



# Общая геология

## *Лекция №2*

Форма, строение, состав и  
естественные поля Земли

# План лекции №2

## **I. Размеры и форма Земли**

- Сфероид,
- Геоид

## **II. Внутреннее строение Земли**

- Основные источники информации,
- Сейсмический метод исследования, главные геофизические границы

## **III. Основные оболочки Земли**

- Кора,
- Мантия,
- Ядро
- Литосфера и астеносфера, понятие изостазии

## **IV. Состав и физические характеристики оболочек Земли**

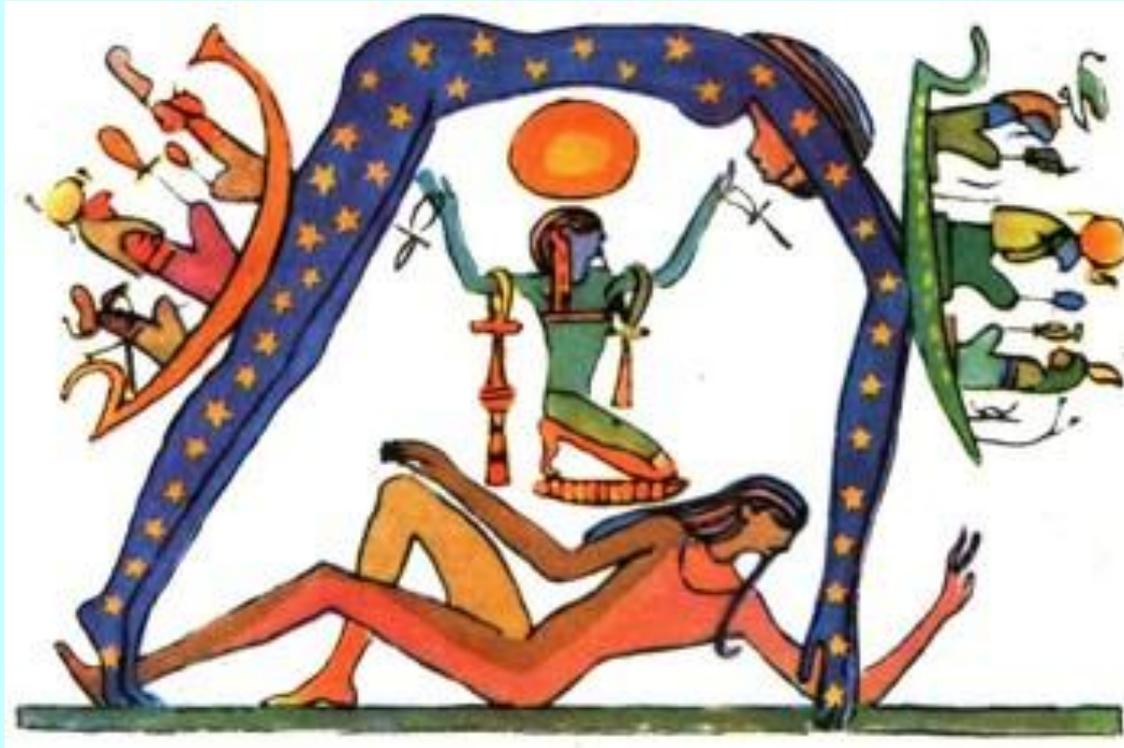
- Химический состав
- Агрегатное состояние и плотность,
- Плотность,
- Давление,
- Температура

## **V. Естественные физические поля Земли**

- Гравитационное поле,
- Тепловое поле, тепловой поток, геотермическая ступень и градиент
- Магнитное поле, инверсия магнитного поля, магнитосфера

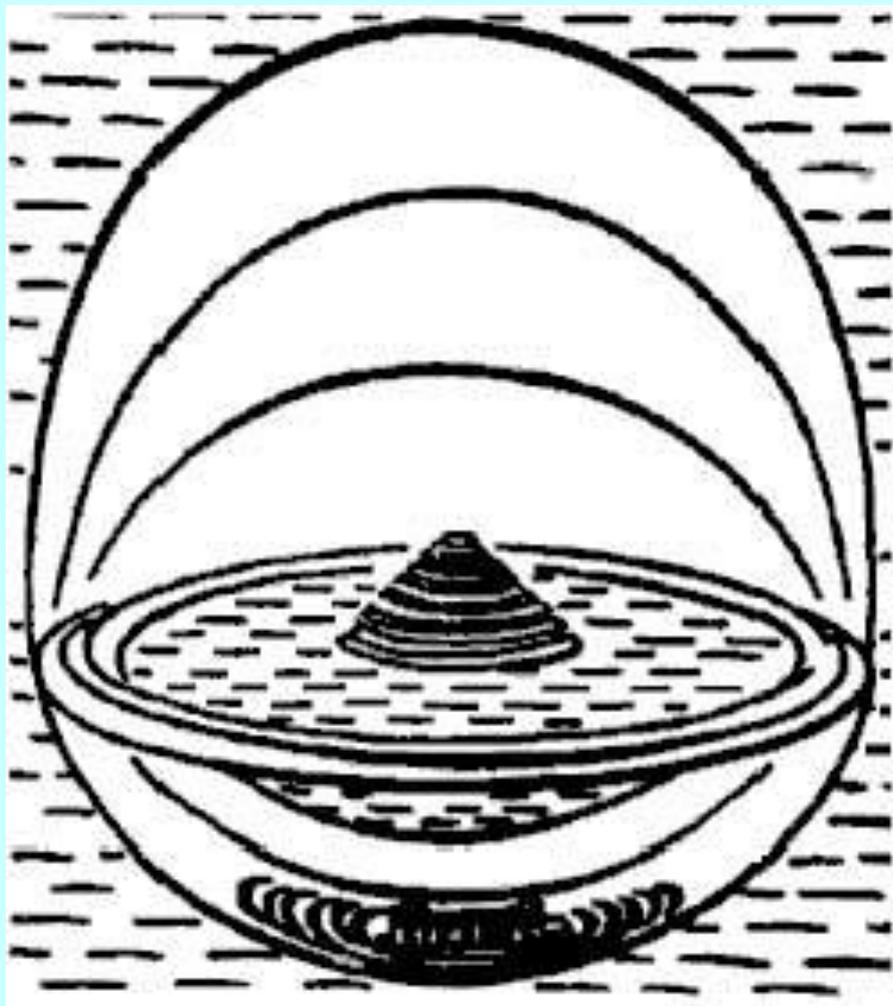
# I. Размеры и форма Земли

## Мир в представлении древних египтян



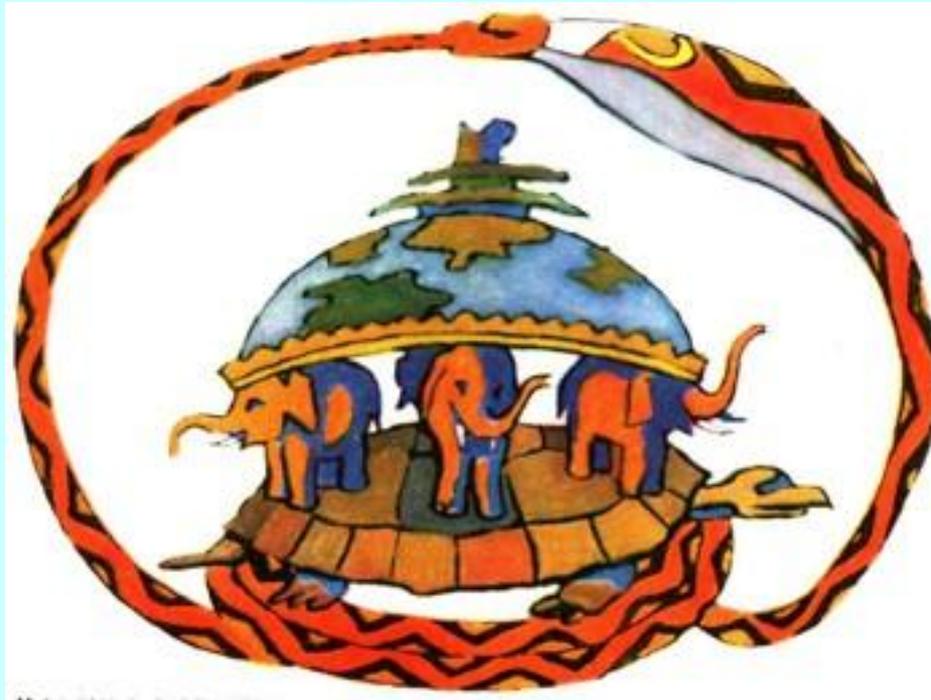
Внизу – лежащий Геб, олицетворяющий землю; вверху – Нут, олицетворяющая небо; между ними – Мау, олицетворяющий разумное начало, управляющее равновесием мира; две лодки, плывущие по небу, олицетворяют восходящее и заходящее солнце.

# Представления о Земле у шумеров



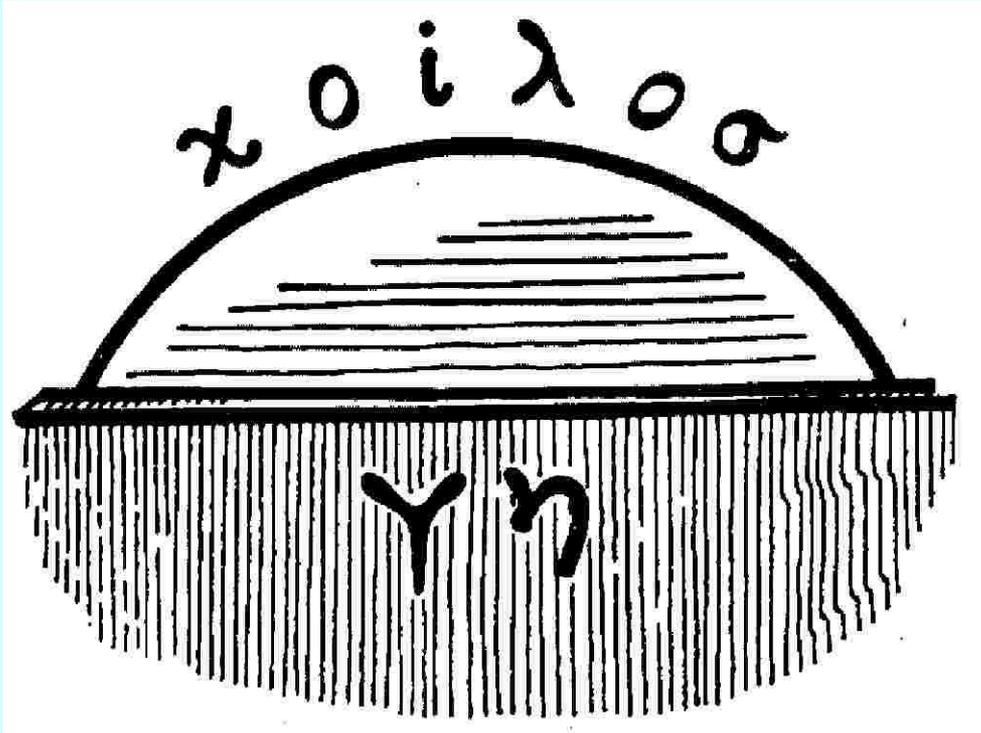
За 3 тысячи лет до нашей эры в Шумере (Месопотамия) Земля представлялась в виде плоского диска, лежащего посреди безграничного океана

# Устройство мира по индийским сказаниям



Древние индийцы представляли Землю в виде полусферы, опирающейся на слонов. Слоны стоят на огромной черепахе, а черепаха на змее, которая, свернувшись кольцом, замыкает околоземное пространство

## Древние греки

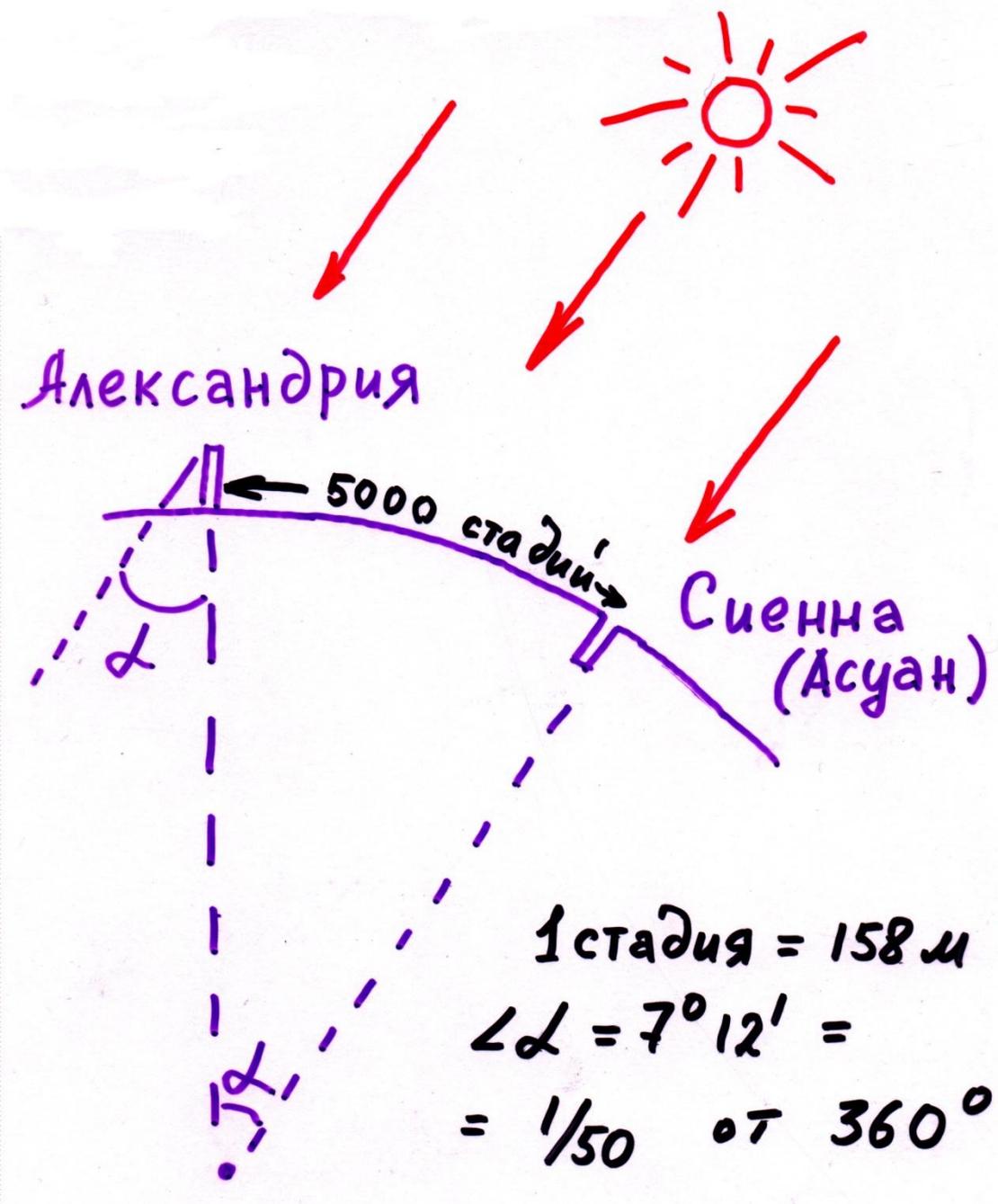


Раннее представление о вселенной древних греков: плоская земля и небесный свод

Со времён Пифагора (ок. 580 – 500 год до н.э.) Землю признавали шаром.

