\*с, **под океаническими литосферными плитами** -  $\eta=10^{18}\div 10^{19}$  Па\*с. По сравнению с вязкостью твердой литосферы ( $\eta=10^{27}\div 10^{28}$  Па\*с) вязкость астеносферы **очень мала**,

**но велика** по сравнению с лавой, вытекающая из жерла вулкана (её вязкость  $\eta=10^4\div 10^5$  Па\*с).

**Свойства** астеносферы объясняются тем, что температура пород астеносферы близка к температуре солидуса и некоторая часть легкоплавких веществ (единицы процентов) находится в расплавленном состоянии. А при прохождении сейсмических волн в астеносфере колеблются твердые тугоплавкие зёрна, но т.к. они окружены расплавленными минералами, то происходит превращение механической энергии звуковой волны в тепловую энергию, т.е. затухание волны в вязкой среде.

Верхняя граница астеносферы определяется глубиной, где температура пород приближается к температуре солидуса. А на границах литосфера-астеносфера и астеносфера-мантия происходит скачок вязкости (в десятки миллионов раз) – см. рис. 23 и рис. 9.

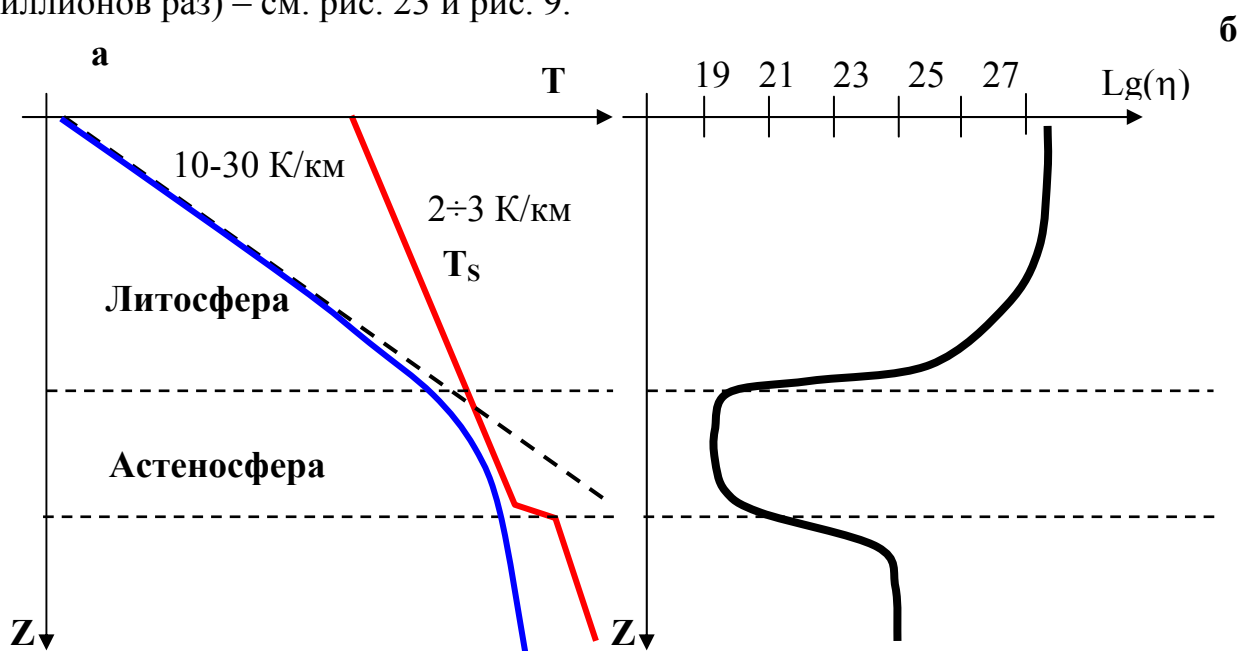


Рис. 23. Изменение температуры (а) и вязкости (б) с глубиной  $Z$

Большой градиент температуры и пластичность астеносферы приводят к возникновению свободной тепловой конвекции, эффективность теплопередачи при этом увеличивается в десятки раз. С увеличением плотности связано скачкообразное увеличение температуры солидуса ( $T_s$ ), увеличивается разность между температурой породы и температурой солидуса и возрастает вязкость пород.

### **Ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики**

Ферромагнитное ядро и множество более мелких ферровключений Земли, находясь в магнитном поле Солнца, создают наведённое поле дипольного характера (см. рис. 23, оно напоминает искусственный щит в фантастическом фильме «Горец-2»). Внутреннее строение Земли определяет и свойства собственного магнитного поля: полярность, намагниченность, магнитострикция, точка Кюри и т.п. Анализ магнитного поля планеты Земля говорит о том, то оно

состоит как бы из двух составляющих: внутреннего дипольного поля, связанного с ядром в гелиомагнитном поле, и внешнего поля, генерируемого движением электрических частиц, вызванного самим фактом вращения диполя (подвижные статор и ротор). Если ферромагнитное ядро представить как сердечник катушки, а литосферу, атмосферу, ионосферу – как витки этой катушки, то становится ясно, что при изменении тока в катушке будет меняться и напряжённость магнитного поля всей системы. Это ощущается на Земле, когда в её магнитосферу «солнечный ветер» приносит плазму, а заряженные частицы вызывают полярные сияния в нижней атмосфере. С помощью космических научно-исследовательских станций было обнаружено устойчивое магнитное поле в межпланетном пространстве: Солнце обладает обширным магнитным полем со средней напряжённостью на орбите Меркурия – 25г, Венеры – 12г, Земли – 6г, Марса – 3г, Юпитера – 1,5г и огромными кольцевыми токами заряженных частиц. Аналогичным полем обладают все звёзды.

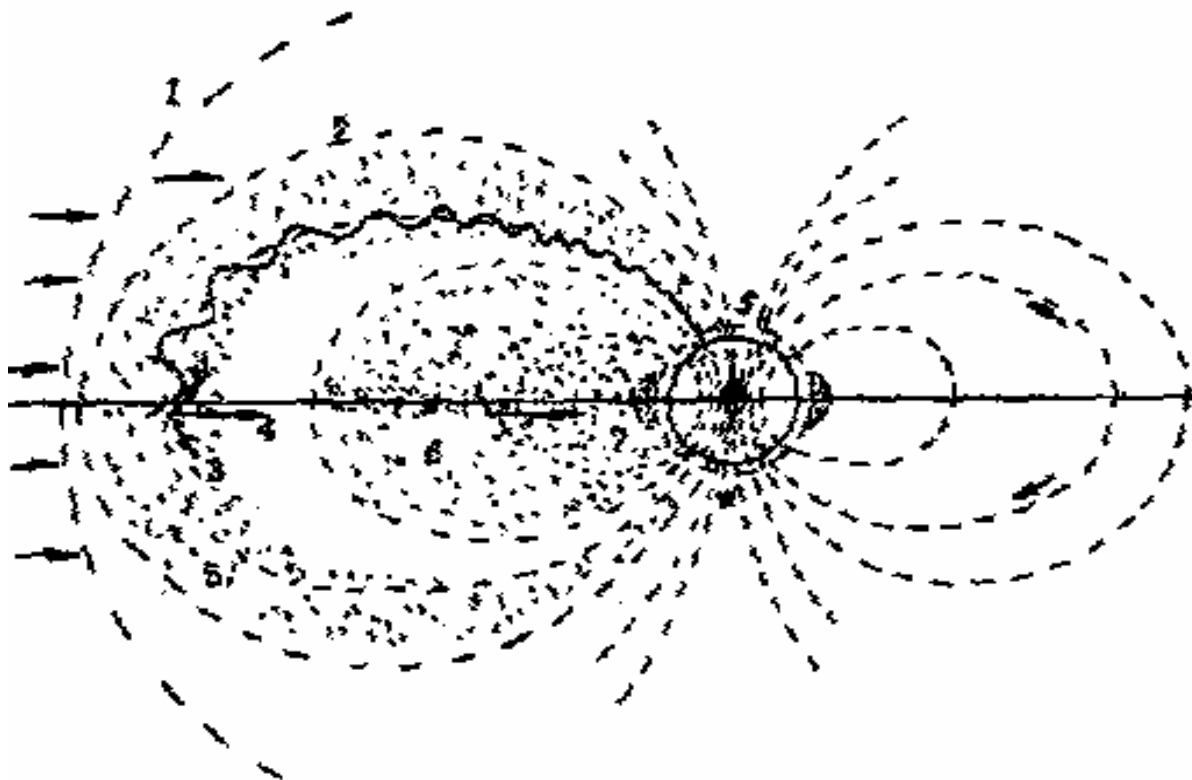


Рис. 23. Магнитное поле Земли

1 – магнитопауза; 2 – силовая линия геомагнитного поля; 3 – движение частицы по питч-углу (по спирали вокруг силовой линии); 4 – радиальная диффузия заряженных частиц; 5, 6 и 7 – пояса радиации

Магнитные свойства вещества проявляются в его способности намагничиваться в силовом поле ЭМГ. Отношение вещества к магнитному полю, его способность намагничиваться определяется величиной магнитной проницаемости:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

где **H** – напряжённость намагничивающего поля, в данном случае звезды;  
**B** – напряжённость наведённого поля в веществе.

По величине ( $\mu$ ) все вещества делятся на 3 большие группы (см. табл. 2).

Таблица 2

Классификация химических элементов по магнитным свойствам

I. Диамагнетики, ( $\mu$ ) несколько ниже 1		II. Парамагнетики, ( $\mu$ ) несколько больше 1		III. Ферромагнетики, ( $\mu$ ) намного больше 1
Серебро	Индий	Алюминий	Рубидий	Кобальт
Аргон	Йод	Барий	Рений	Диспрозий
Мышьяк	Криптон	Кальций	Родий	Эрбий
Золото	Азот	Церий	Рутений	Европий
Бор	Неон	Хром	Сера, пар	Железо
Бериллий	Фосфор	Цезий	Скандий	Гадолиний
Висмут	Свинец	Иридий	Самарий	Гольмий
Бром	Празеодим	Калий	Тантал	Неодим
Углерод	Сера	Лантан	Торий	Никель
Кадмий	Сурьма	Литий	Титан	Кислород
Хлор	Селен	Магний	Уран	Тербий
Медь	Кремний	Марганец	Ванадий	
Галлий	Олово	Молибден	Вольфрам	
Германий	Стронций	Натрий	Иттрий	
Водород	Теллур	Ниобий	Цирконий	
Гелий	Таллий	Осьмий	Платина	
Гафний	Иттербий	Палладий		
Ртуть	Цинк			

К **диамагнитным** веществам, кроме приведённых в таблице, относятся все органические соединения, вода и большинство соединений углерода. Магнитная восприимчивость ( $\chi = \mu - 1$ ) диамагнетиков не зависит от напряжённости внешнего поля и почти не зависит от температуры. При внесении диамагнетиков в намагничивающее поле в каждом его атоме возникает магнитный момент, направленный противоположно вектору напряжённости внешнего поля, и диамагнетик выталкивается за пределы сильного поля.

К **парамагнитным** веществам относятся не только указанные в таблице химические элементы, но и кислород и большинство редкоземельных элементов, которые занесены в группу парамагнетиков за обладание ими высокой магнитной проницаемости. Векторная сумма орбитальных магнитных моментов всех электронов атома (молекулы) не равна нулю, как у диамагнетиков, поэтому атом в целом обладает некоторым собственным магнитным моментом ( $p_m$ ):

$$p_m = \frac{M}{H \sin \alpha},$$

где  $M$  – момент количества движения (произведение радиус-вектора на силу притяжения или отталкивания);  $H$  – напряжённость поля;  $\alpha$  – угол между направлением поля и осью магнита.

При внесении парамагнетика в намагничивающее поле в его теле возбуждается собственное поле, направленное в ту же сторону, что и внешнее магнитное поле, и парамагнетики втягиваются в область больших значений напряжённости внешнего поля. Магнитная восприимчивость парамагнетиков не зависит от напряжённости внешнего поля и уменьшается с повышением температуры.

К **ферромагнитным** веществам относятся химические элементы с огромной магнитной проницаемостью (например, для сплава Ni-Fe – 600000), зависящей от напряжённости намагничивающего поля и его предыдущей магнитной истории. При повышении температуры проницаемость уменьшается и при достижении определённой температуры (**точка Кюри**, для горных пород лежит в диапазоне от 100 до 900<sup>0</sup>К), наступает фазовый переход, вещество резко теряет ферромагнитные свойства и становится парамагнитным (для железа эта температура равна 753<sup>0</sup>С). Ферромагнетики очень сильно намагничиваются во внешнем поле и втягиваются в область более сильного поля, что приводит к ещё большему росту величины магнитного поля и массы его носителя. Все ферромагнетики обладают **гиромангнитным эффектом**, т.е. при намагничивании они получают не только определённый магнитный момент, но и некоторый механический вращательный импульс. Поэтому ферромагнитные ядра будущих планет в самом своём зарождении обладали вращательным движением вокруг своей оси и ещё двигались по орбитам вокруг звезды. При этом ядро всё больше приобретало форму эллипсоида вращения, т.к. в высоких широтах вертикальная составляющая магнитного поля диполя больше, чем в районе магнитного экватора. Оси вращения ядер, а затем и планет первоначально совпадали с магнитными осями, а географические полюса – с магнитными (см. рис. 24).

Представим нашу Землю после того, как всё вещество первичного космического облака (с полным комплектом химических элементов) было изъято из окружающего пространства. Это был огромный холодный шар с относительно ровной поверхностью без каких-либо следов поднятия или впадин и имел двойное вращение – вокруг своей оси и вокруг Солнца по орбите. Постепенно под воздействием потока заряженных частиц, «солнечного ветра», поверхность планеты нагревалась, вещества с низкой температурой кипения начали испаряться и вместе с азотом образовали атмосферу Земли. Состав её был сложным: азот и углекислый газ, инертные газы и все виды углеводородов. Атмосфера не имела только **свободного кислорода**, который весь пошёл на окисление водорода, углерода и других химически активных элементов, и как активное парамагнитное вещество он **проник во все слои планеты**. Приобретая газовую оболочку, под воздействием парникового эффекта начала разогреваться снаружи оболочка Земли; одновременно происходил быстрый нагрев её изнутри за счёт физических процессов **магнитострикции**<sup>1</sup> ферромагнетиков: в зависимости от напряжённости геомагнитного поля при температуре ниже точки Кюри изменяется и намагниченность вещества, меняется форма ферромагнитного тела. Никель, например, сжимается, а железо и его сплавы – расширяются (магнитост-

---

<sup>1</sup> **Магнитострикция** - изменение размеров и формы кристаллического тела при намагничивании.

рикция). Максимальным эффектом магнитострикции обладают редкоземельные металлы, их сплавы и соединения урана (изменения в 2-3% от длины образца).

