Основы геофизики 2019

Физика твердой Земли

Смирнов Владимир Борисович
кафедра физики Земли
vs60@mail.ru

Лекция № 11

Тепловое поле Земли (продолжение)

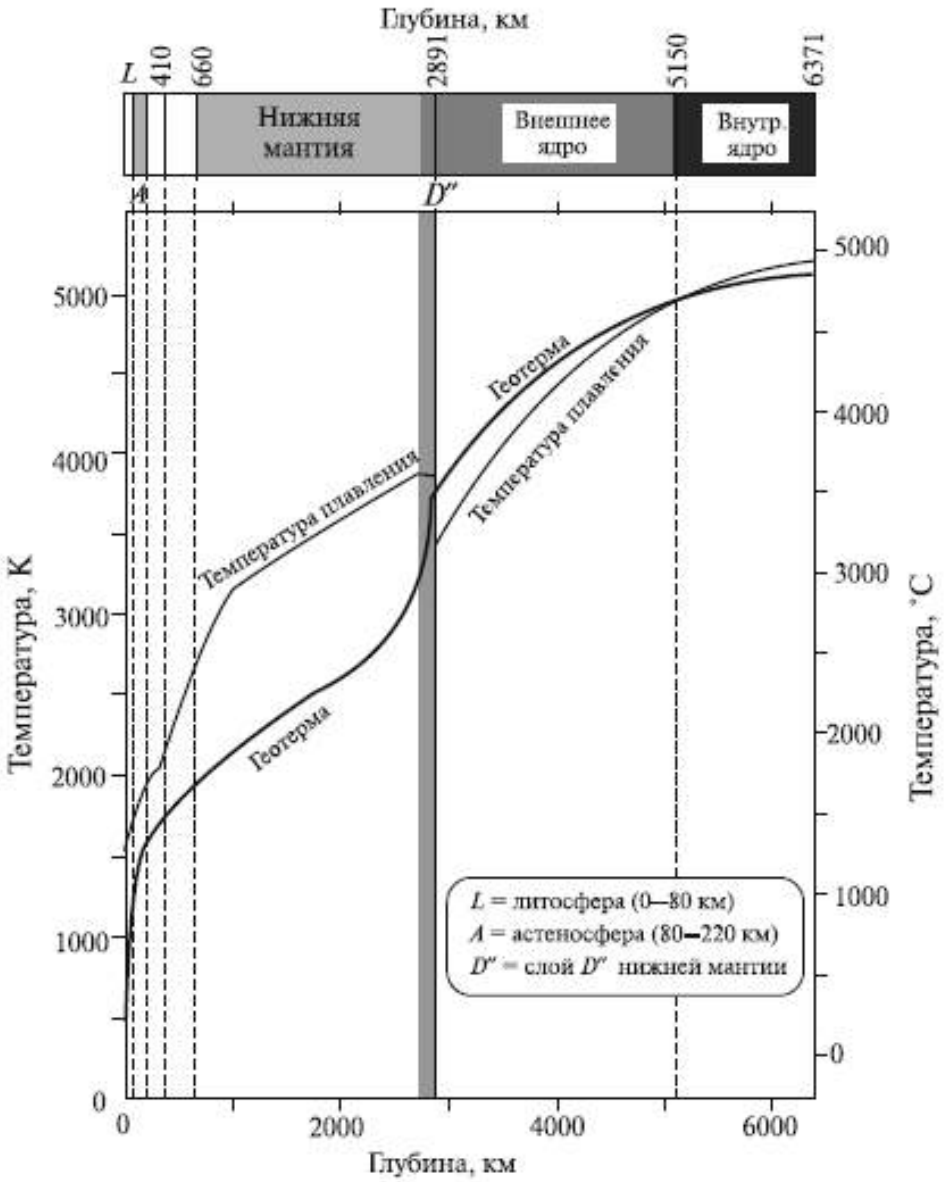
- Тепловой поток
- Геотермический градиент в коре и верхней мантии
- Пределы для температур в Земле
- Конвекция в мантии
- **Источники тепловой энергии Земли**

Профиль температуры (геотерма) с учетом конвекции

- Эффективность конвекции – число Нуссельта:

- $Nu = \frac{q_m}{q_0} = \frac{\text{конв.теплоперенос}}{\text{конд.теплоперенос}}$

- В мантии: $Nu \sim 10 - 20$



Средняя температура Земли: примерно 3300 K

Радиогенное тепло

Ошибка лорда Кельвина

- В **1880** году лорд Кельвин оценил возраст Земли, рассчитав **остывание шара** до современной температуры:

  65 млн. лет
- Возраст Земли по современным данным

  4.6 млрд. лет
- Лорд Кельвин ошибся в 70 раз!