В V веке до н.э., Парменид (540-480 гг. до н.э.) и другим мыслителям пифагорейской школы считают форму Земли шарообразной и помещают ее в центр Вселенной. Эти взгляды разделяли Сократ и Платон.

Впервые математическое вычисление размеров Земли удается Эратосфену (около 275-194 гг. до н.э.) около 240 года до н.э.

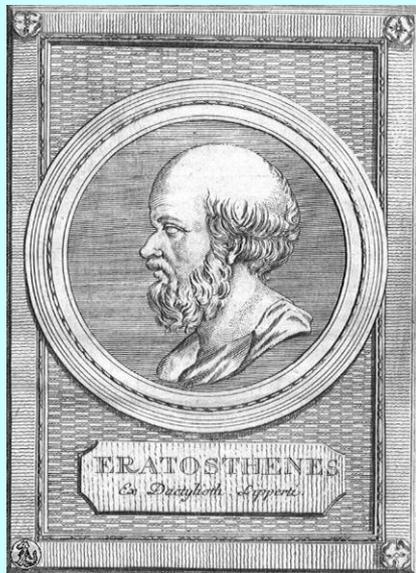


В 240 г.до н.э. Эратосфен провёл эксперимент по измерению длины меридиана. В день летнего солнцестояния 19 июня в полдень с помощью скафиса был измерен  $\alpha$  и рассчитан радиус Земли.

Локр. = 50 x 5000 стадий x 158 м = 39 500 км (Lмер. = 40 008,548 км)

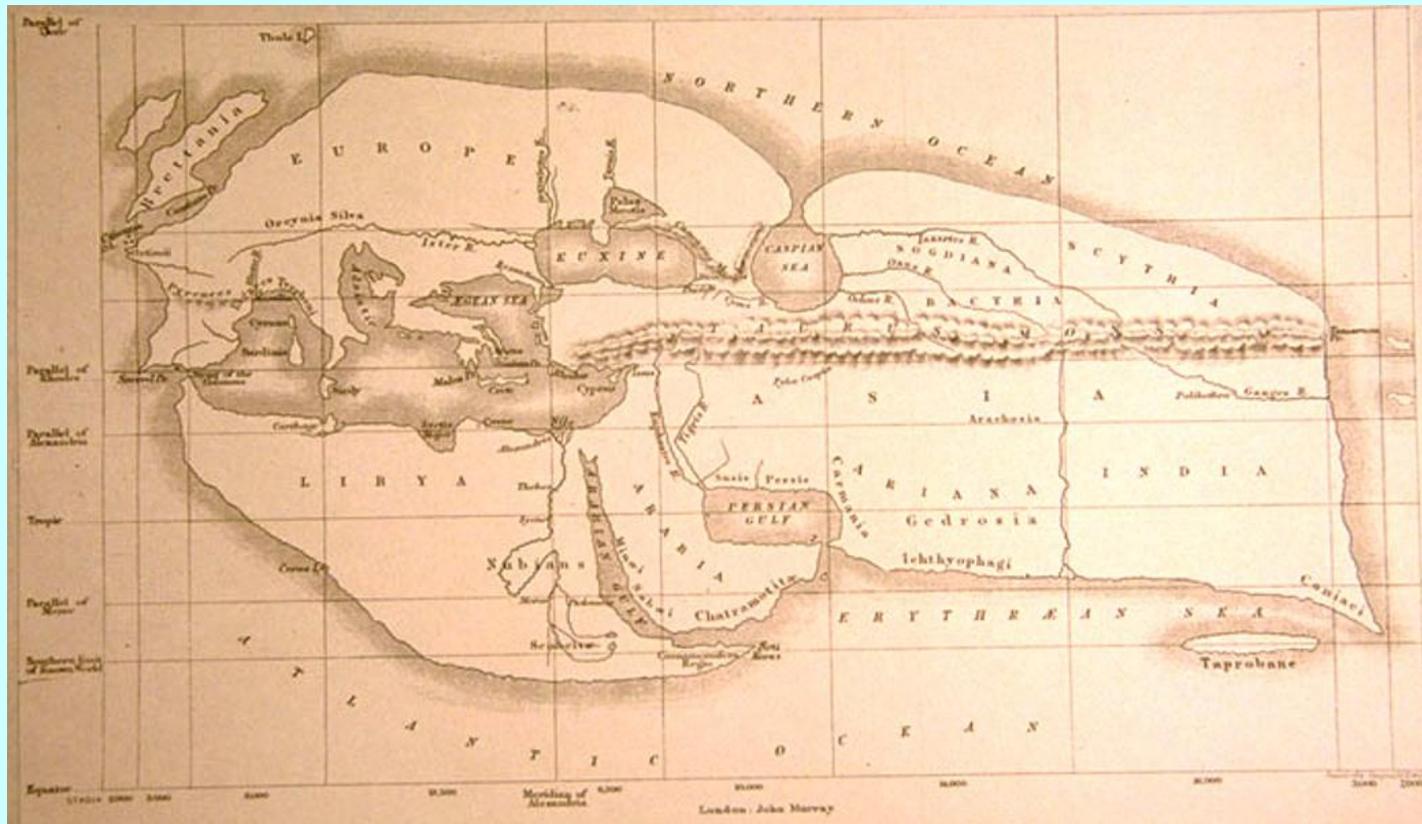
R Земли по Эратосфену = 6 290 км (R = 6371 км).

Ошибка ~ 1,3 % !!!



Эратосфен Киренский (276 – 94 год до н. э.)  
Ввел термин «География»  
«География» в трёх книгах.

Карта  
Эратосфена

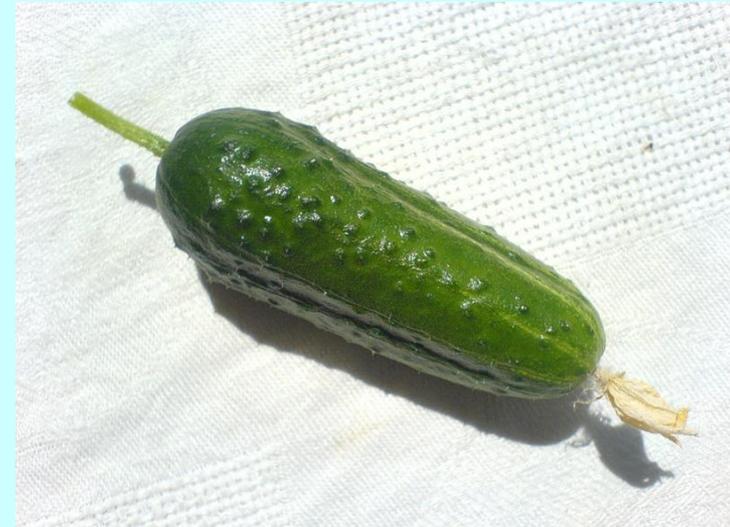


# Помидор или огурец?

По теории эфирных вихрей Р.Декарта (1596-1650), Земля должна иметь форму - вытянутого сфероида.

И. Ньютон (1643 – 1727) теоретически доказал, что Земля, как вращающееся тело, должна быть сплюснута у полюсов и иметь форму эллипсоида вращения (сфероида).

По Ньютону, разница между экваториальным и полярным радиусами Земли должна составлять  $1/300$  от среднего радиуса Земли.



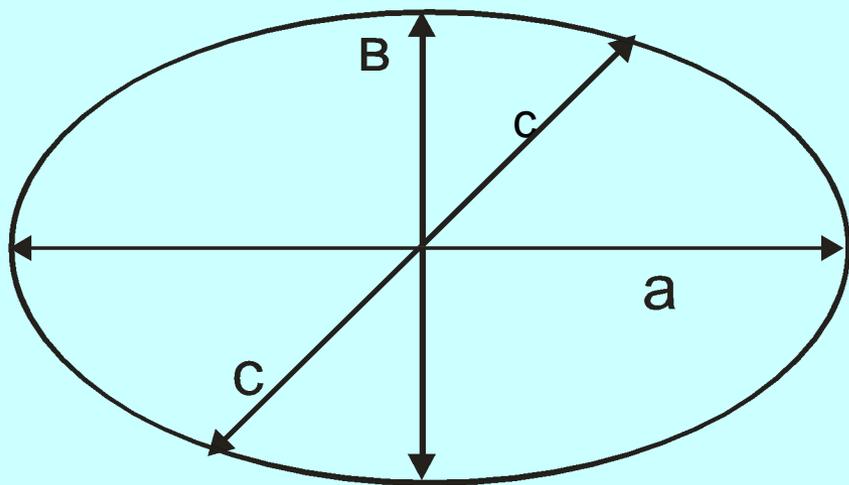
или



# Трехосный эллипсоид Красовского

Только в следующем веке, в результате измерения длины двух дуг меридиана, у экватора (1735-1743гг. в Перу) и близко к полюсу (1736-1737 гг. в Лапландии) было подтверждено сжатие Земли у полюсов.

Сфероид



$$R_{\text{экв.}} - R_{\text{пол.}} = 21,381 \text{ км}$$

Наиболее точно форма и размер Земли были вычислены А.А.Изотовым в 1940 г. Выведенная фигура была названа эллипсоидом Красовского.

Параметры:

*экваториальный радиус* 6378,245 км,

*полярный радиус* 6356,863 км,

*полярное сжатие* 1/298,25,

*экваториальное сжатие* 1/30000.

Разница между экваториальным и полярным радиусами составляет 21 381 м, а экваториальные радиусы в направлении Африки и Бразилии отличаются на 213 м.

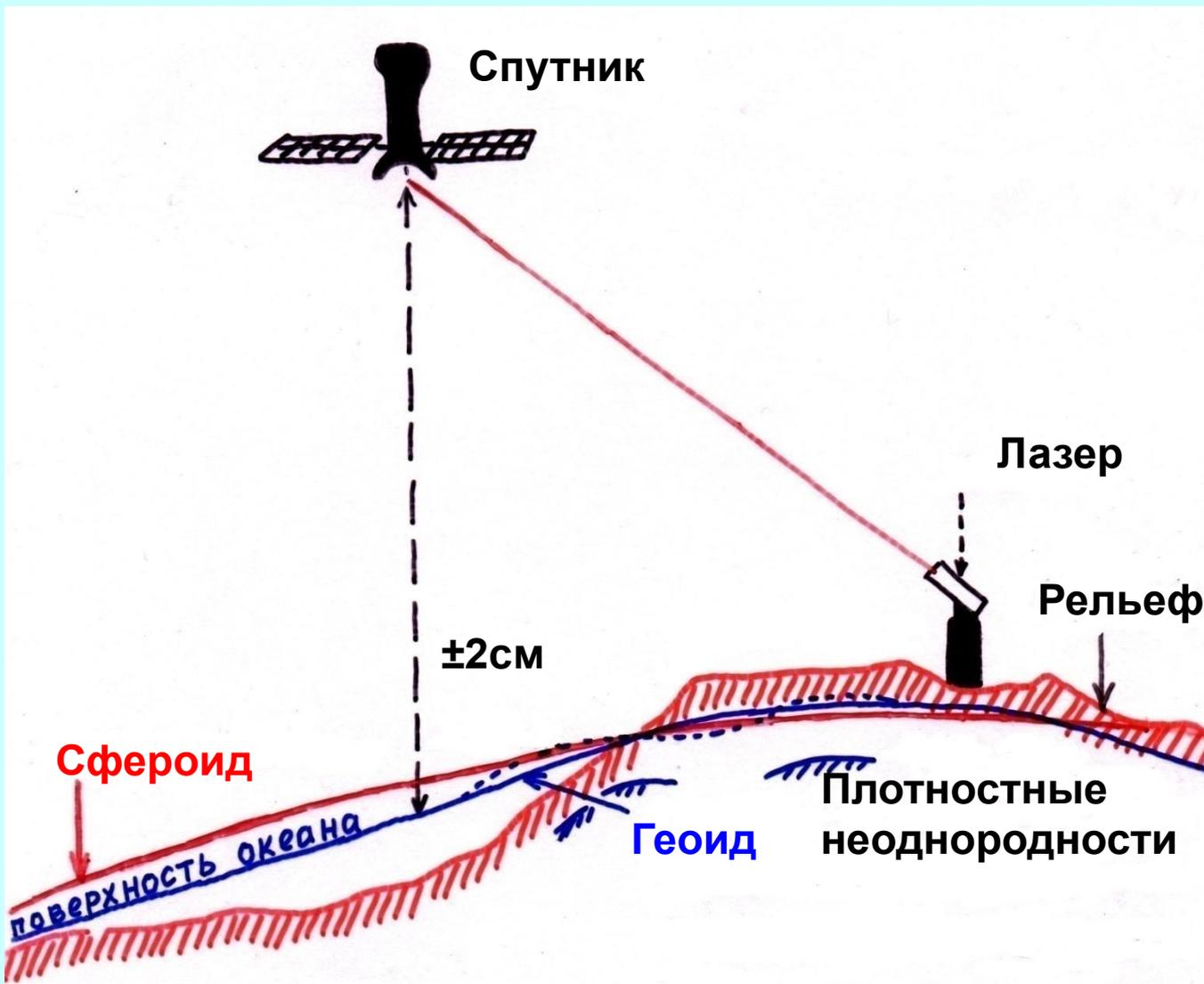
*Ср. радиус* Земли принят **6 371,302 км.**