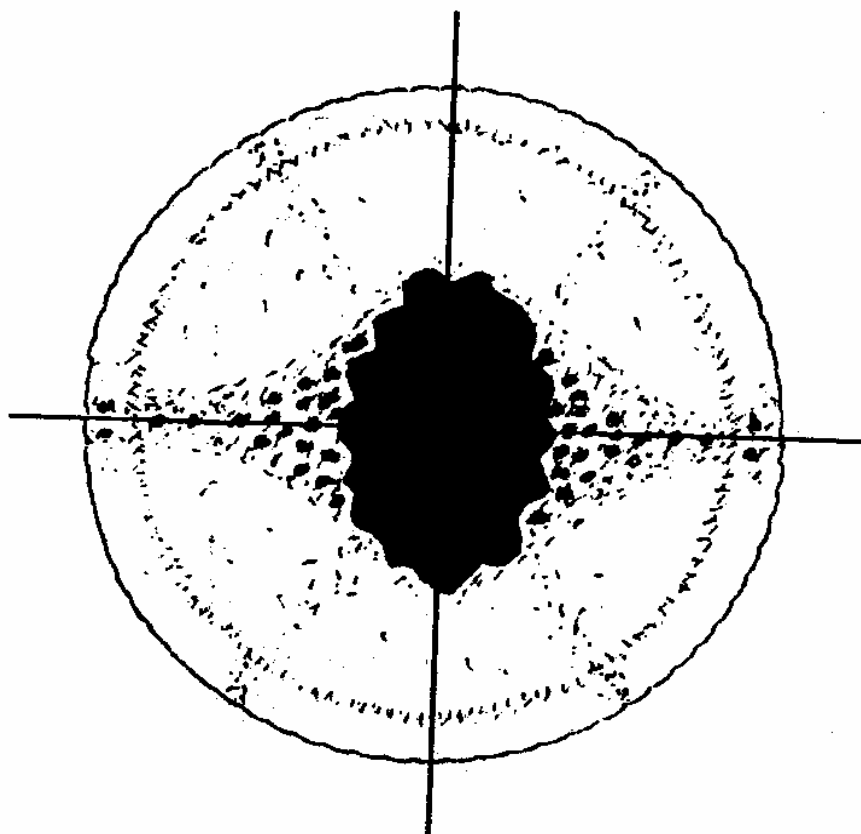


Рис. 24. Разрез сформировавшейся планеты с ферромагнитным ядром

### Система Земля-Луна

Плоскость орбиты системы Земля-Луна наклонена к плоскости эклиптики, и этот угол изменяется от  $+5^{\circ}$  до  $-5^{\circ}$  за 18.6 лет (см. рис. 25). Общий центр масс системы (барицентр) удалён от центра Земли на расстояние 0,8 радиуса Земли, но находится внутри тела планеты.

В 1973 г. Ю.Н.Авсюком была предложена гипотеза, объясняющая эффект годового качания земного полюса (Чандлерово качание полюса) - перемещениями внутреннего ядра Земли в жидком внешнем ядре, вызванного перемещением барицентра (см. рис. 26). Перемещение ядра оценивается величиной в 100 м. Некоторые катастрофические извержения вулканов и землетрясения на Земле происходят циклически с периодами в 6-7 лет, что соответствует одному из периодов Чандлеровых колебаний полюса.

В технической литературе можно отыскать множество описаний примеров планетарных сдвигов. Рассмотрим влияние Луны на приливы и отливы, ведь известно, что уровень открытых морей в прилив поднимается примерно на 1 м, а, например, амплитуда колебаний уровня Тихого океана в Пенжинской губе Охотского моря достигает 11 м.

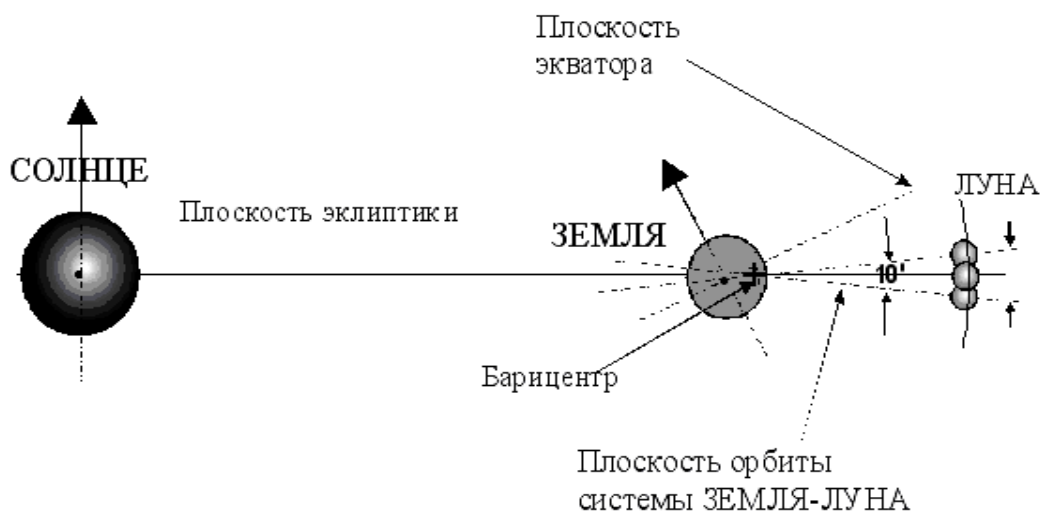


Рис. 25. Схема орбитальных движений в системе Земля-Луна-Солнце

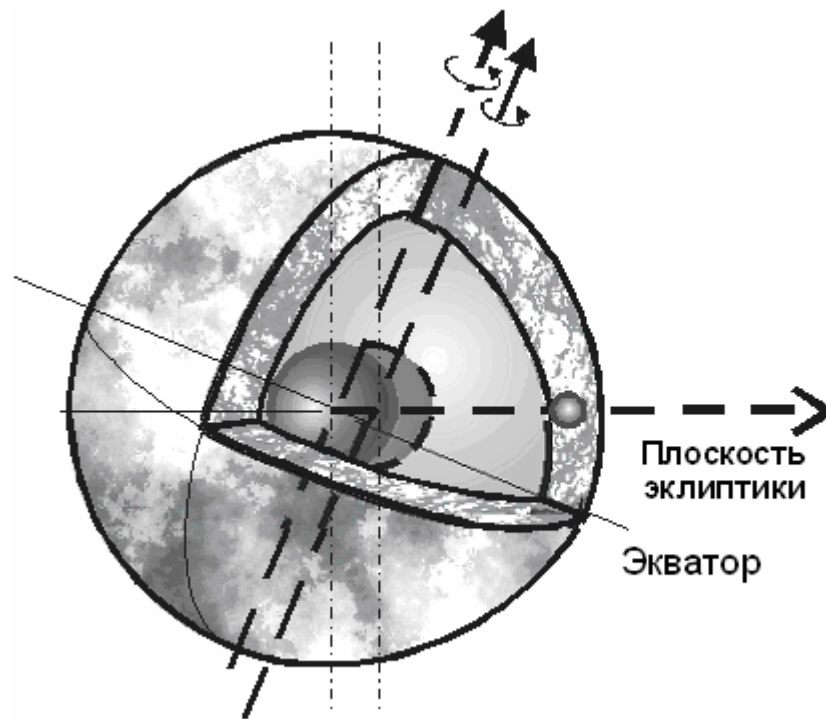


Рис. 26. Схема перемещения внутреннего ядра, центра тяжести и полюса Земли

Итак, Луна вращается вокруг Земли, причём в том же диапазоне тёплого пояса – от северного тропика Рака (22 июня) до южного тропика Козерога (22 декабря) - её орбита лишь на  $\pm 5^\circ$  отличается от плоскости эклиптики. Сила притяжения Луны Землей уравнивается центробежной силой, поэтому система устойчива. Ближайшие к Луне точки Земли отстоят от нее на расстоянии 59 радиусов Земли, а наиболее удаленные - на расстоянии 61 радиуса. Поэтому для разных участков земной поверхности сила притяжения какой-либо частицы либо меньше, равно, либо больше - постоянной по величине центробежной силы. За счёт этой разницы появляется приливообразующая или отливообразующая

сила, которая каждые примерно 6 часов поднимает или опускает уровень всех водных бассейнов относительно менее подвижной суши. Эта сила гораздо меньше лунного притяжения и она обратно пропорциональна кубу расстояния от центра Луны до поверхности Земли:

$$Q=k^2 (2 a m/r^3) ,$$

где  $a$  - радиус Земли, в среднем 6371 км;  $r$  - расстояние центра Луны от центра Земли, 384.4 тыс.км;  $k$  - постоянная величина, равная круговой скорости вращения Земли, равна 29.8 км/сек;  $m$  - масса Луны, составляющая 1/81.5 часть массы Земли (масса Земли равна  $5.9763 \cdot 10^{21}$  т).

В течение **лунных суток, измеряемых 24 часами 50 минутами**, наблюдается два подъёма уровня океана (приливы) и два опускания (отливы). Итак, океанские приливы проявляются в передвижении воды относительно континентов; если бы твердая земная кора поддавалась бы действию приливных сил с той же легкостью, что и океаны (а высота прилива твёрдой оболочки, вызванного притяжением Луны, - порядка 36 см и, вызванного притяжением Солнца, - ещё около 16 см, всего – 52 см), то исчезла бы сама причина относительного движения воды, т.е. приливов и отливов. Зная же величину приливной силы, можно рассчитать соответствующие максимальные касательные напряжения в земной коре:

$$T = 0.5 Q.$$

Скорость распространения приливной силы очень велика – до 1666 км/час и приливные деформации производят каждые 6 часов «массаж» твёрдой оболочки Земли до глубины 600 км. Сжатие и уплотнение Земли под действием силы притяжения сопровождается высвобождением потенциальной гравитационной энергии - основного источника тектонических процессов. Поскольку увеличение скорости её осевого вращения (относительное столетнее ускорение равно  $+1.4 \cdot 10^{-8}$ ) неравномерно из-за неравномерности уплотнения вещества и сокращения объёма Земли, а, с другой стороны, вековое замедление вращения (относительное столетнее замедление равно  $-2.8 \cdot 10^{-8}$ ), вызываемое приливным трением, также неравномерно, то фигура Земли непрерывно пульсирует, изменяя объём и форму. Результирующее гравитационное воздействие масс небесных тел в условиях вращения планеты Земля проявляется и в образовании гигантских **вихревых систем глубинных разломов**<sup>2</sup> (рис. 27) и локализуется в зонах влияния активных экстремальных кругов<sup>3</sup>.

Замедление же вращения Земли, вызываемое Луной, представляет собой большую угрозу<sup>4</sup>. Ещё 400 млн. лет назад, когда первые растения осваивали сушу, год составлял 405 дней, а сутки длились 21 час 30 минут; когда же 200 млн. лет назад на Земле обитали динозавры, земной год составлял уже 385 дней, зато сутки составляли 23 часа. И чем старше становится Земля, тем длиннее становится день: каждые 100 лет она замедляет своё вращение вокруг собственной оси - примерно на 46 секунд. Земля, тормозимая Луной, всё медлен-

<sup>2</sup> Кононов Ю.В., Кононова З.Н. Ключ к тайнам жизни.- К.: изд. Форвей, 1996, с. 7-8, 27-28, 107.

<sup>3</sup> Каттерфельд Г.Н. Лик Земли и его происхождение. - М.: Географгиз, 1962, 152 с.

<sup>4</sup> Непомнящий Н.Н., Низовский А.Ю. 100 великих тайн.- М.: Вече, 2000, 576 с.



нее вращается вокруг своей оси и когда-то окончательно затормозится, при этом всё живое на планете погибнет (так и собственное вращение Луны было когда-то остановлено притяжением Земли, с тех пор Луна повернута к нам одним боком). Правда, Луна несколько удаляется от Земли.



Западно-Европейский планетарный вихрь литосферы (в центре - г.Турин)



Система Азиатских планетарных вихрей литосферы



Тихоокеанский планетарный вихрь литосферы (в центре — о.Пасхи)



Индонезийский планетарный вихрь литосферы

Рис. 27. Планетарный вихрь разломов литосферы (по О.И.Слензаку)

Зная внутреннее давление в недрах можно, по аналогии с примером резервуара, заполненного газом или водой под давлением, грубо оценить порядок величин тангенциальных напряжений в земной коре<sup>5</sup>:

$$P = 0.5 q D / t , \text{ МПа } ,$$

<sup>5</sup> Беляев Н.М. Сопротивление материалов. - М.: Наука, 1976, 608 с.

где  $P$  - тангенциальные напряжения в земной коре, МПа;  $q$  - внутреннее давление в недрах, МПа;  $t$  - толщина земной коры, км;  $D$  - внутренний диаметр Земли (без земной коры), км.

Тогда на глубине 30 км тангенциальное напряжение должно достигать величины 166.4 МПа без учета незначительного напряжения, вызванного распределённым собственным весом земной коры.

Горные работы сейчас ведутся в основном на глубинах до 1-1.5 км, лишь в Индии и ЮАР достигают глубин 3-3.5 км, а нефть и газ добывают с глубин до 6-7 км без присутствия в недрах людей.

По данным сверхглубинного бурения<sup>6</sup> на Кольском полуострове каких-либо изменений физических свойств пород, связанных по мере понижения глубины непосредственно с увеличением давления и температур, не отмечается, по крайней мере, до 7000 м. Такие же выводы были сделаны и при изучении керна двух других глубоких скважин, пробуренных в Хибинском массиве. Выполненная оценка напряжений по стволу сверхглубокой скважины показала начинающееся сразу от поверхности систематическое занижение величин вертикальной компоненты напряжений, полученной экспериментальным путем, по отношению к гидростатической гравитационной составляющей  $\sigma = \gamma * H$ . Уже на глубинах ниже 3200-3500 м указанное расхождение составляет 50-60% и в дальнейшем остается практически постоянным. Своеобразные скачки напряжения приурочены лишь к зонам геологических разломов и контактов между разными геологическими толщами.

Существует большой объём статистических данных по горным ударам на угольных шахтах, так, наибольшая часть горных ударов на шахтах Кизеловского бассейна приурочена как к максимуму сжимающих, так и к максимуму растягивающих планетарных напряжений. Чем больше приложено напряжений к целику (нагрузка или разгрузка - не существенно), тем вероятнее его разрушение<sup>7</sup>.

Геолог Б.Л.Личков<sup>8</sup>, сопоставив графики приливов в океане на протяжении последнего столетия с графиком скорости вращения Земли, пришел к выводу, что, чем выше приливы, тем меньше скорость вращения Земли<sup>9</sup>. Приливная волна, постоянно движущаяся навстречу вращению Земли, замедляет его, и **сутки удлиняются** на 0,001 секунды за 100 лет. В настоящее время земные сутки равны 23 часам 56 мин. 4 сек., а один миллиард лет назад сутки равнялись 17 часам<sup>10</sup>. Он также установил также связь между изменением скорости вращения Земли под влиянием приливных волн - и изменением климата. **Скопление снегов и льдов** в приполярных районах способствует увеличению скоро-

---

<sup>6</sup> Медведев Р.В. Закономерности изменения свойств и состояния горных пород по данным сверхглубокого бурения. Методические разработки по курсу «Физика горных пород». - М.: МГИ, 1983.

<sup>7</sup> Петухов И.М. Горные удары в угольных шахтах. - М.: Недра, 1972.

<sup>8</sup> Тушинский ГК. Космос и ритмы природы Земли. - М.: изд. Просвещение, 1966. - 120 с.

<sup>9</sup> Личков Б.Л. Природные зоны Земли и литосфера. Записки Географического общества СССР, т. 19. - Л., изд. АН СССР, 1960.

<sup>10</sup> В каждые 40 тыс. лет продолжительность земных суток возрастает на 1 секунду.

сти вращения Земли, поскольку из Мирового океана изымается большое количество воды и его уровень понижается. При этом смещаются в сторону экватора пути циклонов (см. рис. 28), что **приводит к большему увлажнению** средних широт. Т.Д. и С.Д. Резниченко это подтвердили и пришли к выводу, что: а) гидросфера трансформирует энергию гравитационных сил - в механическую и тем замедляет вращение Земли; б) влага, перемещаясь к полюсам или к экватору, трансформирует тепловую энергию Солнца - в механическую энергию суточного вращения и придаёт этому вращению колебательный характер.

О.Петтерсон утверждает, что в моменты взаиморасположения Солнца, Земли и Луны **в одной плоскости и на одной прямой** - происходит наибольшее нарушение силы тяжести на Земле, что сказывается на нашей планете в нарушении циркуляции вод океана (подводных течений) и в изменении климата. Такое взаиморасположение повторяется приблизительно через 1800 лет, оно наблюдалось в 360 и 2100 гг. до н. э. и в последний раз - в 1433 году н.э.

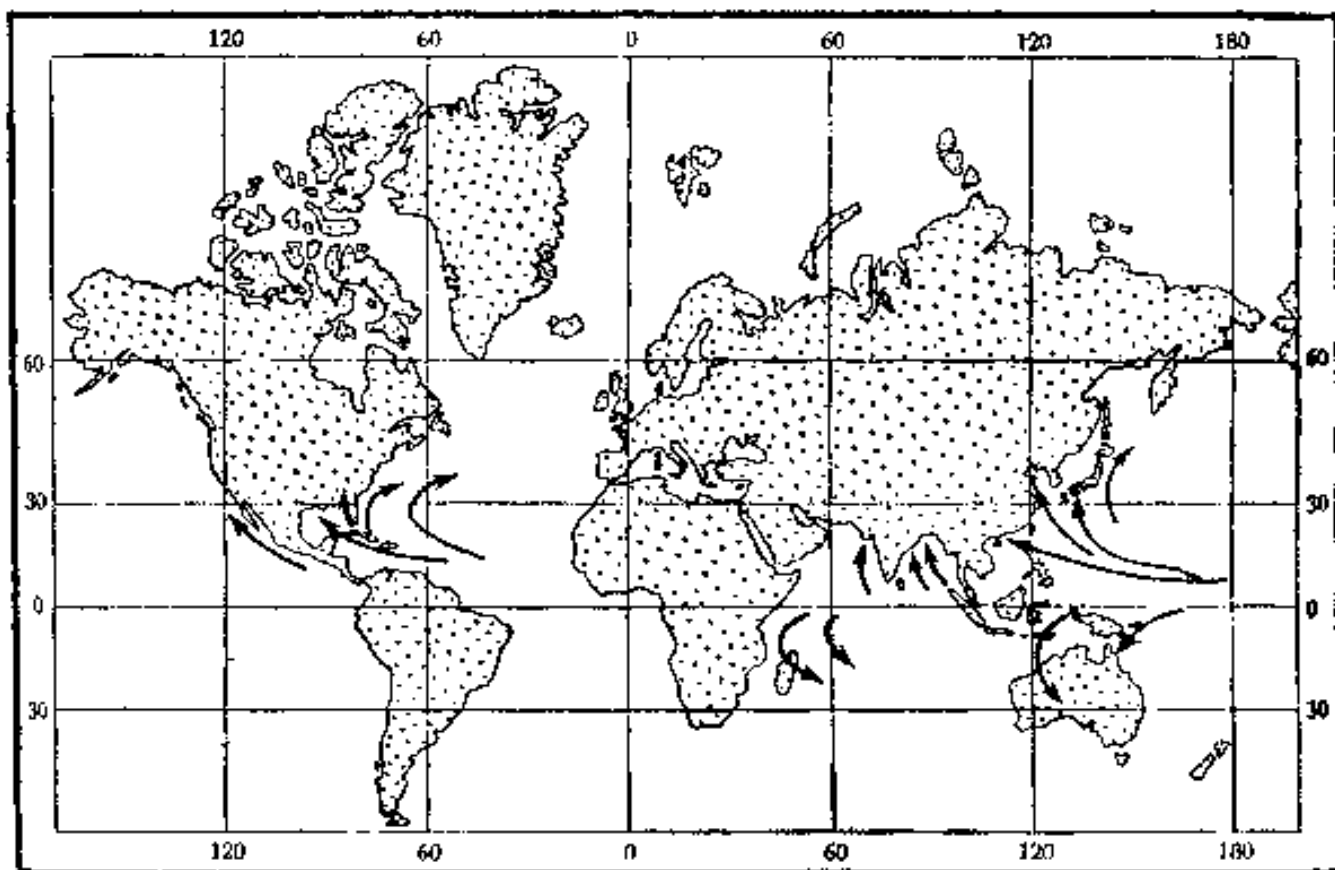


Рис. 28. Районы зарождения и основные пути движения тропических циклонов (по Л.С.Мининой)

## Атмосфера, гидросфера и твёрдая Земля

Наша планета состоит из нескольких оболочек: магнитосфера, атмосфера, гидросфера, литосфера, мантия, ядро. Самой внешней оболочкой Земли является магнитосфера и она, в отличие от атмосферы, не вращается вместе с литосферой вокруг земной оси.

**Атмосфера Земли** состоит из нескольких слоев, неоднородных по составу. Наиболее близкой к поверхности Земли является тропосфера, которая содержит 80% её массы и от поверхности Земли распространяется на 16-18 км на экваторе и на 8-10 км на полюсах. Температура тропосферы понижается на  $0.6^{\circ}\text{K}$  на каждые 100 м (температурный градиент). Выше расположен слой стратосферы, именно здесь на высоте 50-55 км находится слой озона, который поглощает ультрафиолетовое солнечное излучение. Далее расположена мезосфера (55-80 км); затем термосфера (80-1000 км) и экзосфера (1000-2000 км над поверхностью Земли). Выше – космос. В термосфере происходит быстрый рост температуры за счёт поглощения солнечного коротковолнового излучения (в ионосфере). В экзосфере происходит рассеивание и диссипация лёгких газов в космическое пространство атомов водорода и гелия.

**Диссипация газов.** Беспорядочное тепловое движение частиц газа приводит к тому, что часть их, находящаяся во внешних слоях атмосферы, приобретает скорость, лежащую выше критической скорости ускользания, при которой тело преодолевает силу тяжести и может уйти за пределы поля тяготения планеты. Таким образом, диссипация зависит от силы тяготения планеты, температуры её экзосферы, определяющей кинетическую энергию молекул, а также от молекулярной массы частиц, от которой и зависит их скорость. Поэтому Луна и Меркурий не могут иметь устойчивой атмосферы, на Марсе устойчивы только тяжёлые газы, с планет типа Земли диссипируют только водород и гелий, а малые планеты и большая часть спутников совсем лишены атмосферы. Реальное состояние атмосфер планет зависит от соотношения между процессами формирования и уничтожения атмосферы.

На высотах от 50 до 400 км происходит **ионизация** атмосферных газов - и увеличение электропроводности атмосферы (в  $10^{12}$  раз больше, чем на поверхности Земли). В результате действия гравитации, ионизации и диффузионного разделения газов - в верхних слоях атмосферы накапливаются более лёгкие газы: до высоты в 200 км азот является основной частью атмосферы, а выше его вытесняет атомарный кислород.

В атмосфере содержится также  $(1.3 \div 1.5) \cdot 10^{16}$  кг воды в виде капель или кристаллов льда. Вода содержится в основном в тропосфере, причём в тропических широтах её до 3÷4%, а в Антарктиде лишь  $2 \cdot 10^{-5}$  %.

Основным источником энергии на поверхности Земли является электромагнитное излучение Солнца. Земля получает  $1.7 \cdot 10^{17}$  Дж/с лучистой энергии Солнца, но до поверхности Земли доходит лишь 48% этой энергии, остальная часть поглощается атмосферой и отражается магнитосферой. Излучение инфракрасного диапазона задерживается и поглощается парами воды и углекислым газом в стратосфере и тропосфере. В ионизированном нижнем слое термосферы (в ионосфере) происходит отражение излучения в радиоволновом диапа-

зоне, а ультрафиолетовое излучение поглощается озоновым слоем Земли (на расстоянии 15÷60 км от поверхности). Рентгеновское и гамма-излучение, которые составляют жёсткое коротковолновое излучение Солнца, поглощаются всей толщей атмосферы и до поверхности Земли почти не доходят. Но атмосфера практически прозрачна для электромагнитного излучения и для радиоволн.

Таким образом, атмосфера является щитом, который надёжно защищает поверхность Земли от коротковолнового солнечного излучения и от метеоритных потоков. Без атмосферы было бы невозможно возникновение жизни на Земле и без атмосферы средняя температура на поверхности Земли была бы примерно – минус 23<sup>0</sup>С.

**Гидросфера.** Поверхностный слой воды в морях и океанах до глубины 200-300м имеет непостоянную температуру, которая изменяется в зависимости от широтного расположения и сезона. Средняя годовая температура в экваториальных областях 25<sup>0</sup>С. Она уменьшается плавно к полярным областям, где она достигает 0<sup>0</sup>С и ниже. Соответственно с температурой меняется и плотность воды, достигая максимальных значений в приполярных областях и минимальных - на экваторе. Градиент уменьшения температуры с глубиной неодинаков для разных широт, что объясняется разными режимами нагревания и охлаждения поверхностных вод. В придонных областях температура держится постоянной от 0<sup>0</sup> до 2<sup>0</sup>С.

В водах гидросферы содержатся почти все химические элементы, но преобладают: водород, кислород, хлор и натрий. Океан является громадным приемником и аккумулятором солнечной энергии на поверхности Земли. Он сглаживает колебания температур воздушных масс, так как теплоёмкость воды значительно больше теплоёмкости воздуха.

Внезапное изменение температуры приповерхностных вод на значительной поверхности всего на несколько градусов может оказать катастрофическое и длительное воздействие на глобальные атмосферные процессы. В умеренных и полярных широтах океанские и морские воды летом аккумулируют тепло, а зимой отдают его в атмосферу. В тропических широтах вода нагревается в течение всего года, поэтому здесь образуются теплые и холодные течения (см. карту течений). Здесь же за счёт большой разницы температур воды и воздуха часто зарождаются циклоны.

**Причины зарождения циклонов.** Циклоны возникают в широтах от 5 до 20 градусов, обычно летом, при наличии зоны низкого давления над океаном. Такая ситуация возникает при большой разнице температур воды и воздуха (в 23÷26<sup>0</sup>С), при сильном локальном прогревании воздуха в штиль, что вызывает понижение его плотности и, соответственно, атмосферного давления. Возникающие локальные воздушные потоки под воздействием сил **Кориолиса**, начинают закручиваться в спираль. Тёплый влажный воздух поднимается вверх, преодолевает точку росы и конденсируется в капельки. Постепенно влажный тёплый воздух поднимается на всё большую высоту. Расширяясь и охлаждаясь, влажный воздух при безветрии остаётся в состоянии переохлаждённого пара, продолжая всё больше охлаждаться.



Если извне ветерком привносятся горячие песчинки или кристаллы соли, то тогда происходит лавинообразная конденсация пара. Начавшийся процесс вызывает резкое локальное понижение давления. Туда устремляются всё более быстрые потоки, всё более ускоряя процесс конденсации, вовлекая всё новые и новые воздушные массы с переохлаждённым паром. Затишье вдруг сменяется шквальным ветром. Когда тропический циклон уже сформируется, перепады температуры и давления на разных высотах и процессы выделения скрытой теплоты конденсации (т.е. вся запасённая потенциальная энергия) - будут подпитывать циклон.

**Пятна**, диаметром в 200-400 км, с аномально высокой или с аномально низкой температурой (на  $3^0-4^0\text{C}$  выше – “Эль Ниньо” или ниже нормы - “Ля Нина“) – тоже зарождаются близ Тихоокеанского побережья Южной Америки в экваториальной зоне перед рождеством. Такие пятна возникают регулярно – каждые два-три года. По оценкам энергия каждого такого явления - в  $10^6$  раз больше, чем энергия бомбы, сброшенной на Хиросиму.

При подводных **океанских землетрясениях** иногда происходит поднятие глубинных холодных вод на поверхность океана. Эти холодные пятна воды имеют значительную протяженность (до 500 км в диаметре). Пятно держится более суток и вызывает аномальные атмосферные явления как следствие землетрясения.

Гравитационное влияние Луны и Солнца на гидросферу вызывают лунные и солнечные приливы-отливы вод морей и океанов. В открытом океане в результате приливов уровень воды поднимается до 2 м.

### Магнитосфера Земли

Солнце посылает на Землю два типа излучения: электромагнитные волны длиной от миллионных долей миллиметра до десятков километров и потоки заряженных частиц — корпускул, движущихся со скоростью около 1000 км/с и через двое суток достигающих Земли.

Внутренний экваториальный пояс магнитосферы с наибольшей плотностью частиц расположен на расстоянии около 3600 км от поверхности планеты (космонавты на орбите в 300 км защищены магнитосферой, выше – были бы у них проблемы со здоровьем и радиосвязью - и потому не страдают, как в опытах Я.Крейна: в экранируемой камере мыши без магнитного поля Земли быстро погибали). Он опоясывает Землю кольцом от  **$35^{\circ}$  ю.ш. до  $35^{\circ}$  с.ш.** А внешний пояс, состоящий в основном из электронов, распространяется до **широт  $65^{\circ}$** . Из-за этого интенсивность космических лучей в районе экватора в 5 раз меньше, чем в полярных областях.

Ионосфера и расположенный ниже слой озона поглощают ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца, которые, дойдя до поверхности, могли бы уничтожить на ней жизнь. У ионосферы есть ещё одно полезное свойство: подобно зеркалу, она отражает радиоволны и делает, таким образом, возможной радиосвязь на Земле на большие расстояния.