**Сфероид – воображаемая поверхность, отвечающая идеальному вращающемуся телу с объёмом и массой Земли (идеальная Земля)**

# Геоид - землеподобный

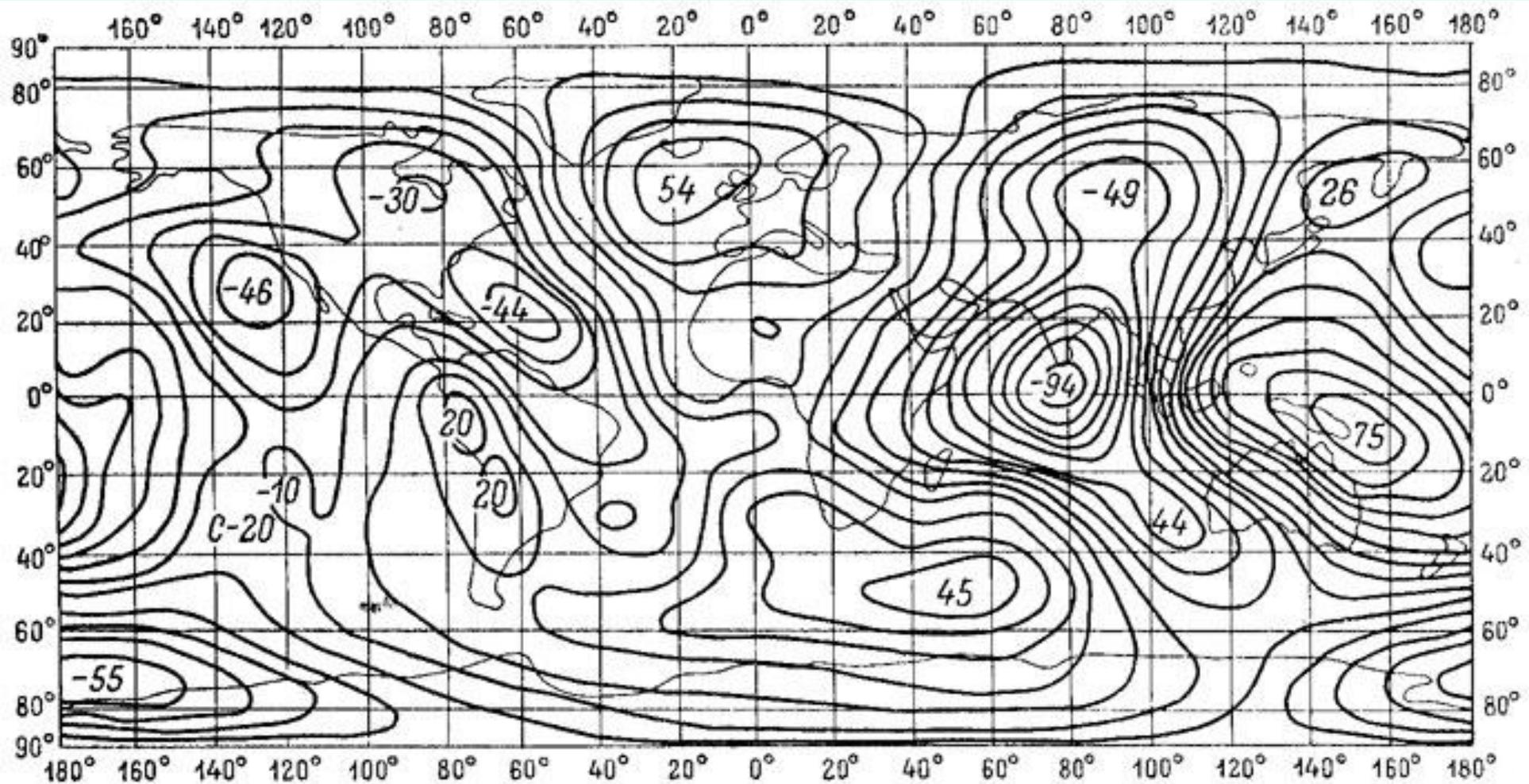
И. Листинг в 1873

**Геоид** – уровенная поверхность, совпадающая со средним уровнем невозмущенного океана, условно продолженная под континенты. Это эквипотенциальная поверхность, или – поверхность одинаковых значений силы тяжести, которая в каждой точке перпендикулярна отвесной линии.



Геоид отражает распределение силы тяжести на Земле.

# Карта отклонений высот геоида от эллипсоида Красовского



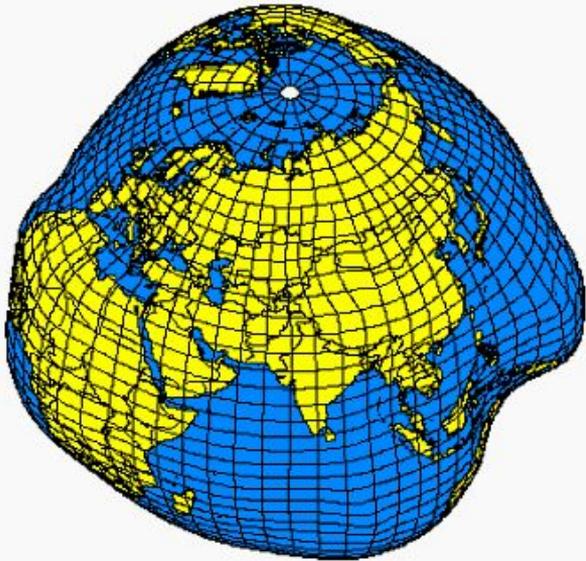
**Исландия + 54 м, Цейлон – 100 м**

# Физические характеристики Земли.

Экваториальный радиус Земли	6 378,160 км
Полярный радиус Земли	6 356,777 км
Сжатие земного эллипсоида	1:298,25
Средний радиус Земли	6 371,032 км
Длина меридиана Земли	40 008,550 км
Длина экватора Земли	40 075,696 км
Площадь поверхности Земли	$510,2 \times 10^6 \text{ км}^2$
Площадь поверхности суши	$149 \times 10^6 \text{ км}^2$
Объём Земли	$1,083 \times 10^{12} \text{ км}^3$
Масса Земли	$5,976 \times 10^{24} \text{ кг}$
Средняя плотность Земли	$5,518 \text{ г/см}^3$

# Земля имеет форму груши!

Земля сплюснута и у экватора (разность полюсей  $\sim 214$  м), т. е. Земля – трехосный эллипсоид



Отличие геоида от трехосного эллипсоида может быть  $\pm 100$  м. Это вызвано **неравномерным распределением** масс как на поверхности Земли (океаны и континенты), так и внутри неё.

Итак, форма Земли скорее всего напоминает грушу, причем, немного «откушенную» со стороны Индийского океана.



# II. Внутреннее строение Земли

## Источники информации

Самая высокая вершина – Эверест 8 848 м

Самая глубокая впадина – Марианский желоб – 11 022 м



Самая глубокая шахта в мире (ЮАР) ~ 4,5 км

Самая глубокая скважина в мире – Кольская сверхглубокая -12 262 м

Начало бурения 1970 г.



# Кимберлитовые трубки

Трубки взрыва, выносящие на поверхность с глубин 150 – 200 км обломки вмещающих пород (ксенолиты)

Трубка Мир (г. Мирный, Якутия)



Глубина 525 м

Верхний  
диаметр -  
1200 – 1100 м

Нижний  
диаметр -  
50 -210 м

# Ксенолиты в магмах



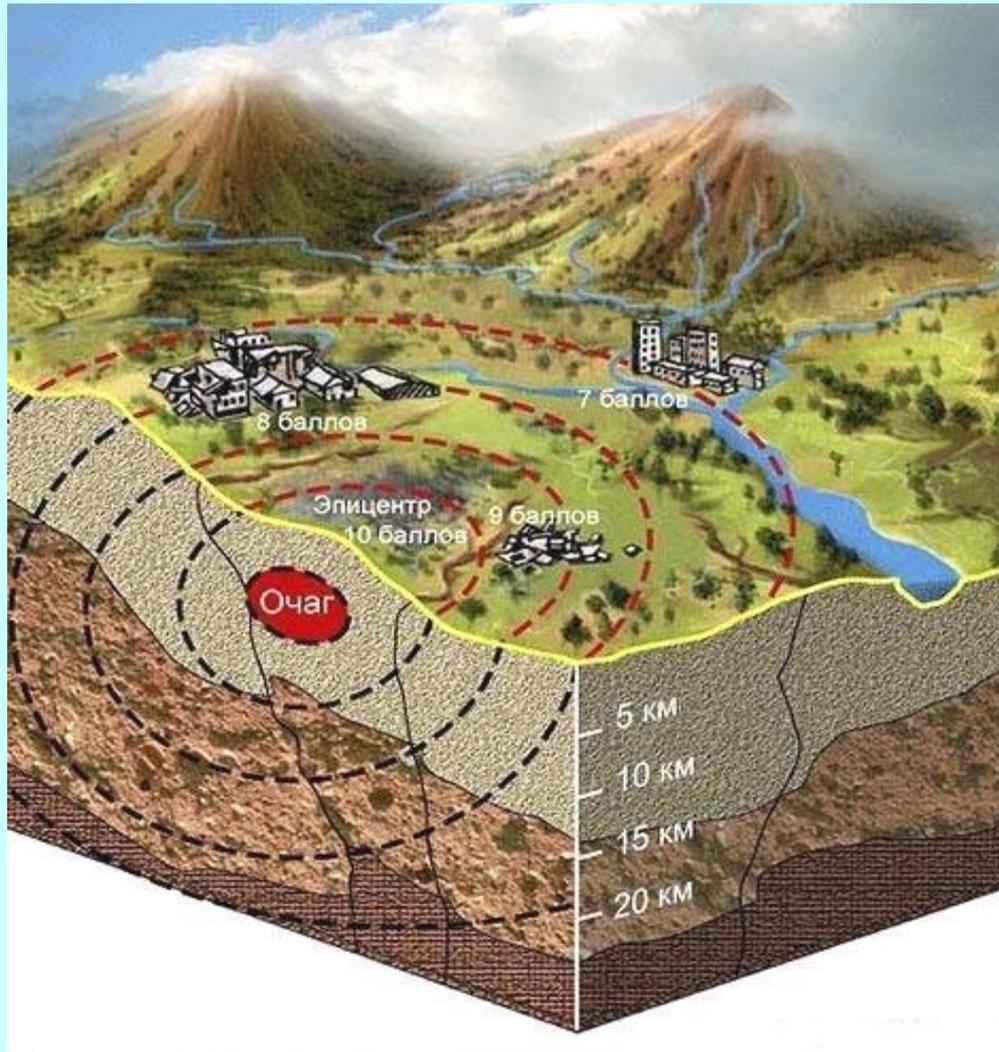
# Метеориты



# Косвенные методы изучения: методы физики, химии, экспериментальной петрологии

- Представления о составе, строении и физическом состоянии недр Земли преимущественно основываются на данных **комплекса методов**.
- Главный – **сейсмический метод**, основанный на регистрации скорости распространения в теле Земли упругих волн, вызываемых землетрясениями или искусственными взрывами.
- **Волны** – направленные возмущения среды, переносящие энергию.
- **Упругие волны** – волны, распространяющиеся в упругой среде, переносящие энергию и механические возмущения (деформации). Упругие волны бывают *объёмными* и *поверхностными*.