Как действует защитный экран – магнитное поле, что происходит с атомом или молекулой атмосферы при столкновении с заряженной частицей солнечного ветра? При низких энергиях частицы ядро атома остаётся невредимым, ме-

няется только судьба вращающихся по орбитам электронов. Прилетающая от Солнца заряженная частица при столкновении с атомом земной атмосферы может выбить из него один из орбитальных электронов, легче всего выбить электрон с внешней орбиты, таким образом, частицы солнечного ветра теряют свою энергию на ионизацию атмосферы, на создание пары - свободных положительных ионов и отрицательных электронов. Но налетающая частица не обязательно отрывает электрон от атома, для этого ей может не хватить энергии, но эта энергия всё же возбуждает электрон и он от неё должен вскоре избавиться. Если рядом есть другие атомы, то излишки энергии передаются им при столкновении, если же плотность воздуха мала, то электрон может освободиться от лишней энергии, лишь излучая порцию (квант) света. Такова природа арктического и антарктического полярного сияния. Ведь именно здесь силовые линии магнитного поля Земли направлены вертикально к своему полюсу. В других зонах магнитное поле обволакивает Землю и отражает заряженные частицы солнечного ветра. Эти частицы подлетают к магнитному полю под разными углами, те же из них, которые проходят вдоль силовых линий (в кольце над магнитными полюсами), проникают в атмосферу, другие частицы вглубь магнитосферы не попадают, они отклоняются и закручиваются спиралью вокруг силовых линий. Солнечный ветер «сдувает» магнитосферу таким образом, что наиболее уязвимыми для вторжения заряженных частиц становятся овальные области, дневная сторона которых удалена от своего полюса на  $10^0$ , а ночная – на  $20^0$ .

Магнитное поле Земли по своей величине очень мало. Оно в сотни раз слабее, чем поле между подковами обычного школьного магнита. Однако земное поле занимает огромный объём, простираясь на десятки тысяч километров от поверхности Земли. А так как **энергия магнитного поля пропорциональна объёму**, то влияние земного поля на процессы в окрестностях планеты очень велико.

Газовую оболочку Земли от поверхности до ионосферы надо воспринимать как слабо ионизированную плазму, смесь нейтральных атомов и молекул, электронов и однократно ионизированных ионов (см. рис. 23 и рис. 29). Если число электронов и ионов в каждом конкретном объёме атмосферы одинаково, их суммарных заряд равен нулю, то электрическое поле в плазме отсутствует, и движения заряженных частиц нет. Но, как правило, любая плазма неустойчива, в ней происходит самопроизвольное разделение зарядов под действием магнитного поля Земли и под воздействием проникающих в магнитосферу заряженных частиц «солнечного ветра». В результате между поверхностью Земли и тропопаузой (первым устойчивым слоем слабо ионизированной плазмы) создаётся электрическое поле огромной мощности.

Сотрудники Крымской астрофизической обсерватории в 1973 году открыли глобальные пульсации оболочки Солнца с амплитудой 10 км каждые 160 минут. Последующие наблюдения показали, что магнитосфера Земли дублирует эти колебания, и пульсации Солнца вызывают изменения концентрации электронов на освещённой стороне Земли.



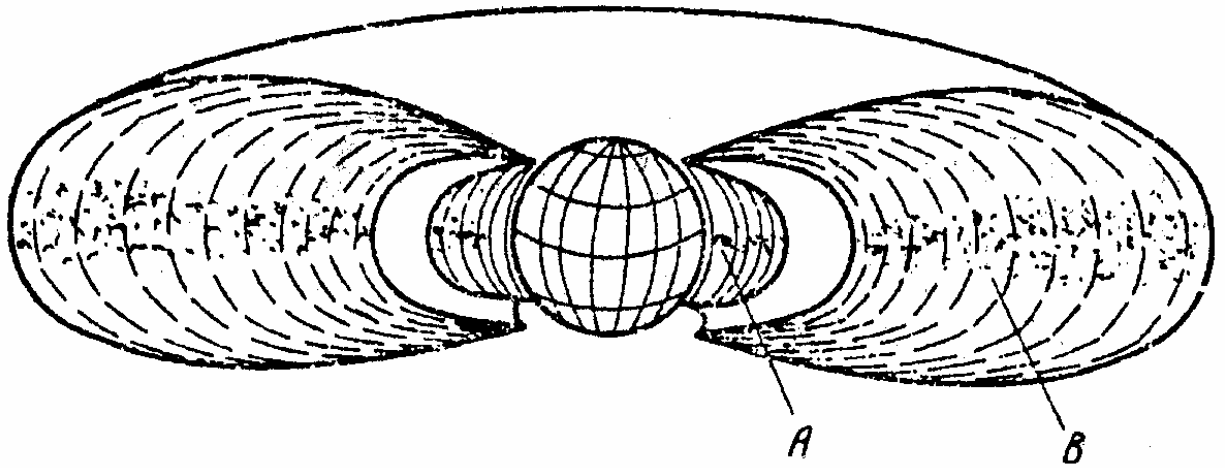


Рис. 29. Схематическое изображение радиационных поясов (А - внутренний, В – наружный), окружающих Землю

Резкий перепад электропроводности даёт основание рассматривать нижнюю атмосферу как диэлектрический слой, ограниченный сверху ионосферой, а снизу литосферой, т.е. хорошими проводниками электричества. А два заряда, разделённые диэлектрическим слоем, - это уже конденсатор. Литосфера заряжена отрицательно, и на поверхности Земли накапливаются отрицательные заряды. В ионосфере же преобладают положительные ионы, которые составляют вторую пластину природного конденсатора. Заряд этого конденсатора в среднем можно оценить величиной  $6 \cdot 10^6$  кулонов.

Ёмкость плоского конденсатора (ионосфера-литосфера) равна:

$$C = \frac{\epsilon S}{4 \pi d}$$

где  $S$  – площадь поверхности одной пластины - меньшей, если они не равны;

$d$  – расстояние между пластинами.

Аналогично можно получить ёмкость конденсатора системы Солнце-Земля. Между литосферой и ионосферой постоянно существует разность потенциалов, напряжённость достигает сотен тысяч вольт, меняется постоянно в зависимости от влажности атмосферы, величины заряда этих пластин. В ясные дни перед грозой разность потенциалов на метр высоты колеблется от 125 до 5000 вольт, поэтому общая мощность средней грозы приравнивается к взрывам не одной, а нескольких термоядерных бомб. До грозы дышать трудно, ощущается мёртвый воздух, а после разряда – чистый ионизированный воздух, насыщенный влагой. При грозе не только происходит **пробой диэлектрика**, но и вынос от поверхности Земли в тропосферу огромного количества водяного пара, который конденсируется и создаёт различной плотности облачность (теоретически так можно проветривать карьер - за счёт создания ионного ветра, как в бытовых ионизаторах). Но электротехники, мечтающие использовать ионосферный природный генератор как источник дешёвой электроэнергии, не представляют, какую бурю, тайфун и торнадо накличат на свои головы, если начнут

с помощью атомных реакторов жёсткими  $\gamma$ -квантами пробивать в атмосфере ионизационные каналы. На это человек уже способен, но управлять ураганами пока нереально.

### Сейсмические волны и их распространение в толще Земли

Рассмотрим природу и свойства сейсмических волн (см. рис 30).

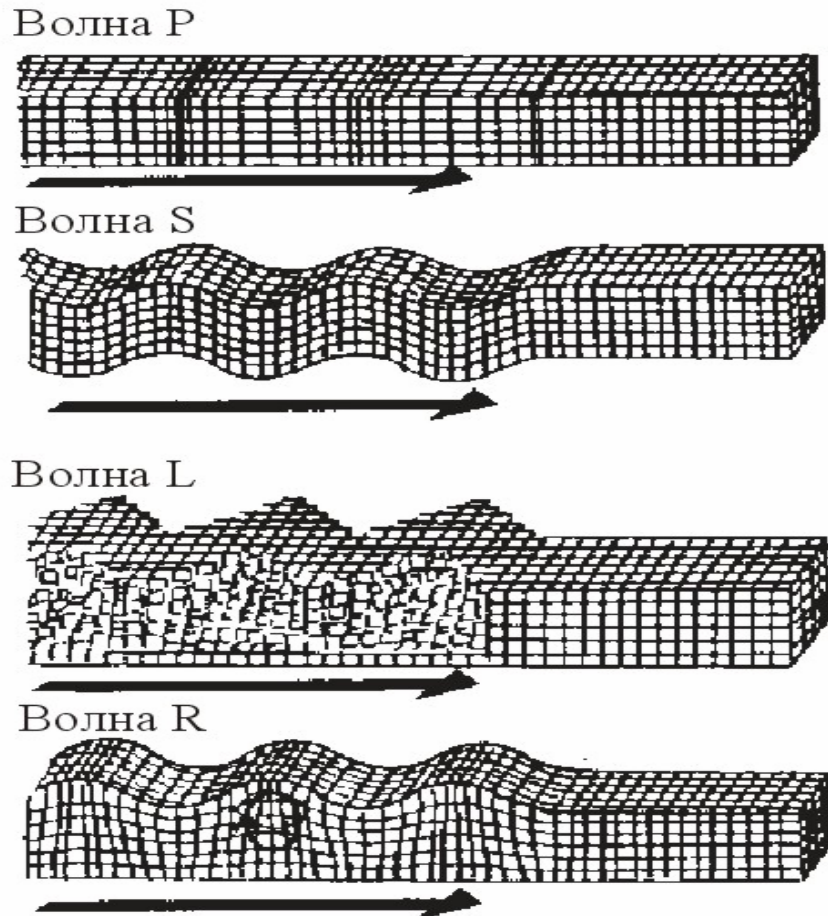


Рис. 30. Схема распространения сейсмических волн различного типа

**Продольная волна (P-волна)** является волной сжатия-растяжения и сопровождается изменением объёма элементов среды. Колебания передаются от точки к точке в направлении распространения волны. Скорость  $V_p$  продольных волн определяется плотностью среды ( $\rho$ ), объёмным модулем упругости ( $K$ ) и модулем сдвига ( $\mu$ ). На регистрирующую станцию волна может прийти либо в стадии сжатия, либо в стадии растяжения. Скорость распространения P-волн максимальная (среди остальных типов сейсмических волн) и эта волна приходит на сейсмическую станцию первой. Волны этого типа распространяются как в твёрдой, так и в жидкой среде. Скорость распространения продольных волн, например, в граните - около 5.5 км/с.

**Поперечная волна (S-волна)** является волной сдвига. Колебания передаются от точки к точке перпендикулярно направлению распространения волны. Скорость поперечных волн определяется только плотностью ( $\rho$ ) и модулем сдвига ( $\mu$ ). Скорость поперечных волн равна нулю в жидких и газообразных средах, где  $\mu=0$ . Поперечные волны распространяются медленнее продольных, их скорость составляет 70% от скорости продольных волн. На сейсмических записях они появляются как вторая группа сейсмических волн. По разнице времен прихода P- и S-волн можно определить, на каком расстоянии от регистрирующей станции находится эпицентр землетрясения. Поперечные волны распространяются только в твёрдых средах. Скорость распространения поперечных волн, например, в граните около - 3.0 км/с.

**Поверхностные** волны распространяются вблизи земной поверхности. В них заключается большая часть волновой энергии. Различают два типа поверхностных волн: волны Лява (**L-волны**) и волны Рэлея (**R-волны**):

- волны Лява имеют бóльшую скорость, чем волны Рэлея; движение частиц происходит в горизонтальном направлении поперёк направлению движения луча, и в этих волнах нет вертикальной составляющей;

- волна Рэлея движется медленнее волны Лява (её скорость около 90% от скорости L-волны), движение частиц в этих волнах происходит по эллиптической орбите в вертикальной плоскости вдоль направления распространения волны.

В сейсмологии рассматривают сейсмические лучи, проходящие через различные слои Земли и отражающиеся от границ раздела сред с разной скоростью распространения сейсмических волн. В 1909 г. югославский сейсмолог Мохоровичич обнаружил, что на глубине 30÷70 км под континентами и на глубине 7÷10 км под океаническим дном находится поверхность, на которой скачком увеличивается плотность и модуль упругости пород и, соответственно, скачком изменяется скорость распространения сейсмических волн. В частности, скорость P- волн увеличивается с 7.5÷7.7 км/с до 7.9÷8.2 км/с (на 0.3÷0.5 км/с). Эта поверхность раздела получила название граница Мохо или граница М. А самая верхняя оболочка Земли, лежащая выше границы Мохо, называется **земной корой**.

Породы выше и ниже этой границы полиморфных превращений могут иметь приблизительно одинаковый элементный состав, однако различаются по строению кристаллической решетки и, соответственно, по плотности, модулям упругости и скорости распространения сейсмических волн. Полиморфные превращения аналогичны фазовому переходу, например, переходу лед-вода, графит-алмаз, кварц-коэсит-стишовит, ортопироксен-гранат-ильменит-перовскит. **Сам переход обязательно сопровождается изменением плотности на 6÷8%.**

Скорость (V) распространения сейсмических волн увеличивается с глубиной, и траектории сейсмических волн представляют собой кривые, обращенные выпуклостью вниз. На рис. 31 показана схема прохождения сейсмических лучей в толще Земли.

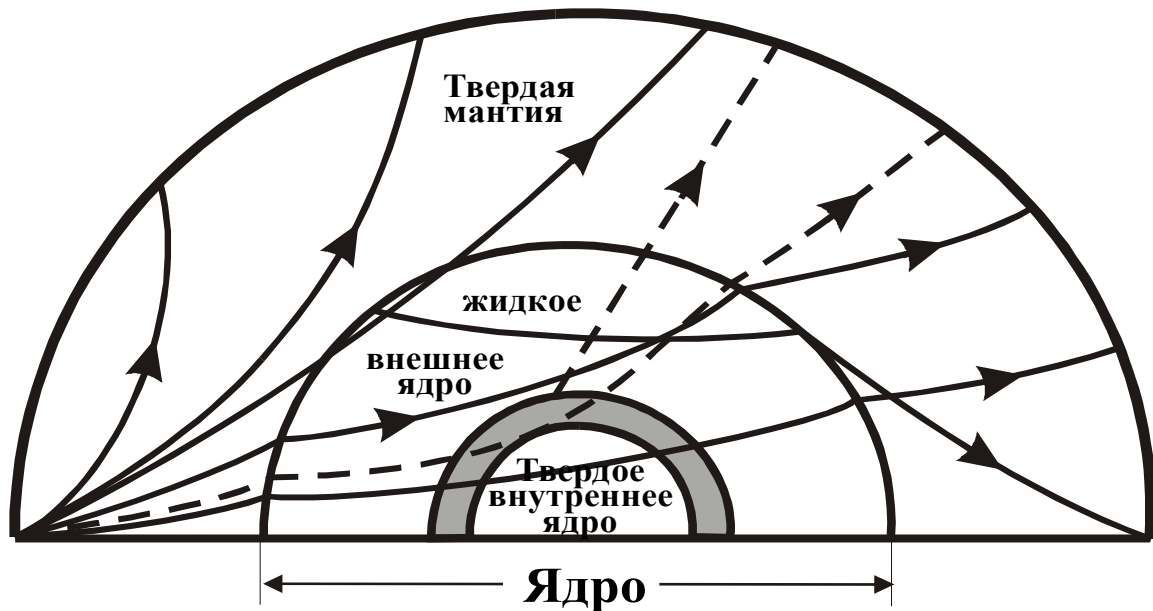


Рис. 31. Схема прохождения сейсмических волн в глубине Земли (на примере продольных волн).

Сейсмическая граница на глубине 2885 км (мантия - жидкое внешнее ядро) была открыта в 1914 году немецким сейсмологом Гутенбергом. На этой границе происходит сильное отражение P- и S- волн. Скорость P-волн скачком уменьшается от значения 13.6 км/с в мантии до 8.1 км/с в ядре (см. рис. 32), а скорость поперечных волн с 7.3 км/с падает до нуля. В ядре S- волны не распространяются, т.е. внешнее ядро Земли – жидкое. А гипотеза о твёрдом внутреннем ядре Земли была высказана датским сейсмологом Ингой Леман в 1936 г. на основании анализа записей продольных сейсмических волн, прошедших через центральную часть Земли.

Интерпретация сейсмограмм - очень сложная процедура и требует высокой квалификации сейсмолога: необходимо выделить моменты вступления всех фаз сейсмических волн (в том числе и отраженных), определить характерные амплитуды и периоды для каждого типа волн. Как правило, фиксируются колебания в трёх взаимно перпендикулярных направлениях.

### Землетрясения

Каждый год по сообщениям сейсмологов на Земле происходит до нескольких тысяч заметных землетрясений (более 10 ощутимых землетрясений в день). Землетрясения с катастрофическими последствиями происходит около десяти в год. Сейсмические волны, возникающие во время толчков, распространяются в толще Земли, но достоверного краткосрочного прогноза землетрясений пока нет.

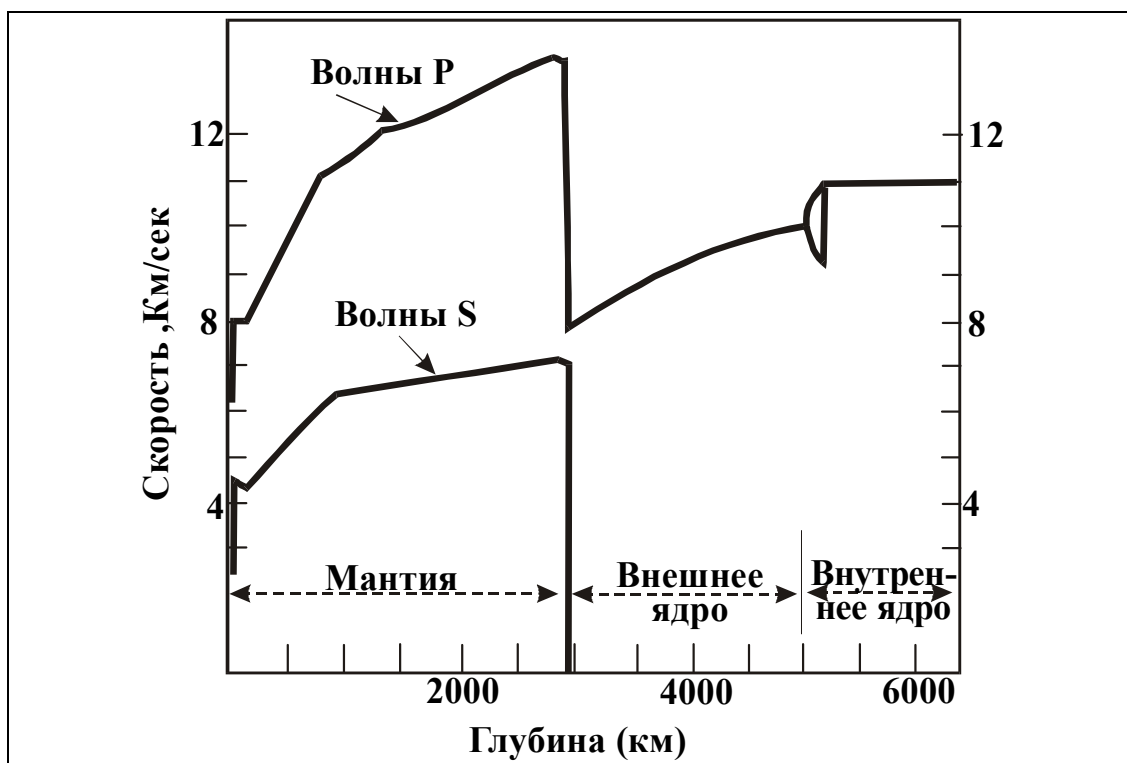


Рис. 32. Скорости сейсмических P- и S-волн на различных глубинах

Различают типы землетрясений по их происхождению:

- тектонические;
- вулканические (от взрывных извержений и при движениях магмы внутри вулканов);
- обвальные (денудационные);
- антропогенные или техногенные (вызванные человеческой деятельностью);
- метеоритные, вызванные падением крупных метеоритов на поверхность Земли.

Известна и классификация землетрясений по глубине очага:

- мелкофокусные (или коровые), с глубиной очага до 70 км;
- промежуточные, с глубиной очага от 70 до 300 км;
- глубокие, с очагом на глубине 300-700 км.

Глубже 700 км землетрясений зафиксировано не было. Считается, что на этой глубине утрачивается кристаллическое строение твердого вещества и невозможно накопление потенциальной энергии за счёт деформации среды.

Подавляющее большинство землетрясений связано с тектоническими процессами в глубинах Земли. В верхних слоях Земли происходят процессы, приводящие к возникновению напряженного состояния в блоках земной коры. Потенциальная энергия накапливается во время длительного процесса нарастания деформации. И когда упругие напряжения начинают превышать предел прочности пород – происходит разрыв, разлом. Разрывы возникают вдоль из-

вестных разломов или ослабленных зон, блоки сдвигаются, стремясь восстановить равновесие.

Всякое землетрясение возникает вследствие внезапного высвобождения значительного количества энергии, накопившейся за длительное время нарастания напряжения до критического уровня в некотором объёме внутри Земли. При этом в определённой области в теле Земли происходит разрушение, и другие необратимые деформации горных пород. Эта область называется очагом землетрясения. В геологическом смысле **очаг** - это разрыв или группа разрывов, по которым происходит мгновенное перемещение масс. В центре очага условно выделяется точка, которая называется **гипоцентром** землетрясения (точка **G**, см. рис. 33). Проекция гипоцентра на земную поверхность называется **эпицентром** (точка **E**), а проекция очага - эпицентральной областью.

Вне очага землетрясения деформации носят характер упругих волн, которые и распространяются по законам распространения упругих волн. Расстояние от эпицентра до точки наблюдения, измеряемое в единицах длины ( $\Delta$ ) или соответствующим центральным углом ( $\psi$ ), называется эпицентральной расстоянием. Время начала землетрясения называется временем в очаге и обозначается как  $t_0$ . Время, за которое сейсмические волны доходят до точки наблюдения, называется временем пробега соответствующей волны и обозначается как  $t_p$ ,  $t_s$  и  $t_L$  (для продольных, поперечных и поверхностных волн соответственно). Все отметки времени всеми сейсмическими станциями даются только по Гринвичскому времени.

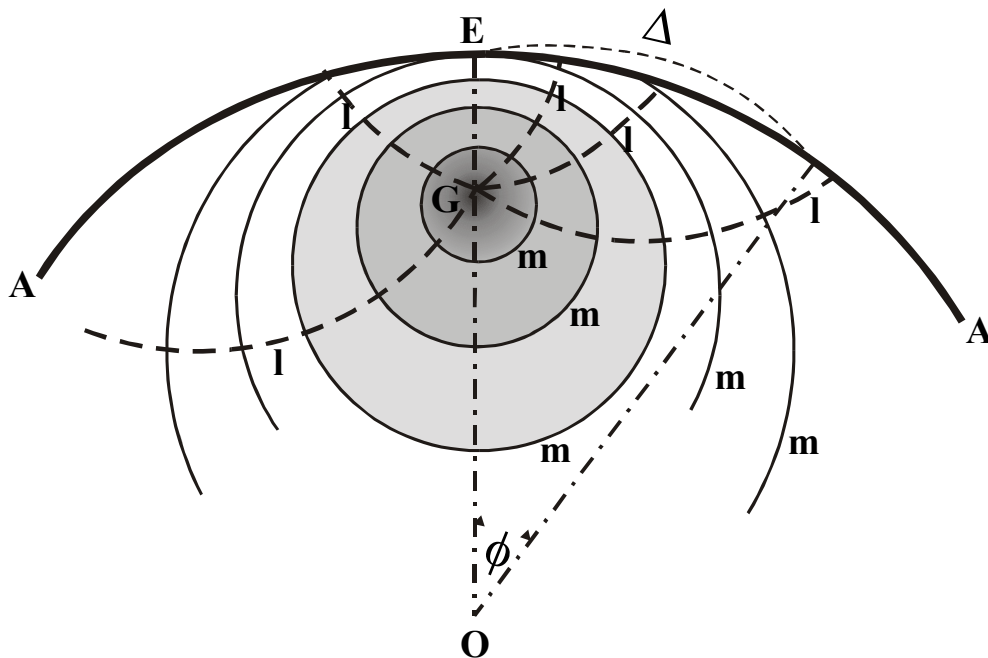


Рис. 33. Схема распространения сейсмических волн от гипоцентра землетрясения

Поверхность, во всех точках которой плотность потока сейсмической энергии одинакова, называется изосейсмической. Пересечения изосейсмических поверхностей с поверхностью Земли образуют линии, называемые **изосей-**

**стами.** Если считать, что вещество Земли однородно и изотропно, то при значительном удалении от очага изосейсмические поверхности будут сферами, а изосейсты - окружностями. Как правило, изосейсты представляют собой либо эллипсы, либо более сложные фигуры - из-за неоднородности Земли, особенностей излучения из очага, поглощения энергии в процессе внутреннего трения, рассеяния на различных неоднородностях и границах. Иногда сейсмическая энергия практически не переходит через тектонические разрывы и интенсивность землетрясения падает скачком.

Сейсмические волны возникают также **при взрывах** (например, ядерных испытаниях), при вулканических явлениях взрывного типа. Например: взрыв вулкана на о. Санторин в Греции 3500 лет назад сопровождался катастрофическим землетрясением, что привело к гибели Крито-Микенской цивилизации; или взрыв вулкана Крака-Тау (в Индонезии) в 1883 году. Вулканические проявления могут вызвать появление более слабых сейсмических событий (вулканическое дрожание).

В последнее время значительное количество слабых землетрясений возникает как результат **человеческой деятельности**. Но даже слабые землетрясения под крупными технологическими объектами могут стать причиной крупнейших технических аварий, например, Чернобыльская катастрофа. Одной из возможных причин её возникновения считается слабое землетрясение, возникшее под основанием энергоблоков непосредственно перед аварией.

Существует целый ряд природных явлений, которые сопутствуют землетрясениям. К ним относятся: форшоки, афтершоки, рои землетрясений, цунами и моретрясения.

**Форшоки** - это заметные или слабые землетрясения, предшествующие сильному толчку. Как правило, их эпицентры расположены там же, где и эпицентр основного землетрясения или в непосредственной близости к нему.

**Афтершоки** - это толчки после землетрясения. Они практически всегда сопутствуют сильным землетрясениям. Их магнитуда (энергетическая оценка землетрясения) ниже, чем магнитуда главного толчка. Афтершоки сильных землетрясений могут происходить в течение месяца после основного события. Афтершоки можно объяснить тем, что накопленная в результате деформации потенциальная энергия сбрасывается не за один раз и разгрузка происходит поэтапно.

**Рои землетрясений** - это серии слабых или сильных землетрясений, в которых нельзя выделить главное событие.

**Шкала балльности и шкала магнитуд.** Шкалы балльности описывают уровень разрушений. Чаще всего используется 12-балльная **шкала Меркалли**. Балльность описывает степень конкретных разрушений в конкретном месте, а энергетическая оценка землетрясения проводится по величине магнитуды. Наиболее часто используется шкала магнитуд **по Рихтеру**. Согласно этой шкале при землетрясении с  $M=7.0$  выделяется энергия -  $E=10^{21.7}$  эрг, а при  $M=8.6$  выделяется энергия в  $10^{23.8}$  эрг, т.е. в сто с лишним раз больше. Тектонических землетрясений с магнитудой больше, чем 8.6, не наблюдалось оттого, что на-

пряжения не могут возрасти выше критических, а размер максимально деформируемой области - ограничен.

Существующее деление **землетрясений** на тектонические и провальные вулканические, скорее всего, не соответствует действительности, так как природа их едина. Считалось, что Земля разогревается с помощью энергии распада радиоактивных элементов, но все они относятся к диамагнитной группе веществ, и, следовательно, в процессе формирования планеты все они оказались во внешнем поясе и отсутствуют на большой глубине. Если они там и имеются в небольшом количестве, то находятся в рассеянном состоянии и существенно влияют на разогрев, а тем более на превращение твёрдого вещества в жидкое (магма), оказать не могут. Малое количество радиоактивных элементов на больших глубинах подтверждается фактическими данными. Базальты в шесть раз менее радиоактивны, чем граниты, а, по предположению, тяжёлые ультраосновные породы в десятки раз менее радиоактивны, чем породы земной коры. Это предположение подтверждается также исследованиями метеоритов, у которых количество тяжёлых радиоактивных элементов быстро сокращается от каменных метеоритов к железокремнистым.

Колебания геомагнитного поля постоянно меняют намагниченность ферромагнитных включений, а их магнитострикционный эффект, резко изменяя своё давление на вмещающие породы, поднимает температуру окружающей среды до точки Кюри. В этом случае на местности сразу же пропадает магнитная аномалия из-за перехода сплава в парамагнитное состояние и эта глыба деформируется. При других условиях температура глыбы падает ниже точки Кюри хотя бы на  $0,1^{\circ}\text{K}$  – в результате резкое намагничивание в геомагнитном поле вызовет столь же резкое удлинение. Ударная волна воспринимается окружающим массивом и выносится на поверхность Земли, такова возможная природа землетрясений. Если глыба лежит на боку, то волна землетрясения вызовет оползни и сдвиги (см. рис. 34), если же глыба стоит вертикально, то ударная волна действует вертикально. Так, например, во время мессинского землетрясения 1783 года из мостовой вылетали вверх булыжники, словно резиновые мячики.

Деформация земной поверхности в эпицентре землетрясения получается за счёт объёмного расширения ферромагнитной глыбы при неглубоком залегании, когда температура её приближается к точке Кюри «снизу» (следствие **эффекта Гопкинсона**). Обычная температура таких включений находится ниже точки Кюри вследствие хорошей теплоотдачи окружающих пород. Если же нарушается температурное равновесие и температура приближается к точке Кюри, происходят толчки и само землетрясение.

Перед любым землетрясением, подземным толчком, горным ударом вдвое-втрое увеличивается концентрация радона, метана в воде и сам водоприток в шахте. Это объясняется эффектом Гопкинсона, когда ферромагнитное тело с повышением напряжённости ЭМГ поля и температуры, резко увеличивает давление на окружающий массив, повышая выход газа и воды. Контролируя температуру массива, радон, метан, водоприток, амплитуду колебаний наведённых токов, можно давать **прогноз удароопасности**. В Томском политехническом



институте уже создан прибор «Катюша», который регистрирует колебания наведённых токов (теллурических, за счёт пьезоэффекта горных пород) в массиве. Было установлено, что перед подземным толчком электрический потенциал в земной коре изменяется обратно пропорционально расстоянию между регистрирующей станцией и эпицентром, а амплитуда сейсмoelectросигнала обычно связана с магнитудой землетрясения логарифмической зависимостью. К сожалению, данных ещё очень мало, чтобы делать какие-то обобщения или выводы, но «истина где-то рядом».