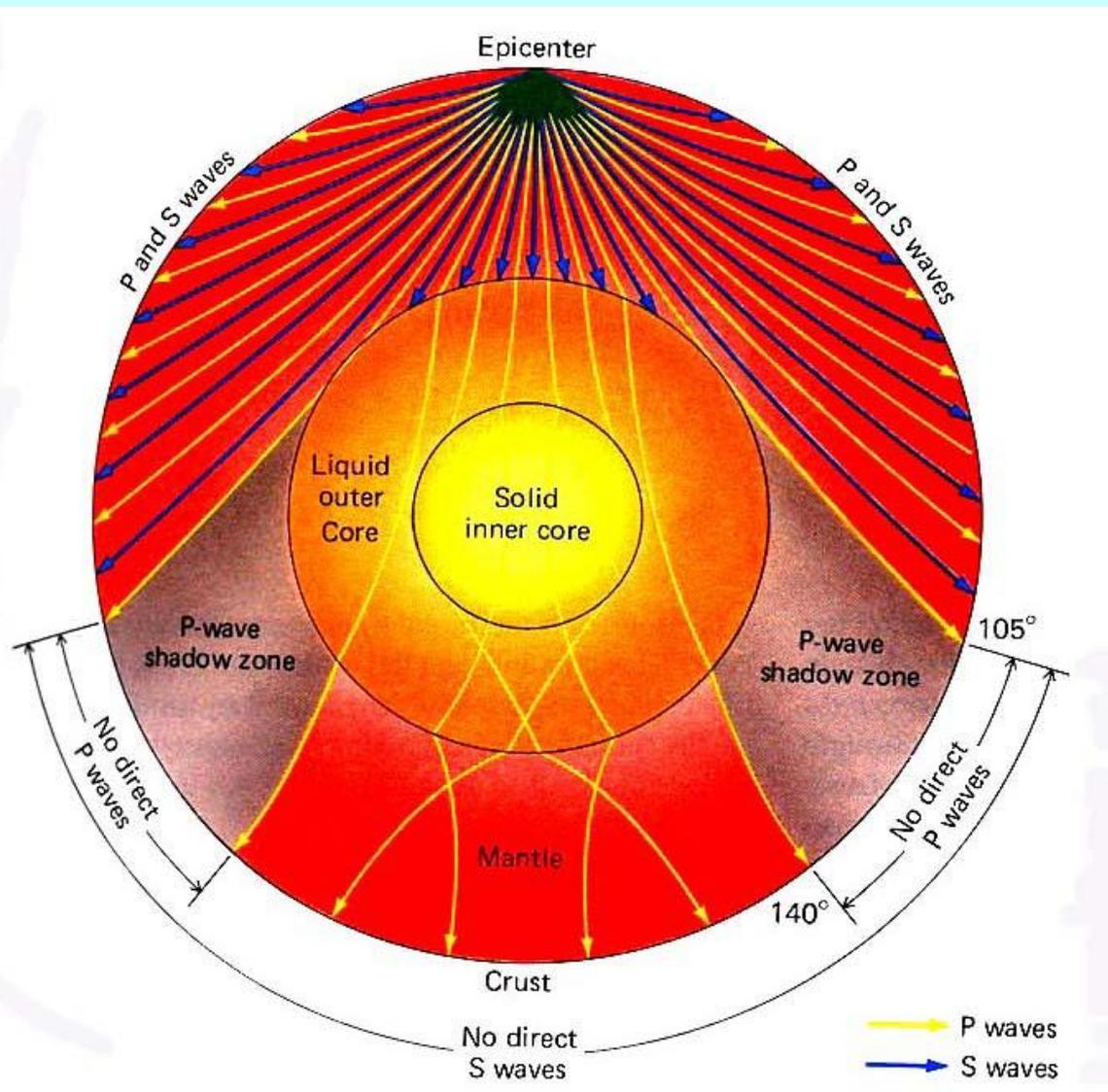
# Объемные сейсмические волны (Пуассон, 1828 год)



Возникают в очаге землетрясения размером в несколько км и, распространяясь во все стороны на огромные расстояния, пронизывают всю Землю.

Ударные волны распространяются в разные стороны от эпицентра. Сила землетрясения оценивается в баллах от 1 до 12.

# Схема прохождения объёмных сейсмических волн через геосферы

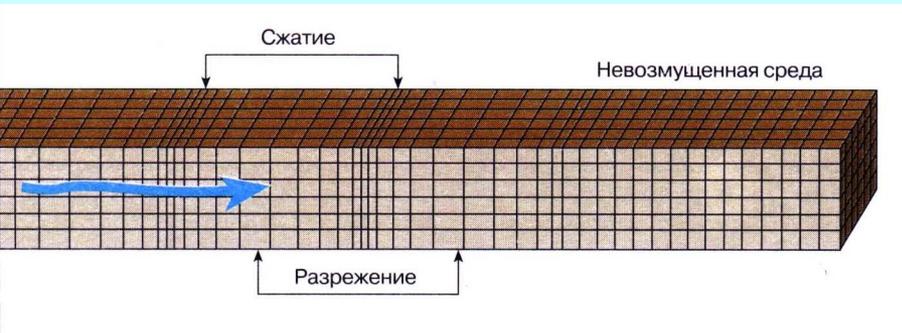


Волны записываются специальными приборами **сейсмографами** в виде **сейсмограмм**.

Регистрация волн происходит на **сейсмических станциях**.

# Типы объемных сейсмических волн

1. Продольные сейсмические волны, Р-волны - первичные(primary), волны сжатия-разрежения. Реакция среды на **изменение формы и объёма**.



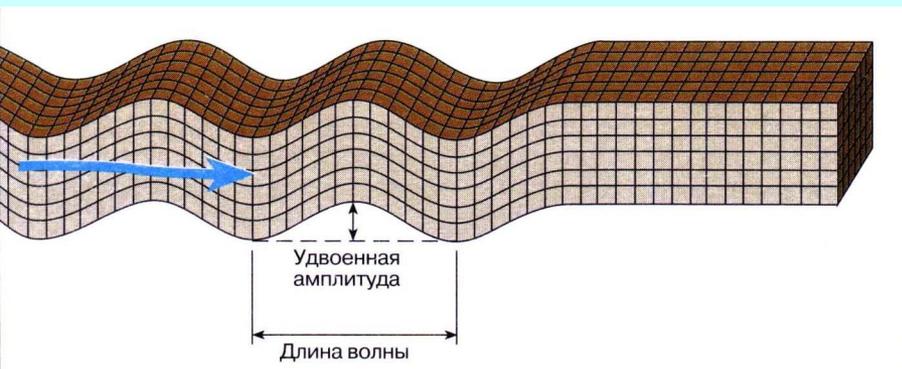
$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

$K$  – модуль  
всестороннего  
сжатия.

$\mu$  – модуль сдвига.

$\rho$  - плотность

2. Поперечные сейсмические волны, S-волны, вторичные (secondary) волны - волны сдвига. Реакция среды на **изменение только формы**.

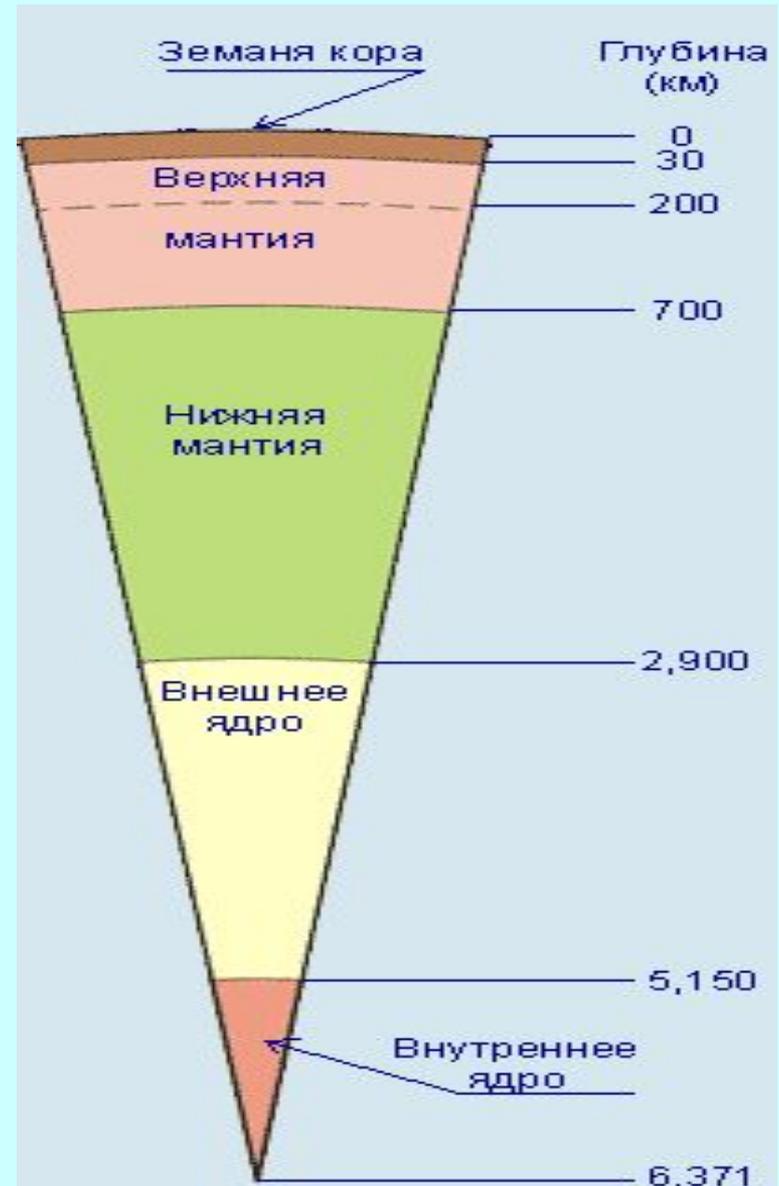
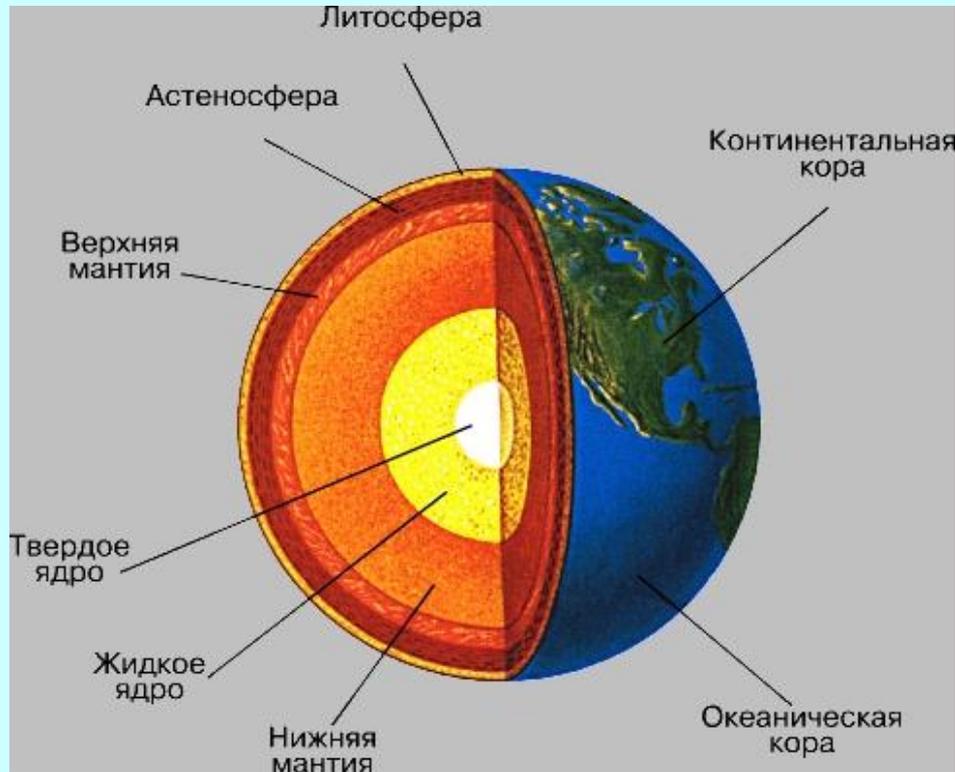


$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

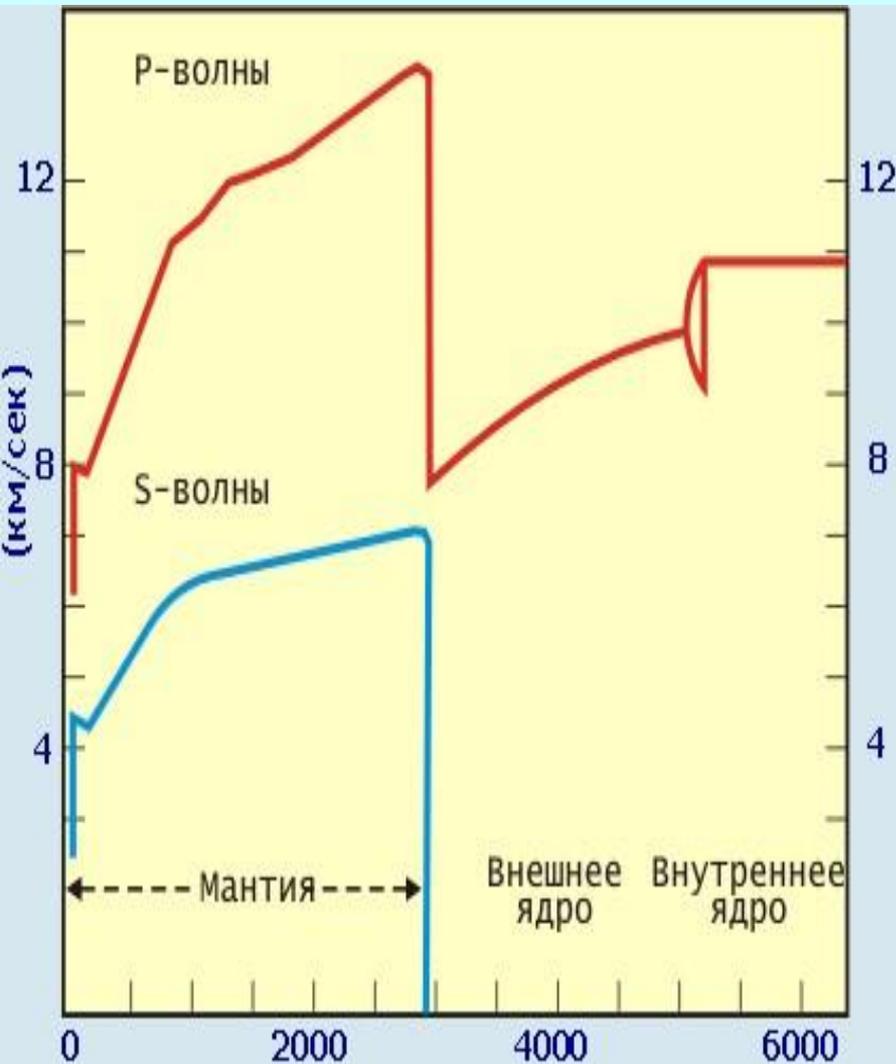
$V_s$  в жидкостях  
= 0, т.к. модуль  
сдвига в  
жидкостях = 0.