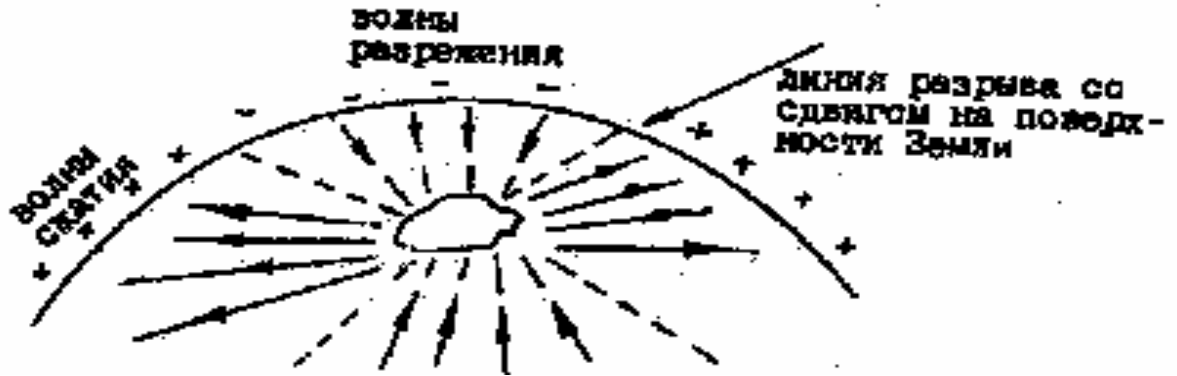


Рис. 34. Секторная структура сейсмических волн и разрывы коры

Как известно, тектоническая активность в **северном полушарии** Земли в ноябре-декабре усиливает (конечно, не так значительно, как в июне-июле). Вот две вероятные причины. Во-первых, недра Земли северного полушария значительно остывают (и приближаются «сверху» к точке Кюри) благодаря большой влажности верхних слоёв земной коры и низким температурам нижней атмосферы. Во-вторых, Земля в декабре находится на самом близком расстоянии от Солнца, следовательно, приобретает наибольшую напряжённость и получает самое большое количество радиации за весь год (в этом отношении жителям южного полушария не так повезло).

## 5. Геологическая история Земли

Геологическая история Земли является замедленной кинолентой шевелящейся земной коры, в которой поднимаются и разрушаются горы. В современную эпоху движение земной коры обуславливается, в основном, вращением планеты (так и при кручении, например, стержней разрушается и лопаются, прежде всего, металл на поверхности) и, как следствие, перемещениями плит земной литосферы в разные стороны от Срединно-Атлантического хребта, Восточно-Тихоокеанского поднятия и Срединно-океанского хребта между Антарктидой и Африкой, Австралией<sup>1</sup>. Тихоокеанская плита движется в сторону Японии и Гавайских островов и подныривает под них со скоростью примерно 10 см в год. А другая плита, с Индостаном, столкнулась с Евроазиатским кон-

<sup>1</sup> Маракушев А.А. Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы.- М.: Наука, 1992, с. 106, 166.

тинентом примерно 45÷50 млн. лет назад и на стыке выросли Гималайские горы.

Каждые 21600 лет (ровно шесть периодов обращения Нибиру) орбиты Земли и Нибиру, как полагают, максимально сближаются, и тогда происходит на Земле очередной глобальный катаклизм - Всемирный потоп, дата одного из них примерно 11800 г. до н.э.<sup>2</sup>, а последнего - примерно 3100 г. до н.э.<sup>3</sup>. Кроме того, примерно в 12400 году до н.э. произошло «проскальзывание» земной коры по астеносфере примерно на 3000 км, в палеомагнитологии это событие называется готенбургский сдвиг географического полюса относительно магнитного (кажущийся сдвиг земной оси), и Антарктида оказалась в южной полярной области, всё это произошло уже на памяти людей. В те времена уровень океана находился на глубине 800-900 м от нынешнего и следы ископаемых рек можно увидеть на фотографиях шельфов морей (рис. 35). Мы живём в эпоху потепления, ледники всё ещё растапливаются, уровень морей поднимается, а площадь пустынь растёт.

Когда возникают ледниковые щиты и покровы, из круговорота забирается огромное количество воды, что приводит к понижению уровня морей и океанов. А это приводит к усилению разрушающей деятельности рек, начинается более глубокое эрозионное расчленение суши. По возникшим «природным мостам» суши, которые обнажились при опускании уровня океана, начинается переселение животных и растений.

Палеомагнитными исследованиями установлено, что за последние 1,2 млн. лет произошло не менее 10 сложных и до 18 простых **геомагнитных событий** (блуждание магнитных полюсов, смена их полярности, изменение наклона земной оси, эксцентриситета земной орбиты вокруг Солнца...). Например, оба полюса Земли за год по кругу перемещаются примерно на 10 км. **Магнитное поле Земли пульсирует** с частотой 8-16 колебаний в секунду, такая же частота у альфа-ритма головного мозга человека. Кроме того, магнитное поле меняет свой знак на противоположный в среднем через каждые 500-800 тыс. лет (последний раз это случилось как раз примерно 500 тыс. лет назад). При инверсии резко (за два-три столетия) изменяется не только знак, но и величина магнитной напряжённости Земли, снижаясь втрое. Органической жизнью наступление **инверсии** воспринималось как грандиозная катастрофа, ведь за короткое время втрое возростал и снова спадал уровень космической радиации на Земле. У живых организмов, согласно экспериментам по искусственному тройному уменьшению величины напряжённости канадского учёного-геолога Я.Крейна<sup>4</sup>, уже после 72-часового пребывания в таком поле способность бактерий к размножению уменьшалась в 15 раз, нарушались двигательные рефлексy у ленточных червей и моллюсков, снижалась нейромоторная активность у птиц, у мышей нарушался обмен веществ. При более длительном эксперименте появлялись у живых организмов необратимые изменения в тканях, и возникало бесплодие.

<sup>2</sup> а) Войцеховский А.И. Виновница земных бед // Знак вопроса. Вып.7. - М.: Знание, 1990.; б) Дроздова Т.Н., Юркина Э.Т. В поисках образа Атлантиды.- М.: Стройиздат, 1992, с. 25.; в) Хэнкок Г. Следы богов.- М.: Вече, 1998.

<sup>3</sup> Рол.Д. Генезис цивилизации. Откуда мы произошли. - М.: изд. Эксмо, 2002, с. 201.

<sup>4</sup> Резанов И.А. Великие катастрофы в истории Земли.- М.: Наука, 1984, с. 31-32, 36-37.

Наиболее чувствительны к этим изменениям организмы, обитающие в северных и южных областях планеты (где находятся магнитные полюса планеты), а наименее чувствительны – организмы в экваториальной области (возможно, такова причина вырождения белой европейской расы по сравнению с чёрной африканской и жёлтой азиатской). В эволюции органического мира эпохи инверсии, возможно, представляли своеобразное «сито», сквозь которое проходил естественный отбор всего живого на Земле.

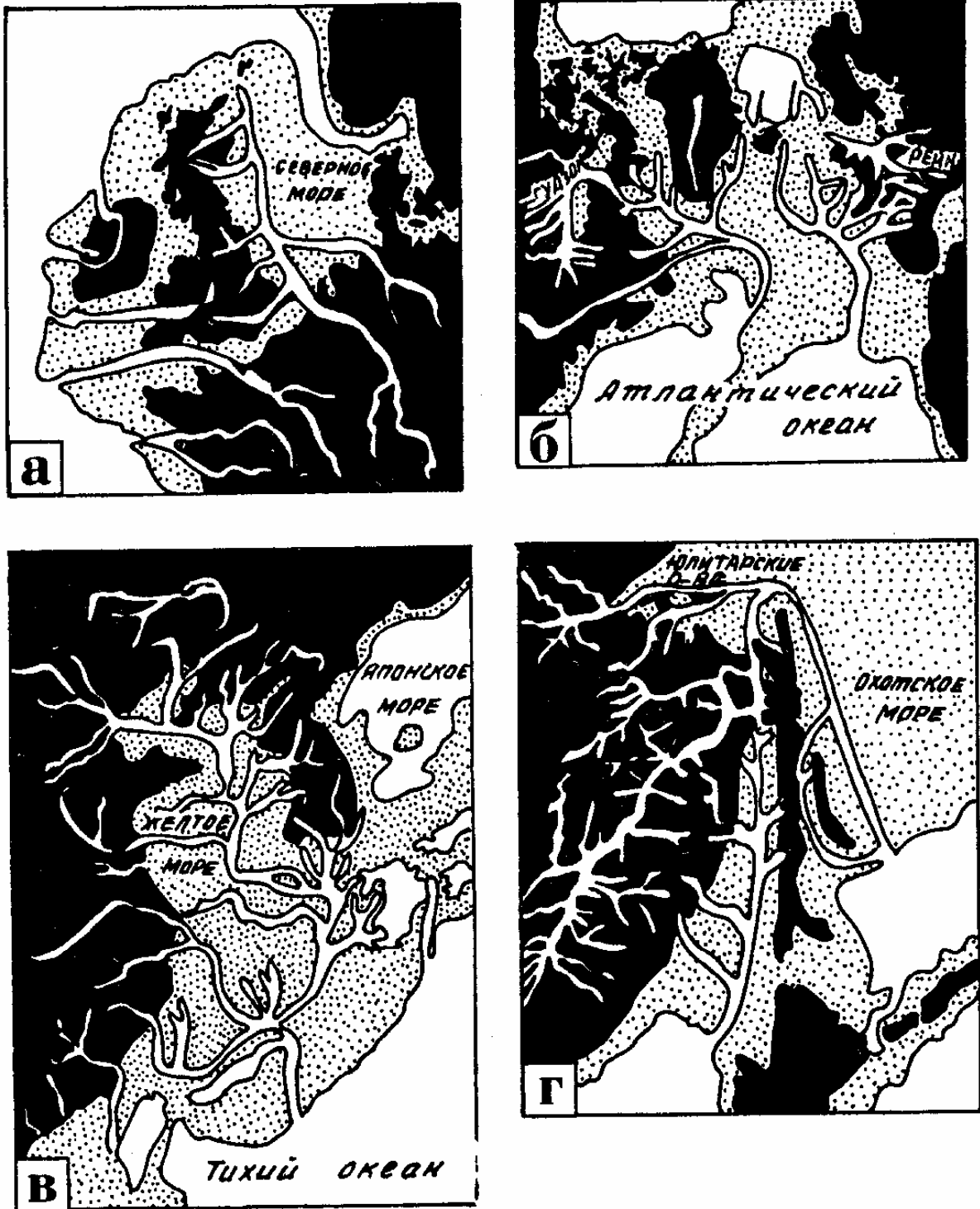


Рис. 35. Древние русла рек:

а – система Рейна и Сены; б – система Гудзона (Св. Лаврентия); в – система Хуанхэ; г – система Амура, рек Поронай и Тымь, о. Сахалин

### Тектоника плит

В 1889 г. была опубликована книга английского физика О.Фишера “Физика земной коры”. Не имея практически никакой геологической и геофизической базы, лишь на основе аналогии с движением лавы в кратере вулкана, Фишер предположил, что важнейшим геологическим процессом на Земле является выход горячего мантийного вещества на дне океанов. Это вещество отвердевает при движении от области излива, и погружается обратно в мантию в области островных дуг. Согласно Фишеру, движущим механизмом этого процесса является свободная тепловая конвекция. Книга О.Фишера настолько обогнала свое время, что практически не была замечена современниками.

В 1912 г. немецкий физик А.Вегенер выдвинул гипотезу о дрейфе континентов, положив начало новому направлению в геологии - **мобилизму**. Согласно этой гипотезе Атлантический океан является относительно молодым и когда-то южная Америка и Африка были одним континентом. В настоящее время расстояние между ними постепенно увеличивается. Основой этой гипотезы было географическое подобие очертаний континентов и сходное геологическое строение соответствующих (после совмещения береговых линий) участков этих континентов, а также сходства ископаемой флоры и фауны в верхнепалеозойских и нижнемезозойских отложениях южных материков (т.е. в период, предшествующий расширению Атлантики), а также следы общего покровного оледенения.

К 1958 году были открыты **срединно-океанические (СО) хребты**. Наиболее длинный СО хребет расположен приблизительно вдоль меридиана в Атлантическом океане и заходит в Северный ледовитый океан. СО хребет представляет собой два параллельных гребня, разделенных неглубокой впадиной шириной порядка 10 км. Суммарная протяженность всех СО хребтов Земли достигает 60 000 км. В центральной части, над СО хребтом в Атлантическом океане, глубина океана около 2.5 км а на расстоянии 1-2 тыс. км она достигает 5-6 км. Таким образом, СО хребет достаточно пологий: на дистанции в 1500 км разность высот - всего лишь в 3 км.

Затем был определён **возраст океанического дна**. Оказалось, что возраст пород океанического дна не превышает 100-150 млн. лет, причём возраст пород увеличивается при удалении от СО хребта. А возраст пород континентальной литосферы достигает 2-3 млрд. лет, т.е. приблизительно в 10 раз больше.

Далее был открыт специфический **палеомагнетизм** пород океанического дна. Магнитное поле Земли слегка изменяется с изменением положения вещества в жидком металлическом ядре Земли, что проявляется в смещении магнитного полюса относительно географического полюса (оси вращения) Земли. Именно из-за этих перемещений магнитного полюса приходится через каждые несколько лет менять навигационные карты для плавания в Северном ледовитом океане (т.к. изменяется магнитное склонение). А приблизительно один раз в 0,5 млн. лет происходит **инверсия магнитного поля** – северный и южный полюса Земли меняются местами.

Ориентация магнитного поля Земли фиксируется в горных породах, содержащих металлические (ферромагнитные) минералы. Это эффект связан с температурой **точки Кюри**. Известно, что металл может обладать достаточно

сильным собственным постоянным магнитным полем только при температуре, меньшей температуры Кюри, которая зависит от типа ферромагнетика. В частности, для железа температура Кюри равна  $768^{\circ}\text{C}$ . При повышении температуры выше точки Кюри ферромагнетик теряет свои магнитные свойства, а при охлаждении ниже точки Кюри (при кристаллизации магмы) он опять становится ферромагнетиком. Поэтому направление намагниченности определяется направлением внешнего магнитного поля.

Оказалось, что по обе стороны от СО хребта существуют приблизительно параллельные ему полосы с одинаковым направлением намагниченности пород – т.е. породы одного возраста удаляются по обе стороны от СО хребта.

В результате всех этих открытий (существование СО хребта, относительно малый возраст пород океанического дна и палеомагнетизм пород океанического дна) в 70-х годах была разработана новая теория – **тектоники литосферных плит**.

Поверхность Земли не является неподвижной структурой, она разделена примерно на 20 отдельных твёрдых (литосферных) плит, которые “плавают” в более плотном, но пластичном мантийном веществе. Плиты двигаются с различной скоростью от 2 до 20 см в год. На рис. 36 представлено разделение поверхности Земли на отдельные плиты и направление движения каждой плиты в настоящее время, в прошлом эти направления могли быть и другими.

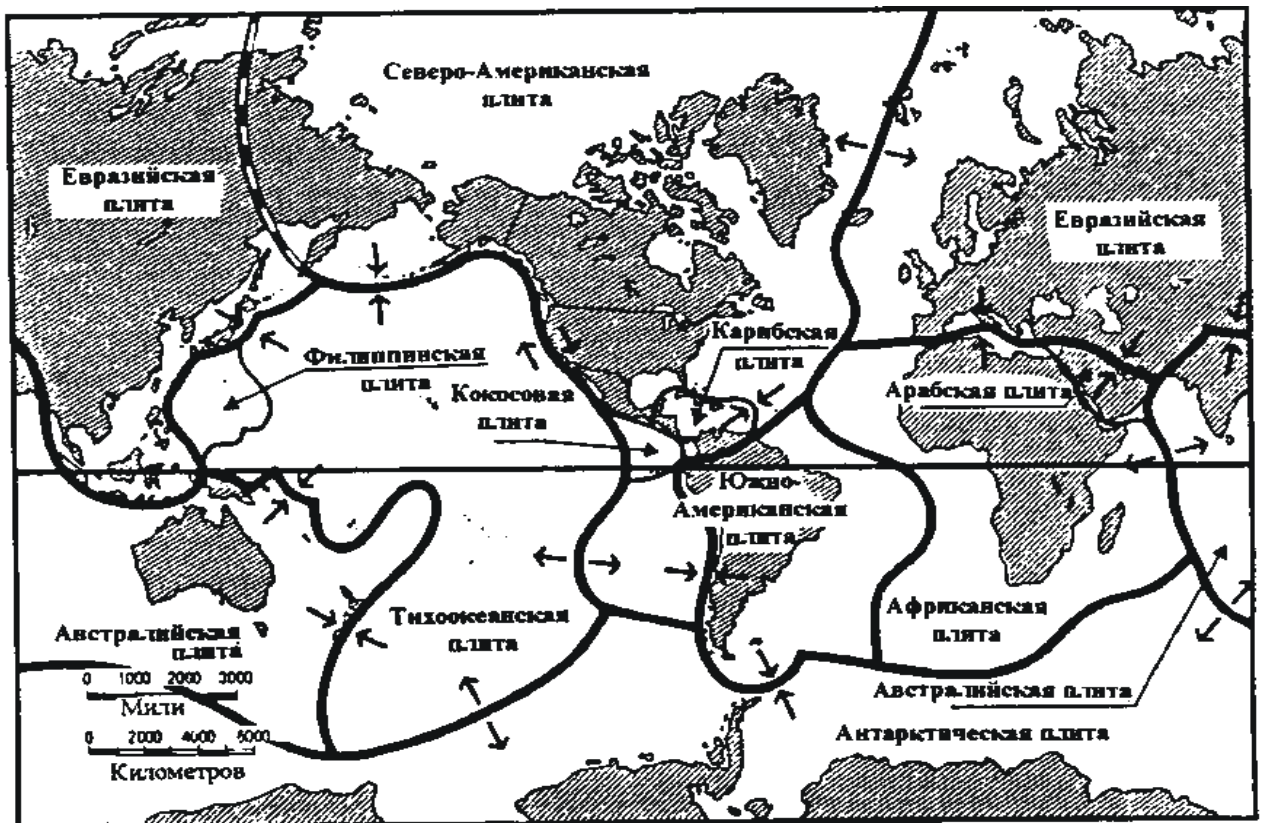


Рис. 36. Литосферные плиты и их границы

В СО хребте происходит раздвигание океанической литосферы в две противоположные стороны, а внутреннее расплавленное вещество Земли поднимает

ется из мантии и застывает на поверхности океана. В этом месте образуется новая молодая литосфера (см. рис. 37). Это явление носит название **спрединга**.

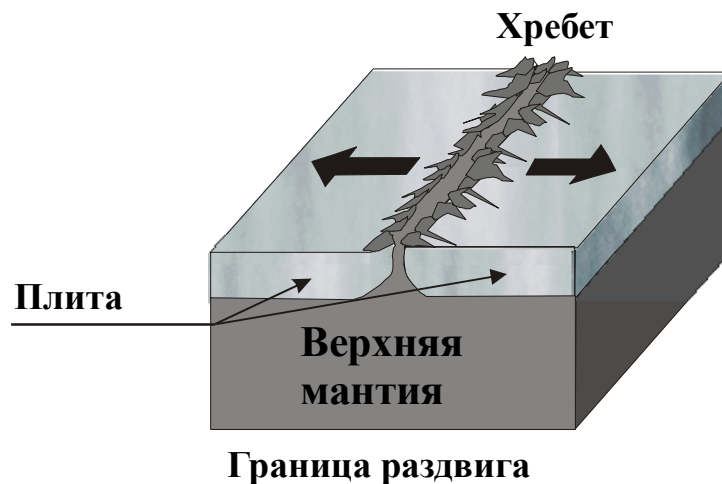


Рис. 37. Зона спрединга

Наиболее характерным срединно-океаническим хребтом является Срединно-Атлантический хребет. В настоящее время распространена гипотеза, что 200 миллионов лет назад Атлантического океана не было, а суша Земли представляла собой единый материк Пангею, которая потом раскололась именно вдоль этого хребта.

Океанические плиты двигаются до континентальных литосферных плит, здесь плиты сталкиваются друг с другом, край океанической плиты опускается в мантию, поддвигаясь под край континентальной плиты. Мантия поглощает материал опускающейся плиты (см. рис. 38). Вдоль границ таких плит образуются глубоководные желоба. Зона подвига и называется **зоной субдукции**.

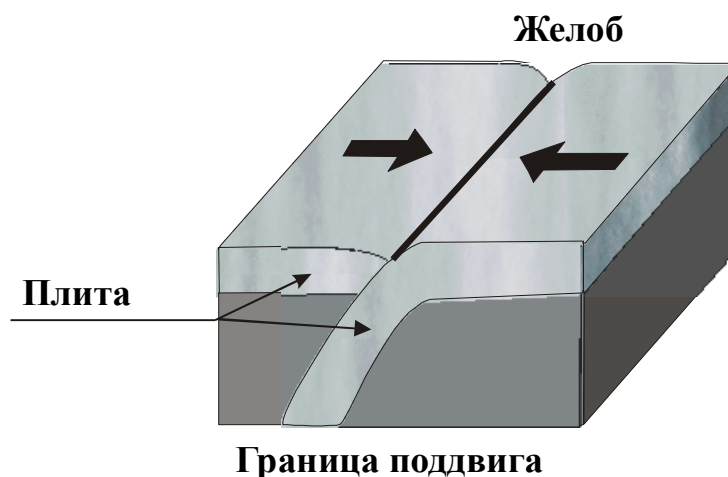


Рис. 38. Зона субдукции

Островные дуги, окаймляющие Азиатский материк с востока, прилегают к глубоководным желобам - это и есть зоны субдукции, где Тихоокеанская плита погружается под материковую Евразийскую плиту, и это - зона максимальной сейсмической активности на планете.

Но существуют плиты, которые продвигаются друг относительно друга в горизонтальной плоскости, но в противоположном направлении (см. рис. 39). Именно таким разломом является разлом Сан-Андреас в Калифорнии (США).

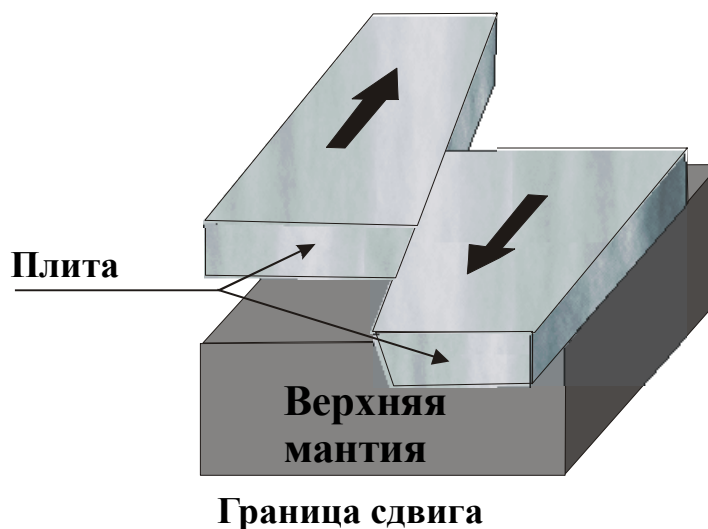


Рис. 39. Зона сдвига плит

А при движении двух континентальных плит, приблизительно равных по мощности, навстречу друг другу - эти плиты сталкиваются, но не происходит поддвига, а возникают мощные горные системы (пример - Гималаи).

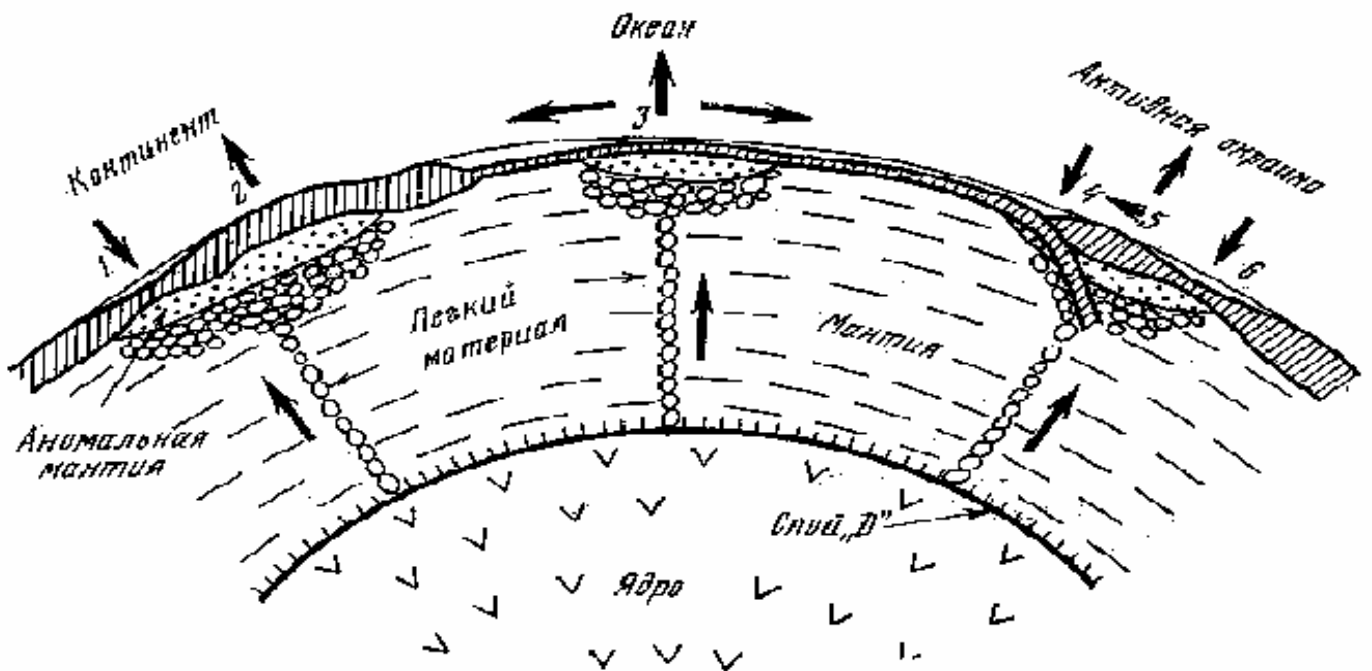
В настоящее время считается, что литосфера представляет собой тонкую сферическую оболочку, лежащую на астеносфере. Под влиянием **астеносферных течений** возникают подвижки и взаимные перемещения литосферных плит (см. рис. 40). Причиной возникновения астеносферных течений считаются конвективные процессы, происходящие в нижней мантии. Над восходящими потоками вещества в нижней мантии образуются расходящиеся астеносферные течения, в зонах которых литосферные плиты будут расходиться в стороны и между ними будут возникать **рифтовые зоны**. А над нисходящими потоками вещества нижней мантии будут возникать сходящиеся астеносферные течения, что в свою очередь вызывает наплыв одной литосферной плиты на другую и их деформацию.

Конвективные течения в мантии (их расположение, величина и направление потоков) меняются во времени. При конвективном движении вещество мантии перемещается (происходит массообмен), за время жизни Земли могло пройти более 16 полных конвективных циклов – перемещение всей массы мантийного вещества.

На рис. 41 схематически изображено изменение температуры  $T_m$  мантийного вещества при его подъёме к поверхности Земли. Т.к. кондуктивная теплопроводность является очень медленным процессом, то температура  $T_m$  изменяется очень мало и на некоторой глубине  $Z^*$  оказывается равной температуре  $T_s$  солидуса пород, а она достаточно быстро увеличивается с глубиной (приблизительно 3 К на 1 км глубины). Глубина  $Z^*$  определяет нижнюю границу особой камеры под срединно-океаническим хребтом, в которой происходит **плотностная дифференциация** мантийного вещества: тяжёлые ( $\rho \approx 3.3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), туго-



плавкие перидотиты опускаются вниз, а более легкие базальты ( $\rho \approx 2.9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) поднимаются вверх. Эти базальты и формируют океаническое дно. Исходная мантийная порода, называемая пиролитом, находится на глубине около 20 км (см. рис. 42).



**Рис. 40. Схема происхождения вертикальных и горизонтальных движений литосферы:**

дифференциация на границе ядро-мантия →  
 поднятие лёгкого нагретого материала в астеносферу →  
 вертикальные движения литосферы →  
 горизонтальные движения литосферы

1 – внутреннее море; 2 - крупное поднятие на континенте; 3 – срединно-океанический хребет; 4 – глубоководный желоб; 5 – островная дуга; 6 – краевое море

Толщина океанической литосферы определяется глубиной охлаждения и кристаллизации пиролита и зависит от длительности нахождения вещества мантии на поверхности Земли. Мощность литосферы увеличивается по мере удаления от рифтовых зон (см. рис. 43), увеличивается плотность вещества (из-за процесса кристаллизации), а с увеличением мощности литосферы понижается уровень её поверхности.