$V_p > V_s$  всегда ~ в 1,7 раза.

# III. Основные оболочки Земли



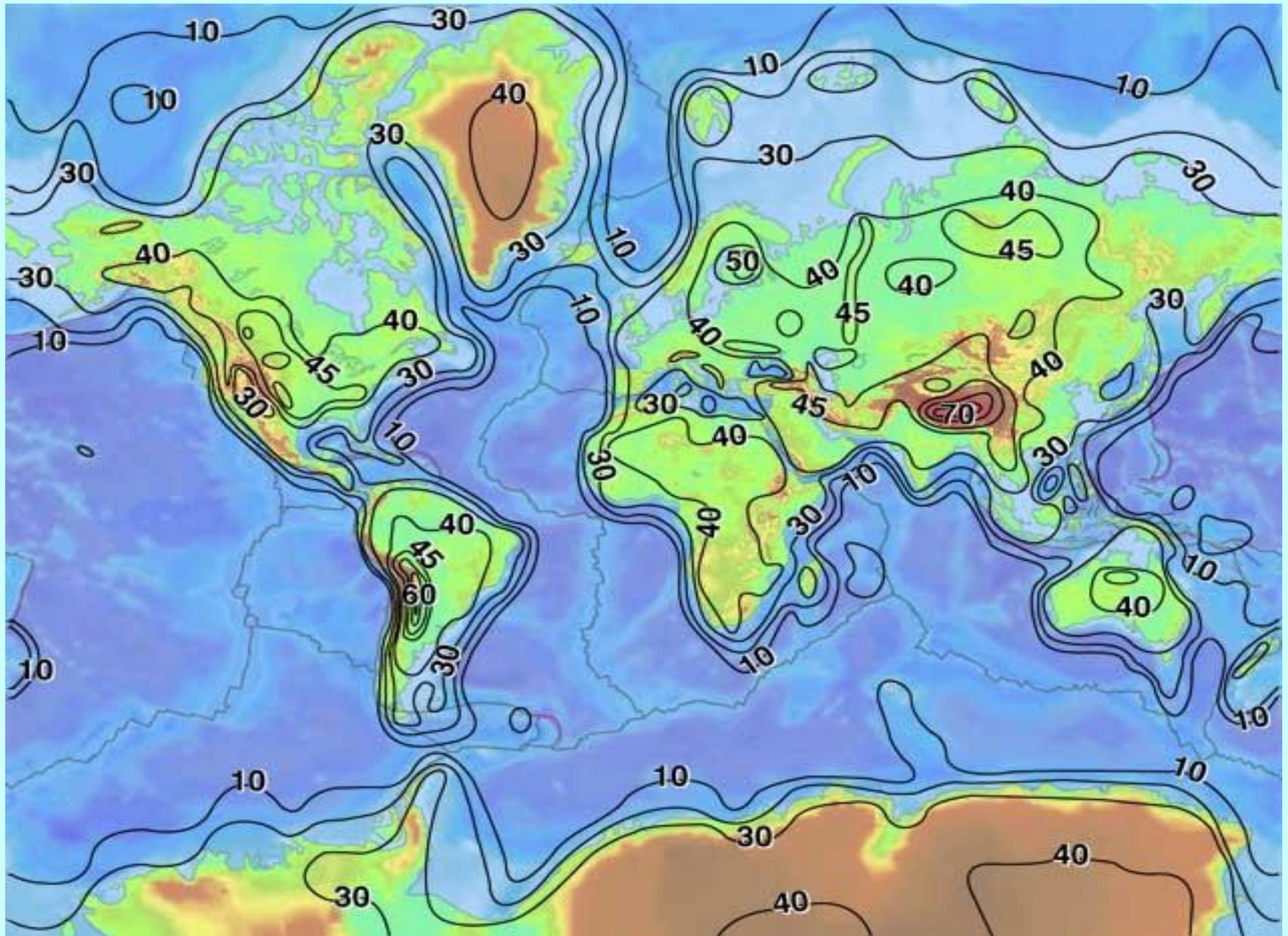
# График скорости распространения объёмных сейсмических волн в пределах Земли



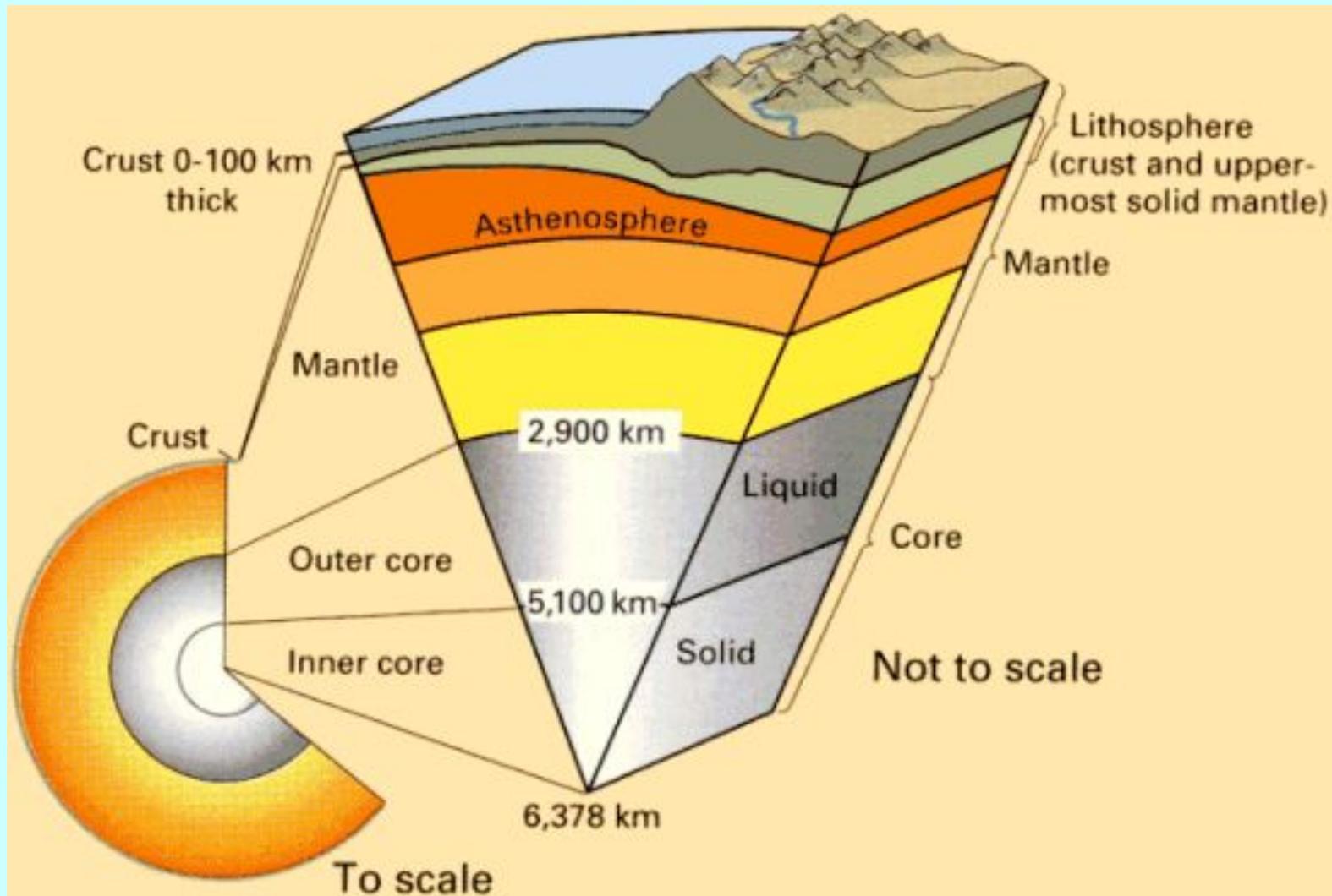
## Главные особенности графика

1. Резкое увеличение  $V_p$  и  $V_s$  волн в интервале глубин 5 – 75 км. Сейсмический раздел открыт в 1909 г. **А. Мохоровичичем** (1857-1936) и назван границей **Мохо**, или **М**. Это граница земной коры и мантии.
2. Резкое падение  $V_p$  волн и полное исчезновение S-волн на глубине ~ 2900 км. Раздел открыт в 1914 г. **Б. Гутенбергом** (1889-1960). **Граница Гутенберга** - граница между мантией и внешним ядром.
3. На глубине 5120 км вновь резкое увеличение  $V_p$  волн - **граница Леманн**. Твёрдое внутреннее ядро было открыто в 1936 г. **И. Леманн**.

# Мощность земной коры



# Литосфера и астеносфера



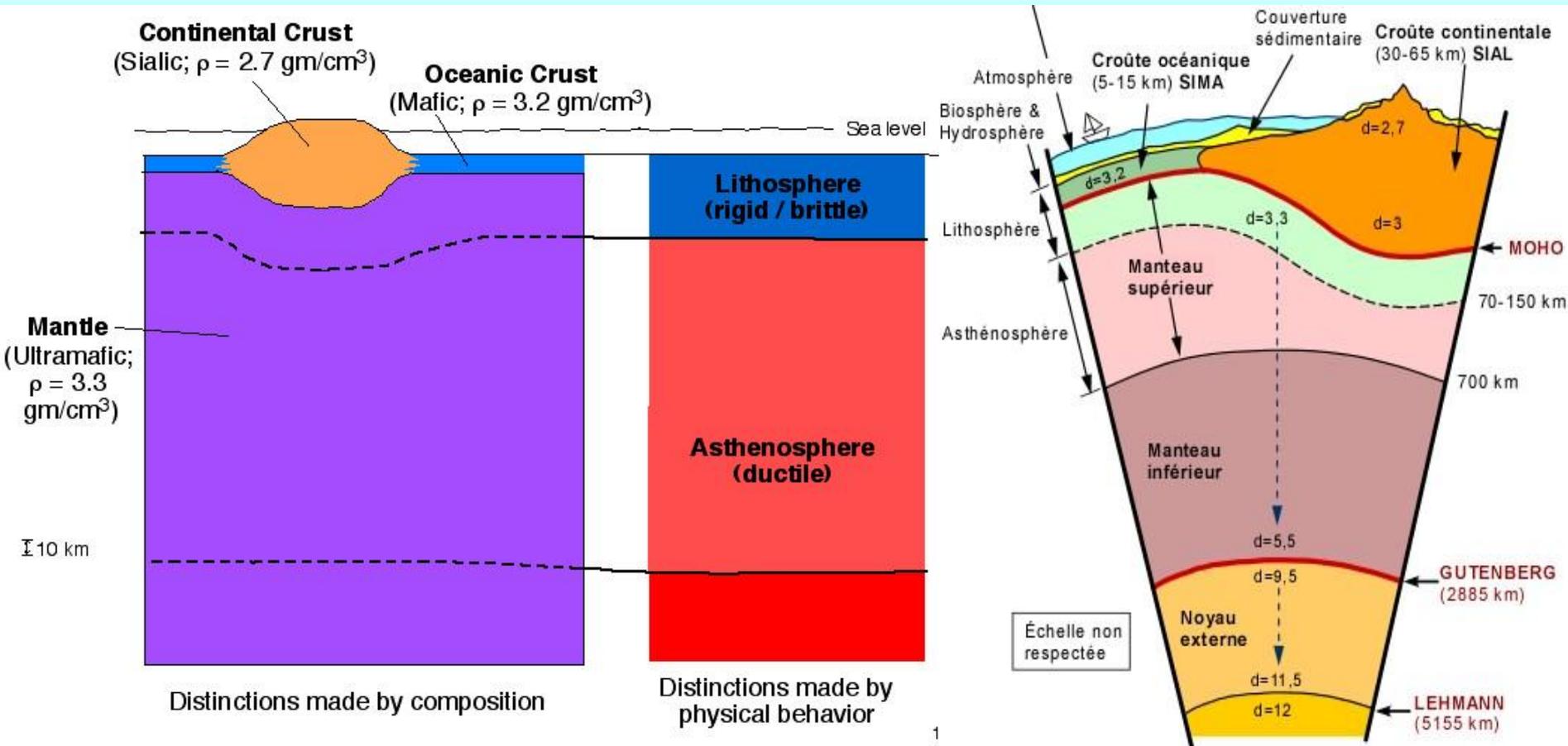
# Астеносфера и литосфера

**Астеносфера** (от греч. *asthenes*, - слабый) - слой обладающий пониженной прочностью и вязкостью (*Low Velocity Zone*), что, по-видимому, обусловлено наличием частично расплавленного вещества, около 1-2 % общей массы. Мощность от нескольких 100-400 км. Граница 410 км считается усредненной нижней границей астеносферы

**Литосфера** (от греч. *lithos* – камень) - каменная, твердая оболочка Земли, включающая земную кору и часть верхней мантии, определяемая также как надастеносферный слой. Мощность литосферы имеет большой разброс и составляет от нескольких км под океанами до 200 км на континентах.

**Изостазия** (от греч. *isostásios* — равный по весу) - изостатическое равновесие, гидростатически равновесное состояние земной коры, при котором менее плотная земная кора (средняя плотность  $2.8 \text{ г/см}^3$ ) «всплывает» в более плотном слое мантии (средняя плотность  $3,3 \text{ г/см}^3$ ), наподобие айсбергов

# Проявление изостазии



[http://gsi.ir/General/Lang\\_en/Page\\_66/GroupId\\_01-09/DataId\\_513/Action\\_Pn4/SetColor\\_red](http://gsi.ir/General/Lang_en/Page_66/GroupId_01-09/DataId_513/Action_Pn4/SetColor_red)

<http://www.gly.uga.edu/railsback/1121LxrMainPoints.html>

# IV. Состав и физические характеристики оболочек Земли

## Химический состав

Главные элементы Земли: Fe (38,81%), O (27,17%), Si (13,84%), Mg (11,25%), S (2,74%), Ni (2,7%), Ca (1,507%) и Al (1,07%), остальные <1,2%.

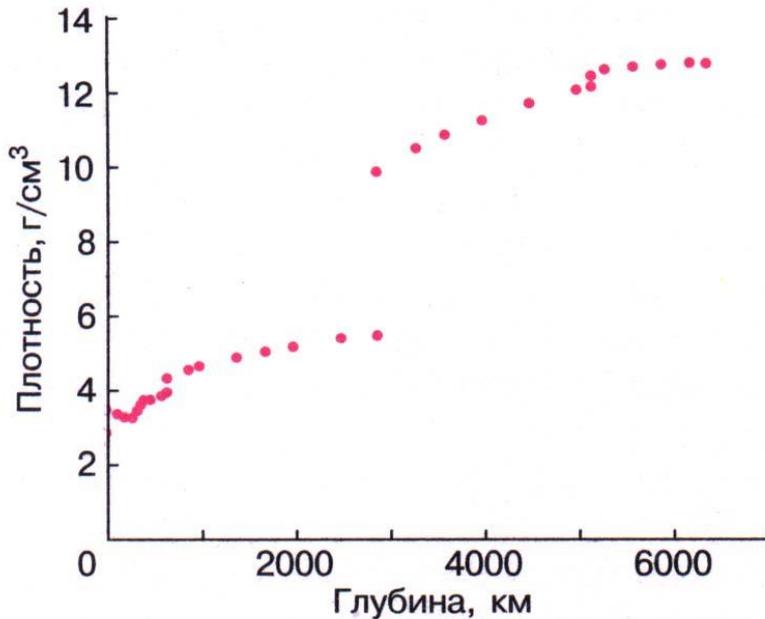
Земная кора:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO, FeO, MgO и другие оксиды.

Мантия:  $\text{SiO}_2$ , MgO, FeO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO и другие оксиды.

Внешнее ядро: Fe + Ni (84 – 92%) + 10-20% S (возможно Si).

Внутреннее ядро: Fe + Ni.

# Физические свойства глубинного вещества Земли



Современная модель распределения плотности в Земле в зависимости от глубины. Четко отмечены скачки плотности на границах между земной корой и верхней мантией и между нижней мантией и внешним ядром и сложный ход плотности с глубиной в области слоя пониженных скоростей и переходной зоны мантии, обусловленный эффектами частичного плавления и полиморфных переходов

## 1. Плотность

Ср. плотность Земли  $5,52 \text{ г/см}^3$ .  
Плотность пород земной коры от  $2,4$  до  $3,0 \text{ г/см}^3$ .

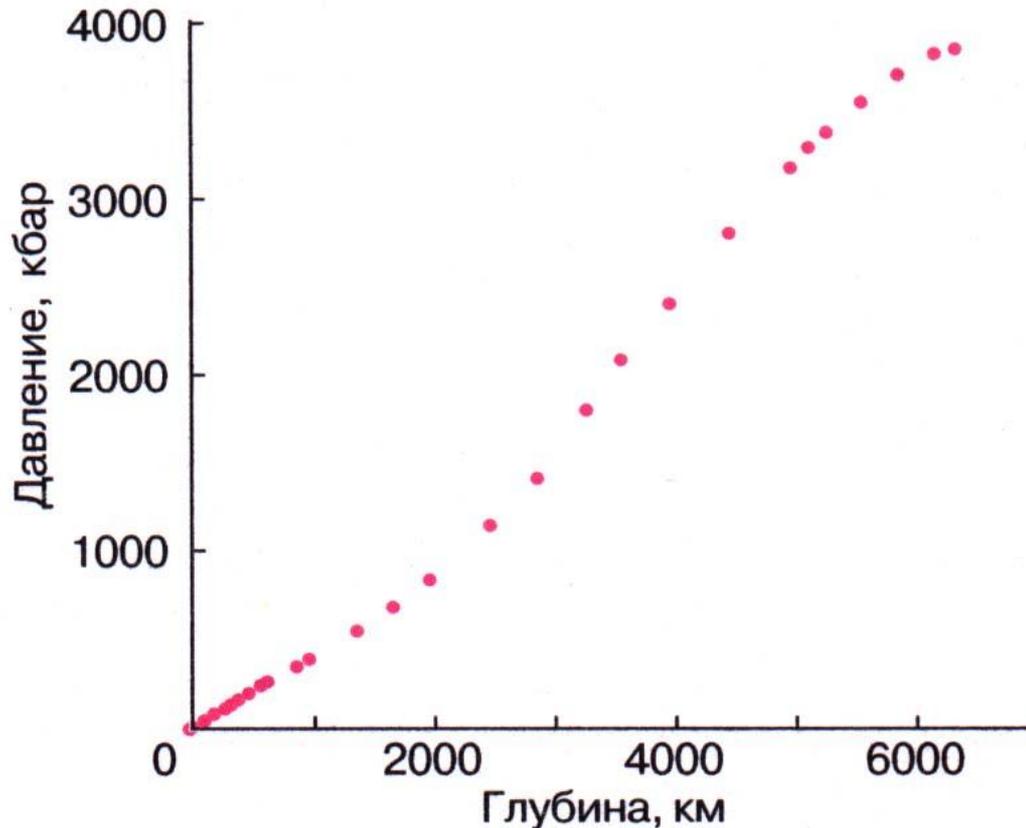
В объёме Земли кора занимает  $1,5\%$ , мантия –  $82,3\%$ , ядро –  $16,2\%$ . Ср. плотность Земли определяется плотной мантией и очень плотным ядром.

Источники информации:

- скорость сейсмических волн,
- эксперименты по фазовым изменениям в веществе.

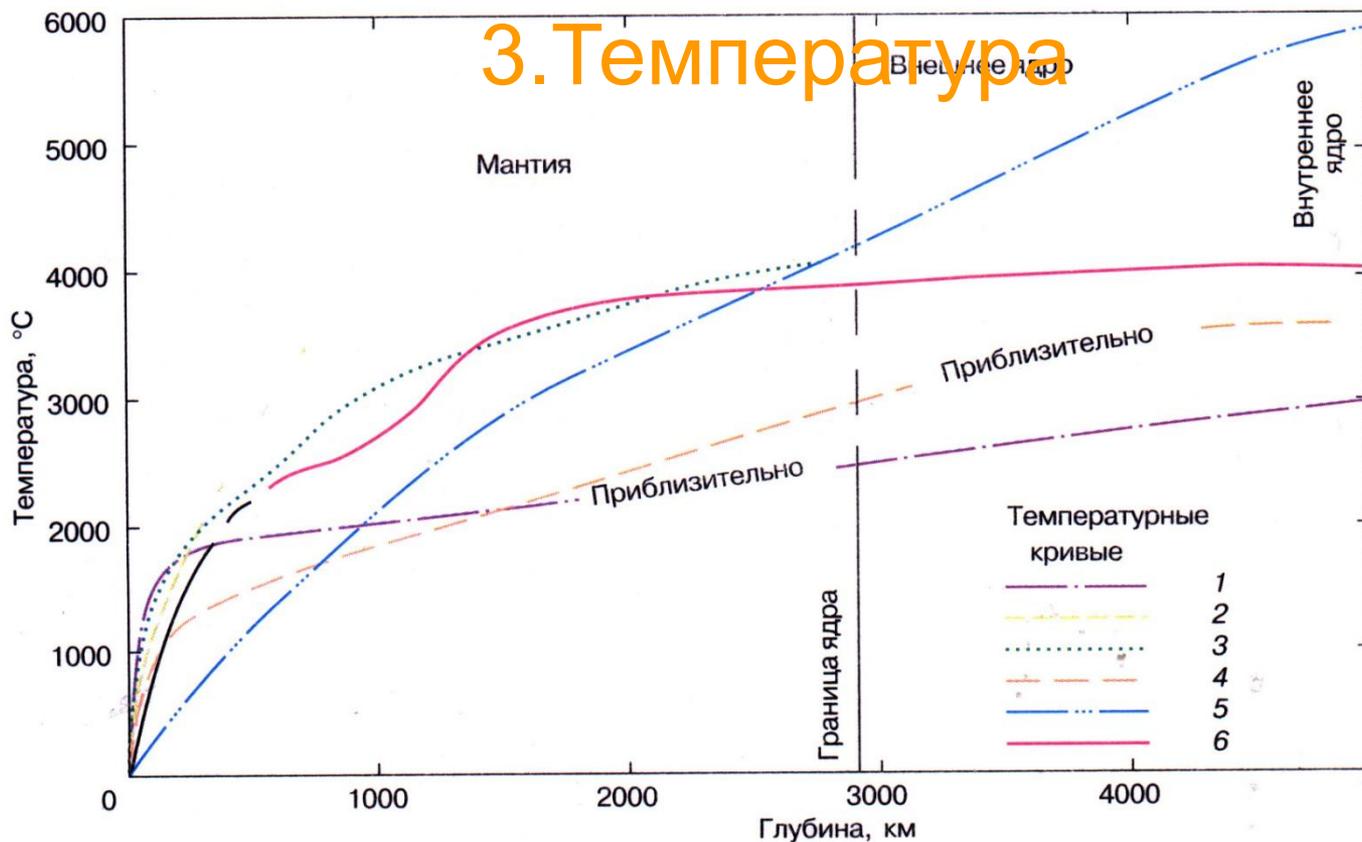
## 2. Давление

На основании характера изменения плотности в недрах можно рассчитать распределение давления с глубиной



Рассчитанное распределение давления в недрах Земли в зависимости от глубины

### 3. Температура



Оценки температур внутри Земли разными авторами [по: Б. Гутенберг, 1963]. Все кривые содержат неопределенные предположения  
1 — Гутенберг (1951); 2 — Джеффрис (1952); 3 — Джекобс (1956); 4 — Ферхуген (1958); 5 — Гилварри (1957); 6 — Любимова (1958)

### Модели изменения температуры с глубиной

В основании земной коры  $\sim 500^{\circ}\text{C}$ .

Верхняя мантия  $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ .

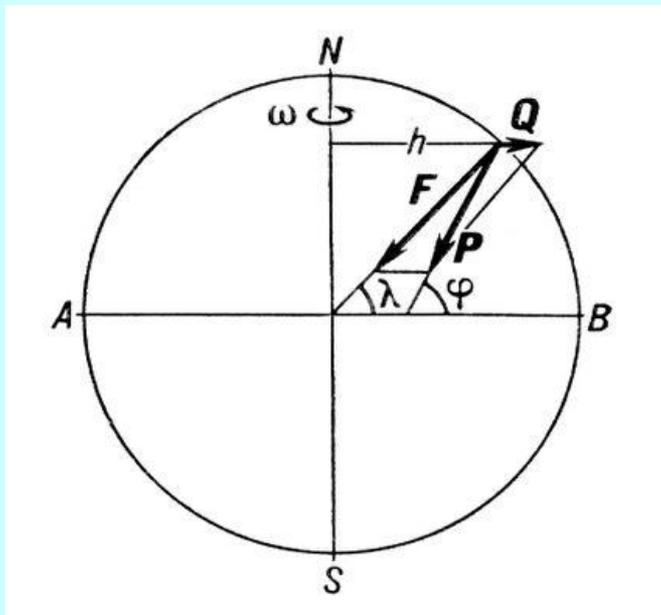
Граница мантии и ядра  $\sim 2000\text{-}3500^{\circ}\text{C}$

Температура в центре Земли вряд ли существенно превышает  $4000^{\circ}\text{C}$ .

# Естественные физические поля Земли

## 1. Гравитационное поле

Гравитационное поле Земли, поле силы тяжести: силовое поле, обусловленное притяжением Земли и центробежной силой, вызванной её суточным вращением.



$P$  – сила тяжести.

$F$  – сила притяжения Земли, направлена к центру Земли.

$Q$  – центробежная сила, направлена от оси вращения и перпендикулярна ей.

На полюсе:  $Q = 0$ ,  $P = F = \max$ .

На экваторе:  $Q = \max$ ,  $P = F - Q = \min$

Сила тяжести на экваторе на  $\sim 0,5\%$  меньше, чем на полюсах.

## 2. Тепловое поле Земли

### 1. Внешний источник тепла Земли – солнечная радиация.

Солнечной энергии хватает на прогрев Земли до глубины 20-40 м. Здесь находится зона постоянных годовых  $T$ , ее ср.  $T$  обычно на 3-4°C выше среднегодовой  $T$  воздуха. В Москве на глубине 20 м постоянная температура +4,2°C.