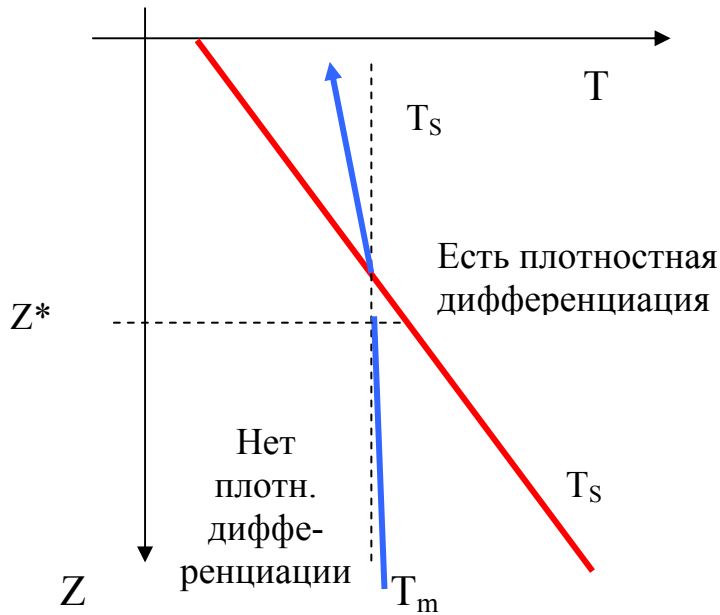


Рис. 41. Изменение температуры мантийного вещества при его подъёме к поверхности Земли

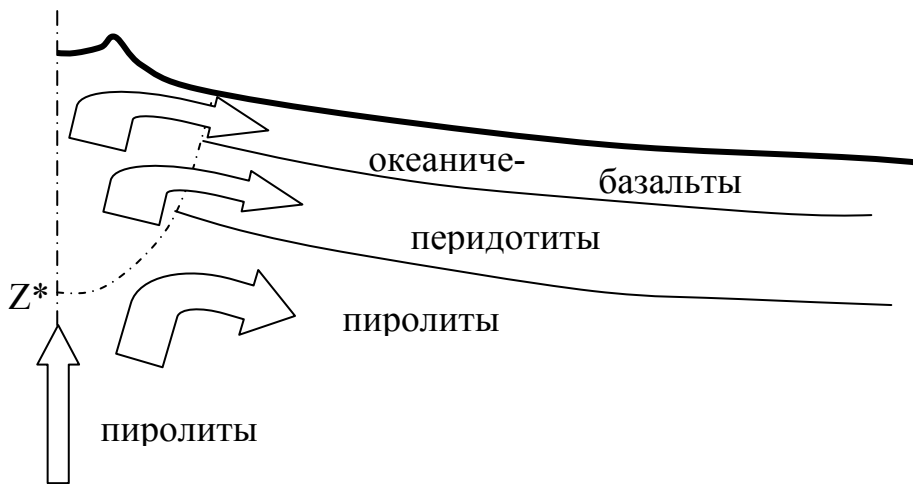


Рис. 42. Распределение мантийных пород вблизи СО хребта

### Напряжения в литосфере

Оценим механизм возникновения "природного" напряжённо-деформированного состояния горного массива с точки зрения планетарных сдвиговых напряжений в литосфере, прежде всего силы тангенциального сжатия в земной коре, свойственные Земле как космическому телу. Тангенциальные напряжения ведут к образованию разломов и, оттого как напряжения расположены в конкретном месте, получаются либо надвиги и вбросы, либо сдвиги и сколы.

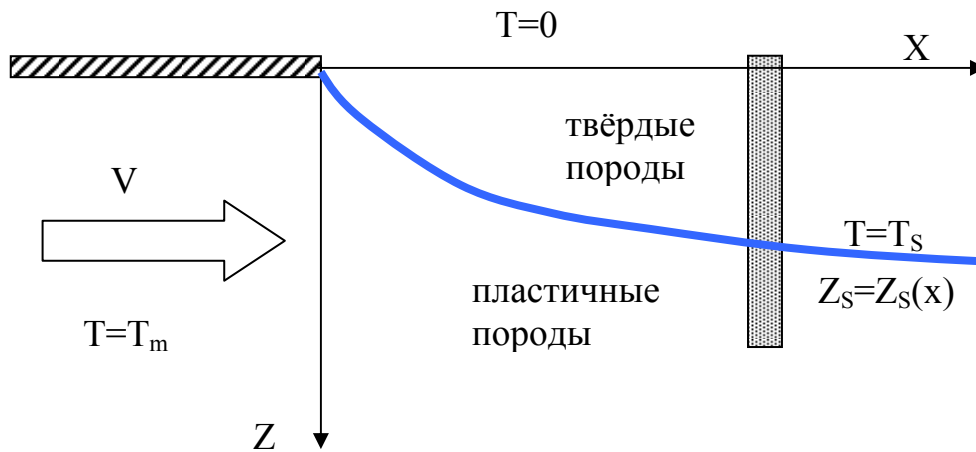


Рис. 43. Рост мощности литосферной плиты

На глубине 100÷250 км от земной поверхности в верхней мантии находится "астеносфера" - более пластичная и подвижная область (с вязкостью на 2-3 порядка ниже, чем в смежных выше- и нижележащих слоях), на этом слое как бы плавает земная кора, литосферные плиты всплывают и тонут (**теория «мобилизма»**). Погружающиеся плиты, как бомбы, только вместо взрывчатки они начинены потенциальной энергией резкого, взрывоподобного разуплотнения (при попадании в менее плотную среду) и не менее резкого схлопывания (взрыва наоборот) при раздавливании плиты в более глубоких и плотных слоях мантии. Но тяжёлая плита, несущая на себе лёгкие осадочные породы, может, не успев до конца раствориться, начать всплывать, поднимая земную поверхность (так пузырёк воздуха, прилепившись к камню, тонет, но затем всплывает). Очаг вспучивания – это обломок «лёгкой» плиты, которую затолкали океанические плиты под континентальную плиту. Получается, что глубокие недра Земли гравитационно неустойчивы, перенасыщены в местах погружения плит лёгкими осадочными породами. Исходя из модели внутреннего строения Земли, отдельные её слои от ядра до верхней мантии и коры имеют разную плотность<sup>5</sup>. Угловая скорость вращения Земли везде одинакова, линейная же различна, причём максимум её приходится на экватор. В местах наибольшего излома кривой плотности наблюдается появление срезающих сил верхней "шапки" относительно центральной части. Указанный **максимум кривизны располагается примерно у 35-й параллели**. Этой широте приурочена наибольшая сейсмичность (Б. Гутенберг, К. Рихтер, М.В. Стюарт) и удароопасность (И.М. Батугина) месторождений.

Напряжения, поддерживающие дрейф вещества астеносферы со средней скоростью 10 см/год, должны быть<sup>6</sup> порядка 2 МПа. **Тектонические подвижки** в земной коре вызваны, как полагают, диффузией, седиментацией и вытеснением вещества веществом за счет теплового, плотностного градиента, непостоянства скорости вращения Земли и положения оси вращения, дрейфа магнит-

<sup>5</sup> Батугина И.М., Петухов И.М. Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников. - М.: Недра, 1988.

<sup>6</sup> а) Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр.- М.: Недра, 1996, 217 с.; б) Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики.- М.: Недра, 1986, 301 с.

ных полюсов. Так, в европейской части России (Балтийский кристаллический щит) градиент тектонического движения вызывает в недрах на глубинах до 1-2 км тангенциальные напряжения в пределах 5-10 МПа, на Урале - в пределах 20-40 МПа, а на Северном Кавказе напряжения достигают величин 50-100 МПа.

Итак, в толще осадочных пород, не испытавших метаморфизм, и в слабо метаморфизованных породах естественное напряженное состояние определяется лишь гравитационным полем, а в скальных породах - прежде всего обуславливается градиентом тектонических сил, направленным примерно перпендикулярно к горизонтальным проекциям геологических разломов.

Известно, что скорость вращения Земли вокруг своей оси непостоянна и испытывает изменения (флуктуации), величина которых достигает 0,0004 с за период от 2 до 10 дней. По оценке А.Д.Сытинского, количество высвобождающейся по этой причине энергии в течение одного года равно  $1,17 \cdot 10^{20}$  Дж, что на три порядка выше энергии, высвобождающейся при землетрясениях за тот же период времени. По оценке Гутенберга и Рихтера, она составляет  $3 \cdot 10^{17}$  Дж, кинетическая же энергия вращения Земли равна  $2,16 \cdot 10^{29}$  Дж.

Известно, что угловая скорость вращения Земли меняется в течение года: в июле скорость бега Земли по её орбите вокруг Солнца (30 км/с) складывается со скоростью движения самого Солнца в Галактике (250 км/с), а январе – вычитается из него. Поэтому в середине лета отмечается значительная активность вулканов и горных ударов<sup>7</sup>. А по формуле Лоренца масса тела зависит от его скорости: масса больше (на одну стомиллионную) – больше сжатие планеты, больше сжатие – быстрее вращение. Эффект ежегодного изменения «активной массы» нашей планеты зависит ещё от одного параметра. Он максимален, если плоскость земной орбиты вокруг Солнца (эклиптика) параллельна движению всей системы вокруг центра Галактики. Если же эклиптика расположена поперёк этого движения, то скорость Земли не складывается и не вычитается из скорости Солнца. Сейчас Солнечная система находится намного ближе ко второму случаю, зато 50 миллионов лет назад ежегодная пульсация Земли была в 100 раз больше нынешней.

Изменение скорости вращения Земли во времени может вызвать разрушающие напряжения в земной коре. Так, по мнению Л.С. Лейбензона<sup>8</sup>, **наибольшая разность напряжений** в земной коре (в 18 МПа) наблюдается **между 30 и 45° широтами**, к которым и приурочены наиболее активные проявления сейсмичности и удароопасности. Ориентация главных осей напряжений<sup>9</sup> приведена на рис. 44.

<sup>7</sup> Петухов И.М. Горные удары в угольных шахтах.- М.: Недра, 1972.

<sup>8</sup> Батугин С.А., Батугина И.М. Изменение напряжённого состояния нетронутого массива горных пород в пространстве и во времени. – В сб.: Напряжённое состояние земной коры. М.: Наука, 1973, с. 148-157.

<sup>9</sup> Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр.- М.: Недра, 1996, 217 с.

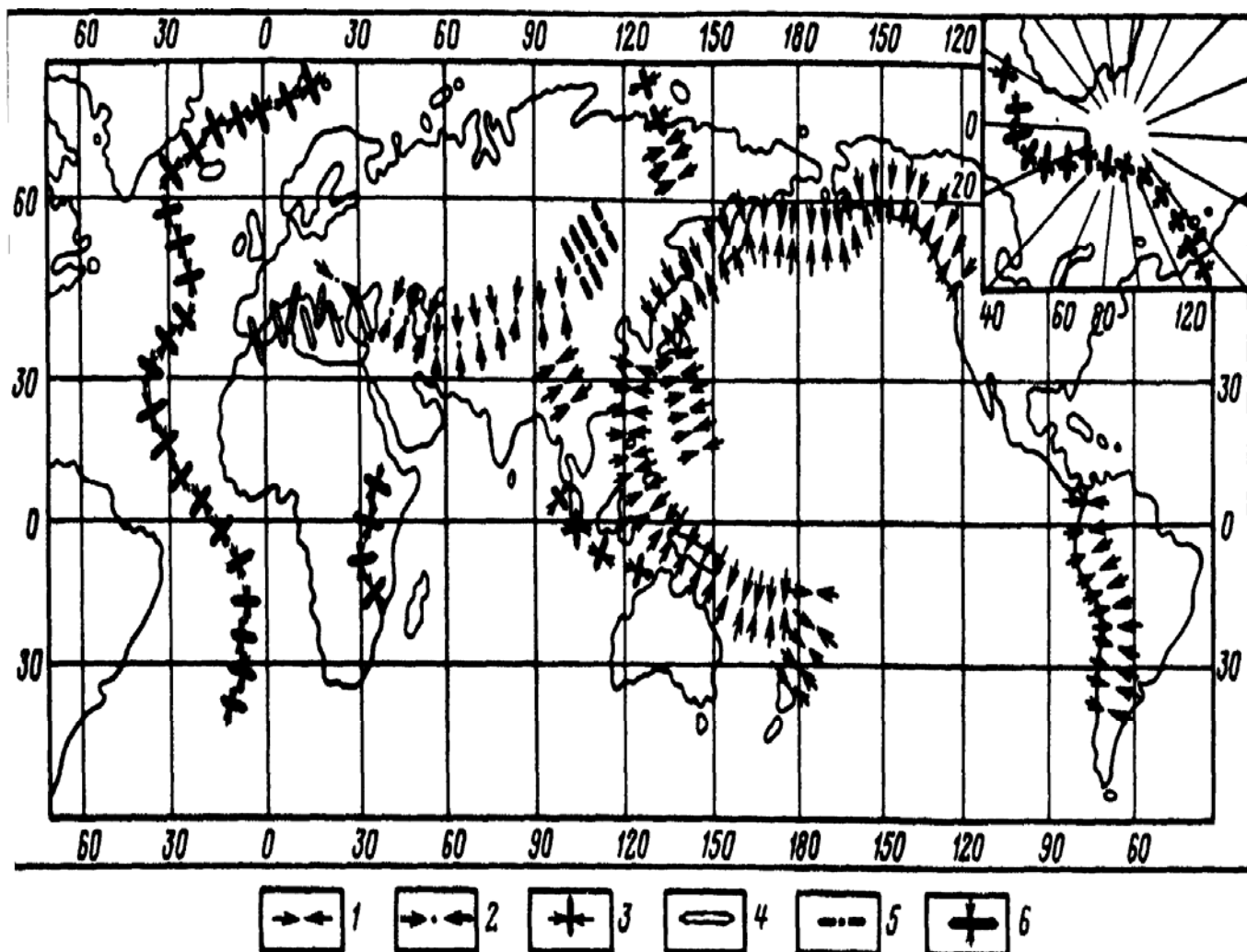


Рис. 44. Ориентация главных осей напряжений Земли  
(по А.В. Введенской и Л.Н. Балакиной):

1 - 3 - наибольшие относительные напряжения сжатия; 4 - 6 - наибольшие относительные напряжения растяжения, ориентированные горизонтально и вкрест простирания структур

Наибольшая разность напряжений  $\Delta\sigma$  в тонкой земной коре ( $1/100$  радиуса Земли), вызываемая замедлением скорости вращения Земли (которое в нашу эпоху составляет  $0,0024$  с за 100 лет), такова:

$$\Delta\sigma = \Delta_1 \rho a^2 D(a) \gamma ,$$

где  $\Delta_1$  - величина, зависящая от географической широты места;  $\rho$  - плотность земной коры (принята 50% средней плотности Земли);  $a$  - средний радиус Земли;  $D(a)$  - величина, определяемая по теории упругих приливов Земли из наблюдений над колебаниями горизонтального маятника и приливами длинного периода ( $D/a \sim 2/3$ );  $\gamma$  - величина, определяемая по формуле

$$\gamma = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right),$$

$\omega_0$  и  $\omega$  - скорость вращения Земли, соответственно начальная угловая и в рассматриваемый момент времени, км/с.

Ниже приведены значения наибольшей разности напряжений для разных широт<sup>10</sup>:

$\varphi$ , градус ... .	0	15	30	45	60	75	90
$\Delta\sigma$ , МПа .....	74	69	55	37	41,5	49	51,4

---

<sup>10</sup> Батугин С.А., Батугина И.М. Изменение напряженного состояния нетронутого массива горных пород в пространстве и во времени. – В сб.: Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973, с. 148-157.