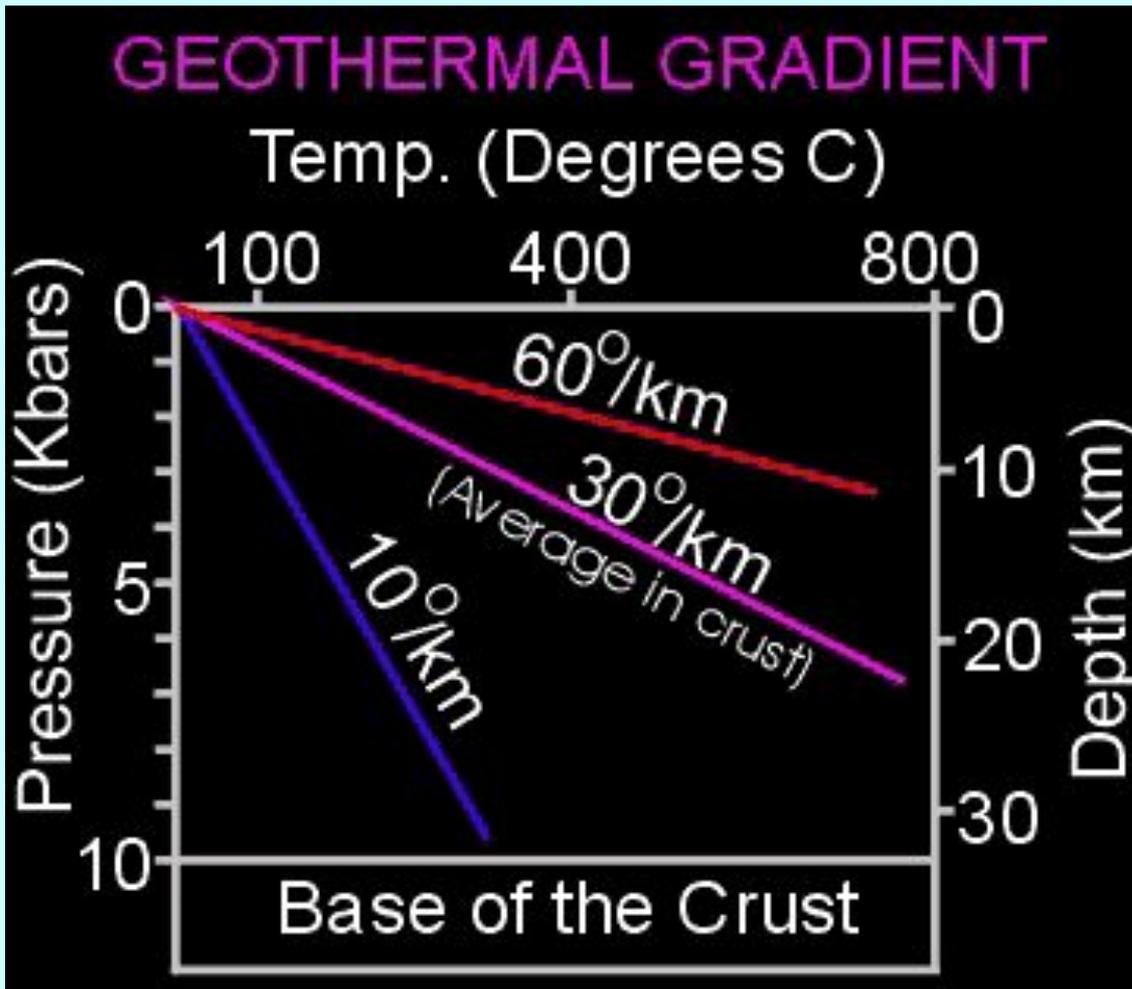
Ниже  $T$  пород начинает постепенно расти, но с разной скоростью в разных местах земного шара.

### 2. Внутренние источники тепла Земли :

- 1) Распад радиоактивных изотопов урана, тория, калия и др. радиоактивных элементов, рассеянных в горных породах.
- 2) Гравитационная (плотностная) дифференциация вещества,
- 3) Деформации за счёт приливного воздействия Луны.
- 4) Остаточное тепло Земли.

Значение других источников очень мало

# Геотермический градиент



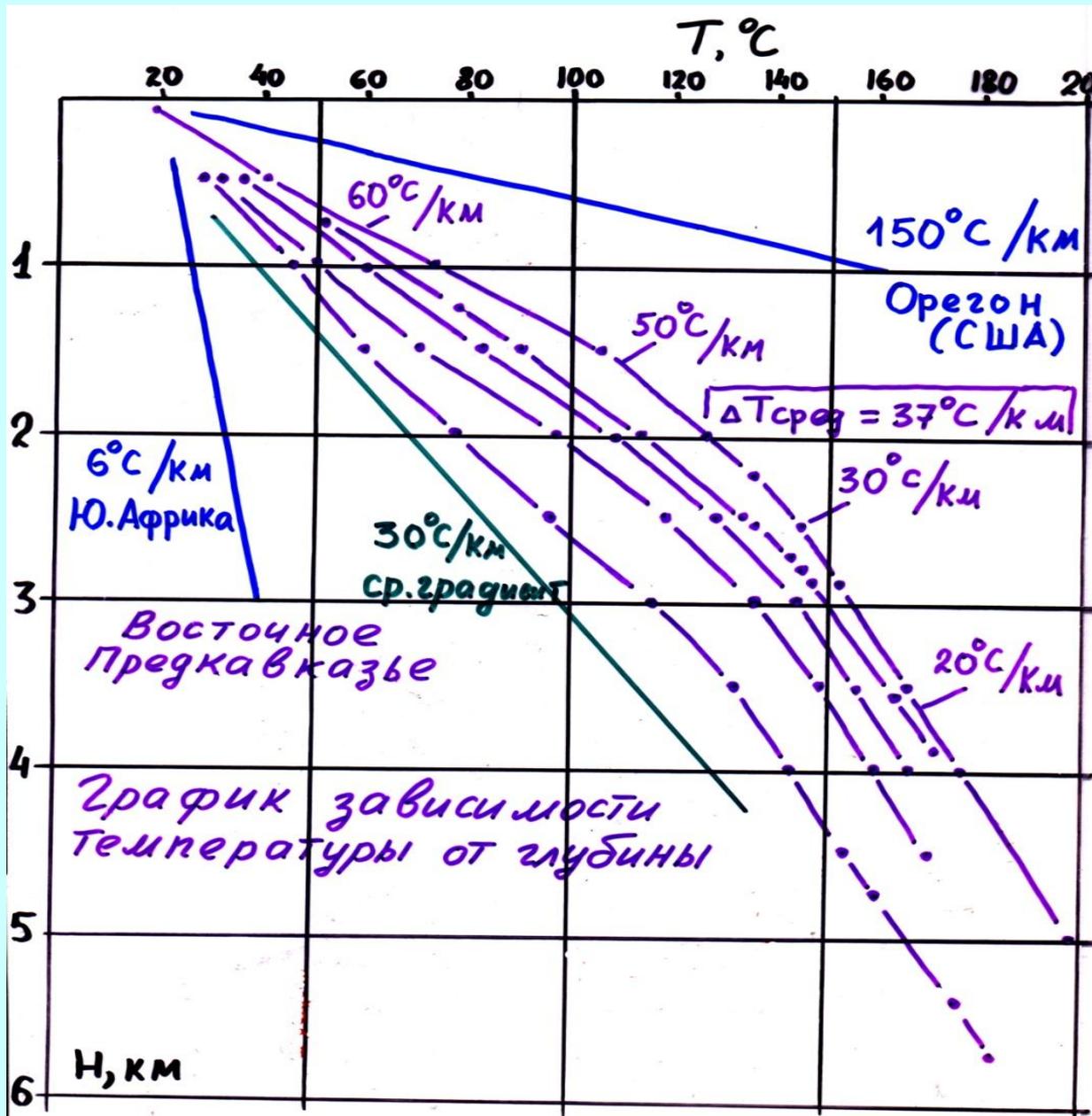
Геотермический градиент в вулканических областях (красная линия), на платформах (синяя линия) и усредненное значение (фиолетовая линия).

Увеличение  $T$  с глубиной в градусах на единицу глубины называется **геотермическим градиентом**.

Ср. геотермический градиент равен  $30^{\circ}\text{C}$  на 1 км глубины или  $3^{\circ}\text{C}$  на 100 м глубины.

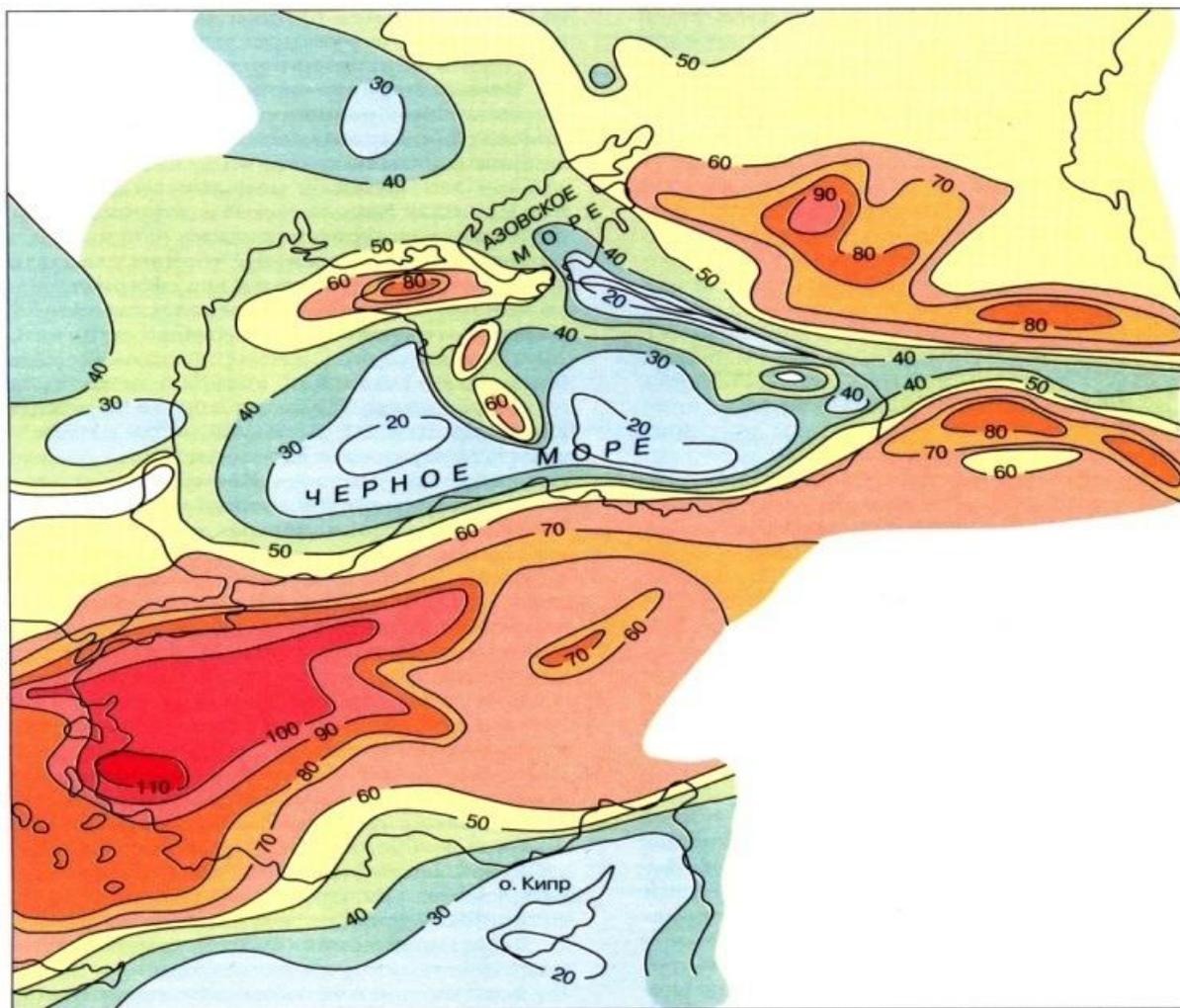
Обратная величина – **геотермическая ступень**: интервал глубины в метрах, на котором температура пород повышается на  $1^{\circ}\text{C}$ . Ср. геотермическая ступень 33 метра.

# Изменение температуры в скважинах



Геотермический градиент на платформе в ЮАР, в Восточном Предкавказье и вулканической провинции штата Орегон

# Тепловой поток



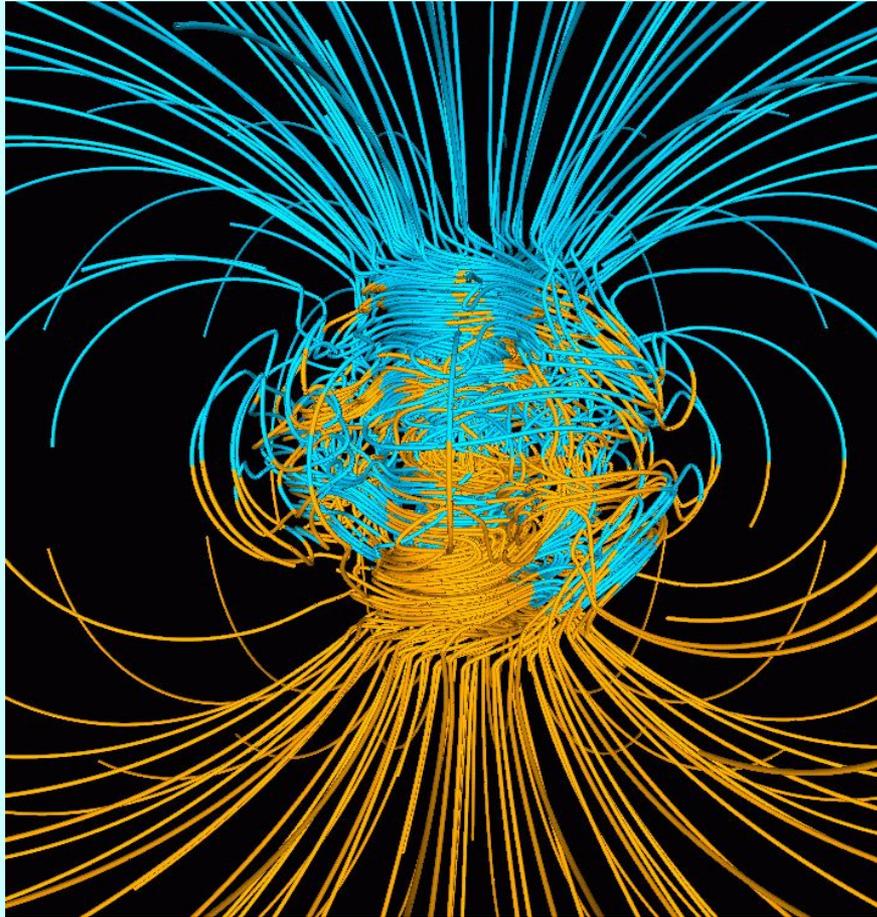
**Тепловой поток** - тепло, излучаемое Землей, или - количество тепла, поступающего из недр Земли на единицу площади ( $1 \text{ м}^2$ ) за единицу времени, измеряется в  $\text{мВт}/\text{м}^2$  или в  $\text{ккал}/\text{м}^2$ .

Тепловой поток Кавказа, Черного моря и Анатолии [по: В. Чермак, Е. Хартиг, 1979]

Цифры на изолиниях — величина теплового потока,  $\text{мВт}/\text{м}^2$

### 3. Магнитное (геомагнитное) поле Земли

Магнитное поле Земли (геомагнитное поле) складывается из **главного, аномального и внешнего геомагнитных полей**



Силовые линии дипольного магнитного поля Земли

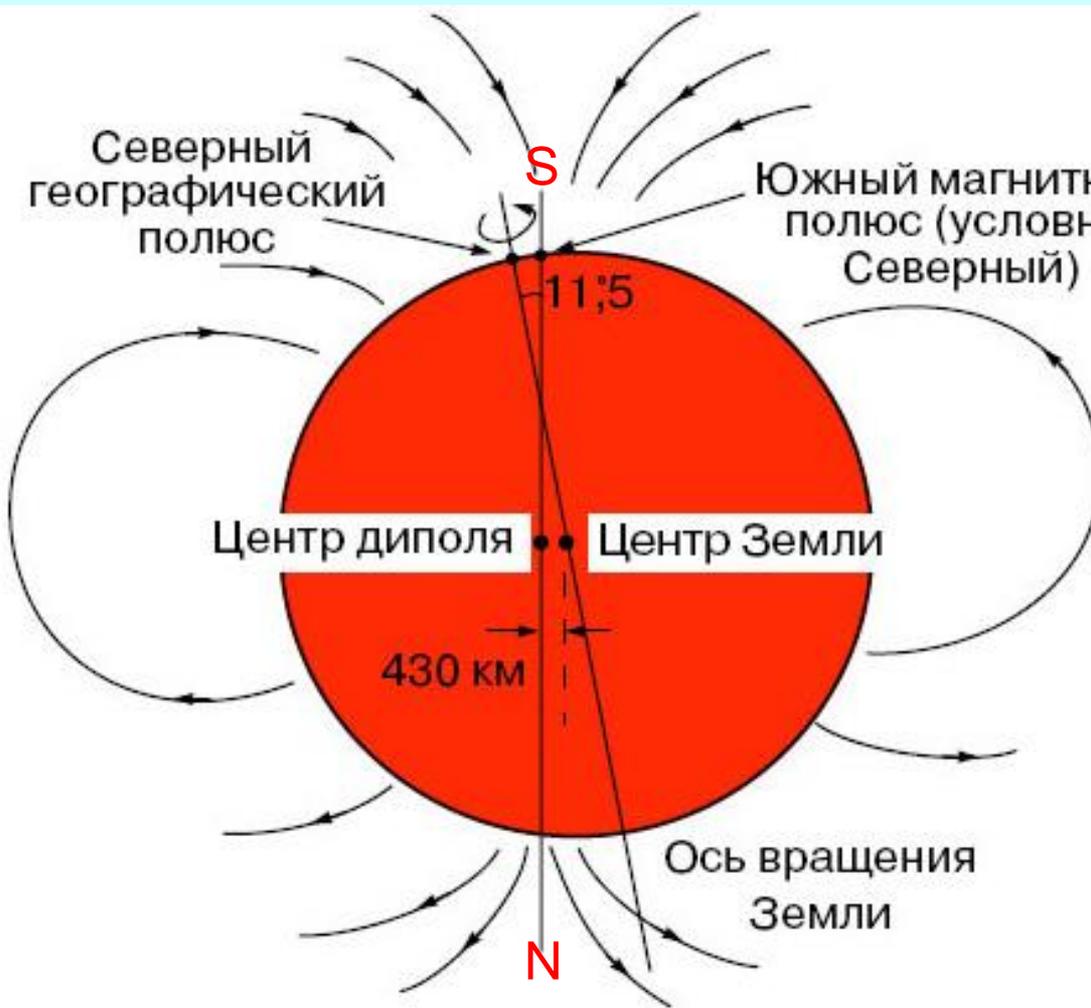
*Главное, или основное* геомагнитное поле генерируется **внутриземными источниками.**

*Аномальное* поле, создаваемое намагниченными горными породами.

*Внешнее, или переменное,* геомагнитное поле, связано с **солнечно-земными взаимодействиями.**

Напряженность дипольного магнитного поля Земли  $\sim 0,5$  эрстед. Магнитному полю Земли лучше всего соответствует дипольная модель однородно намагниченного шара

Геомагнитные полюсы – точки пересечения магнитной оси с земной поверхностью, в которых магнитное наклонение =  $90^\circ$



**S** – в Северной Гренландии.

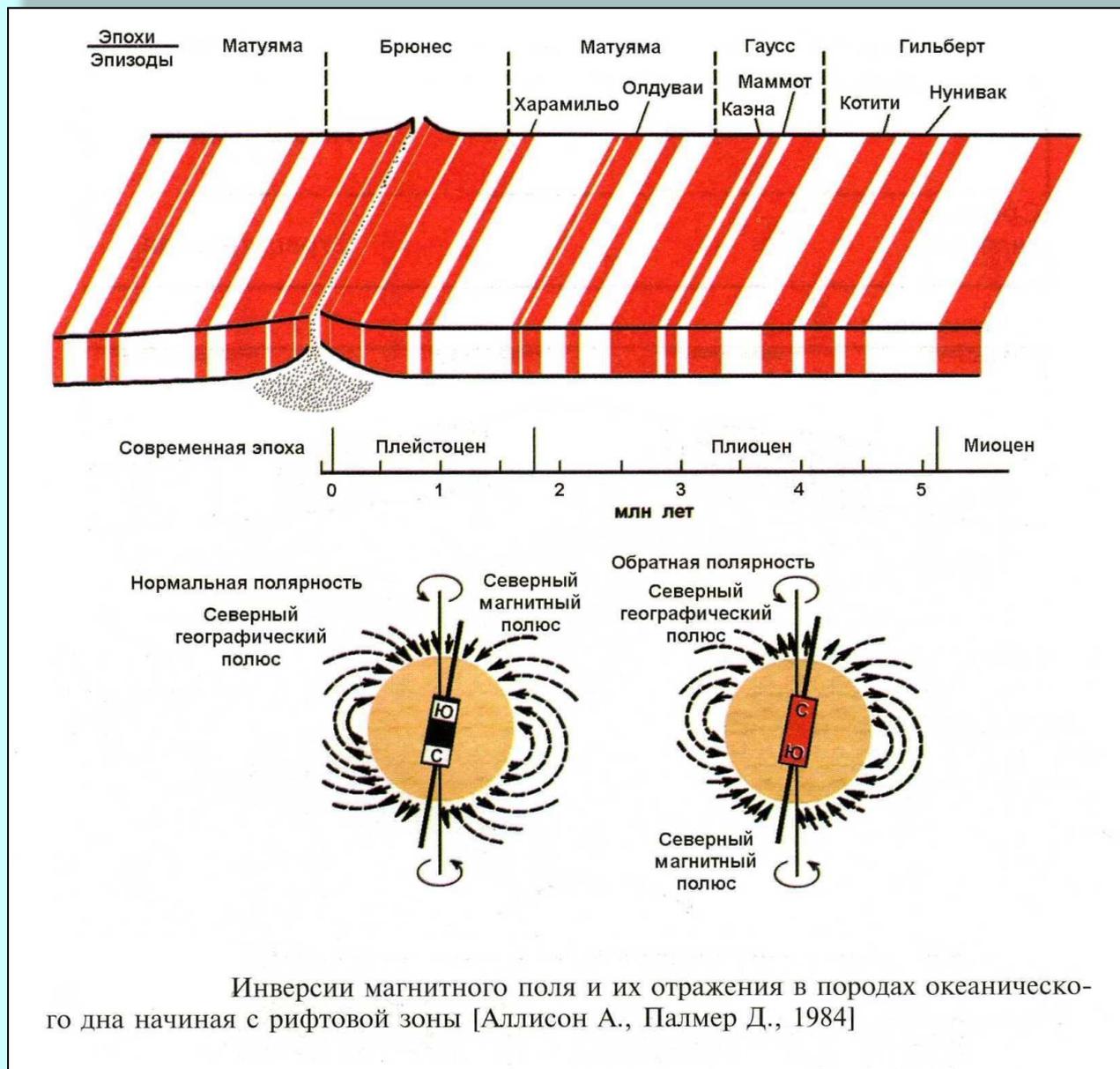
**N** – в Антарктиде.

Полюсы медленно мигрируют.

**S** – в сторону Сибири.

Угол между географическим и магнитным меридианами называется **магнитным склонением**.

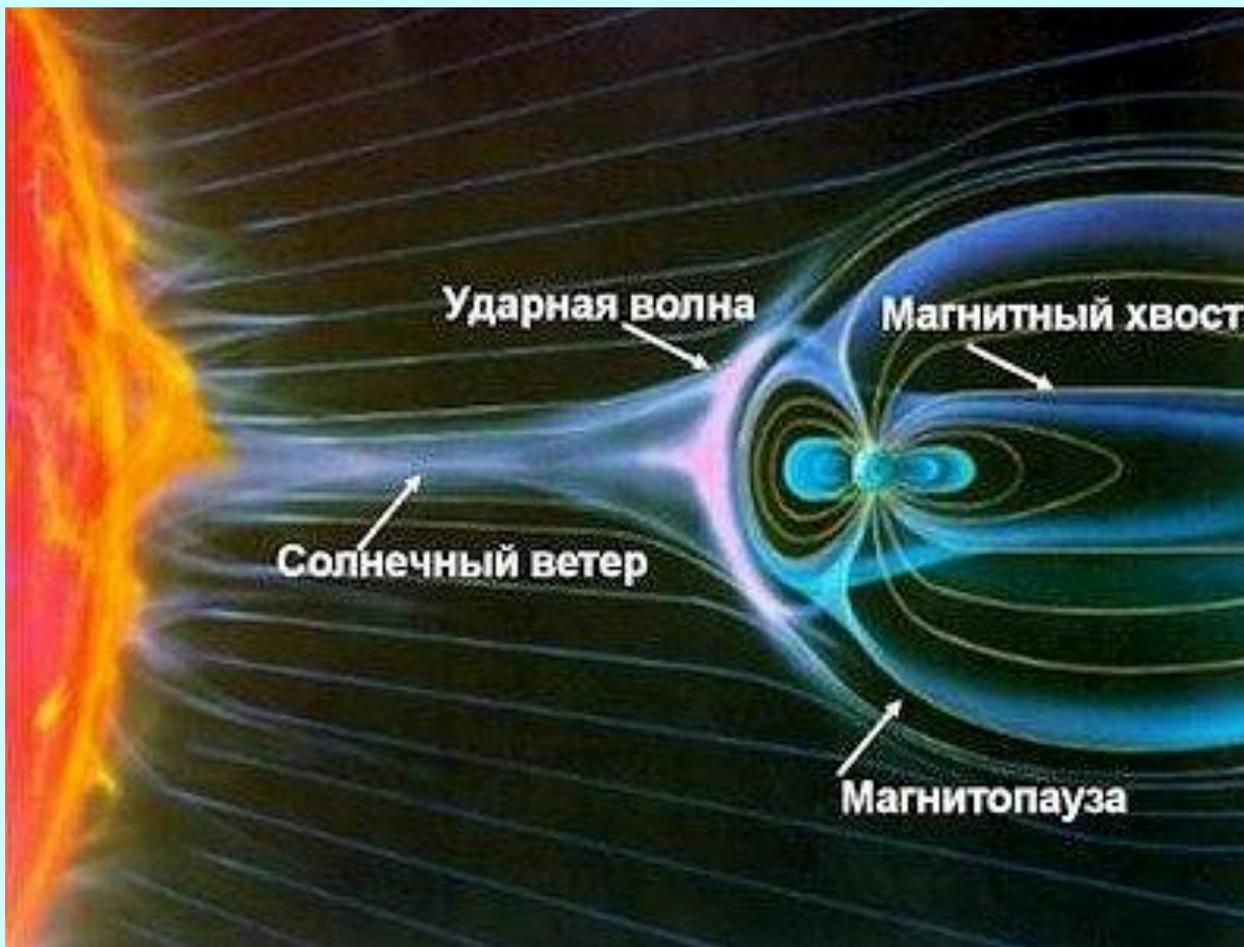
# Инверсия магнитного поля Земли



# Магнитосфера -

Область геомагнитного поля, обтекаемого солнечным ветром, ее граница с дневной стороны проходит на расстоянии 70-80 тыс. км от Земли, границы хвоста не известны.

Граница магнитосферы Земли, на которой давление магнитного поля равно давлению окружающей магнитосферу плазмы называется *магнитопауза*.



Геомагнитное поле несет важную *экологическую функцию*, защищая Землю и все живое от губительного потока ионизированного плазменного вещества.

Области магнитосферы, представляющие собой геомагнитные ловушки, удерживающие частицы в ограниченном объеме, образуют *радиационные пояса Земли*.

*Спасибо за внимание!*