- Кельвин не знал о нагреве Земли теплом, выделяющемся при радиоактивном распаде
- Анри Беккерель открыл явление радиоактивного распада только в **1896** году

Баланс тепла Земли

Будем выражать количество тепла в **единицах температуры**, до которой это количество тепла могло бы разогреть Землю: $\Delta \boldsymbol{T} = \frac{\boldsymbol{Q}}{\boldsymbol{CM}}$

«Приход»

Источник тепла	Количество, град.
Солнце: разогрев протопланетного вещества	**300**
Распад радиоактивных элементов в веществе Земли	**1800**
Гравитационная энергия: аккреция адиабатическое сжатие	**1300** **900**
Итого:	**4300**

«Расход»

- Вынос тепла через поверхность Земли
- Тепловой поток $q = \frac{\Delta Q}{\Delta S \Delta t}$
- Следовательно:
- $\Delta T = \frac{\Delta Q}{CM} = \frac{qS\tau}{CM}$

S – площадь поверхности Земли, τ=4.6 млрд лет (возраст Земли)

ΔT ≈1000 градусов

Баланс: 4300-1000=3300

Тепловое поле Земли: Резюме

- Тепло Земли – **основной источник энергии** для всех геофизических процессов в Земле
- Измерению поддается **тепловой поток** только на поверхности Земли
- Поток **на океанах** в среднем **больше**, чем поток **на континентах**
- Распределение температуры в Земле может быть получено **по косвенным данным** или **рассчитано из теоретических соображений**
- В разных частях Земли преобладают **разные механизмы теплопереноса**: в мантии – конвекция, в земной коре – теплопроводность
- Основным источником тепла Земли является **гравитационная** и **радиоактивная** энергия

Магнитное поле Земли (МПЗ)

- Элементы МПЗ
- Геомагнитные наблюдения
- Структура МПЗ (разложение геомагнитного потенциала по сферическим гармоникам
- Главное магнитное поле Земли
- Палеомагнетизм и литосферные аномалии МПЗ
- Инверсии МПЗ

Геомагнетизм

«Геомагнетизм зародился с компасом, который обнаружил природное магнитное поле по всей Земле» Э.Телье

Уже в III веке до н. э. в Китае был изобретен прибор, указывающий стороны света. Древний компас имел вид ложки с тонким черенком и шарообразной выпуклой частью, сама ложка была изготовлена из магнетита.

Спутники Swarm

В XII веке китайская игла стала использоваться арабами, от них в XIII веке она стала известна итальянским морякам, затем испанцам, португальцам и французам. Немцы и англичане начали пользоваться компасом позже.

Элементы геомагнитного поля

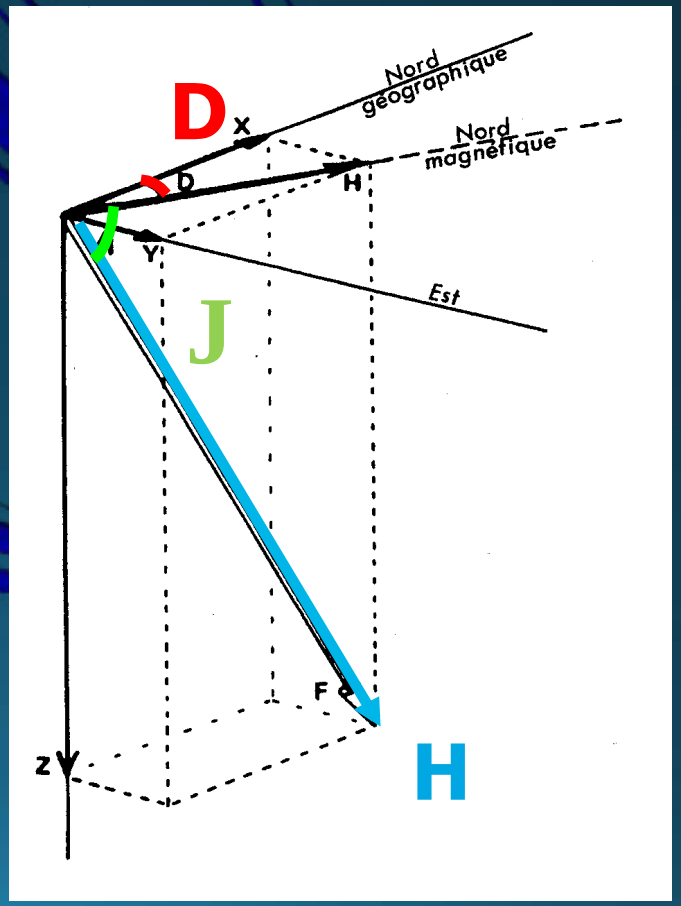
H – модуль напряженности, D – склонение, J - наклонение

$$H=\sqrt{H_x^2+H_y^2+H_z^2}=\frac{H_x}{\cos D\cos J};$$

$$tgD=\frac{H_y}{H_x};$$

$$tgJ=\frac{H_z}{\sqrt{H_x^2+H_y^2}}$$

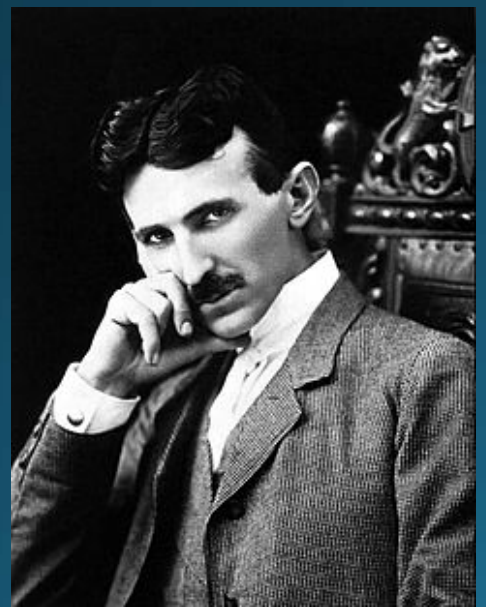
Вертикальная составляющая силовой компоненты поля считается положительной, если ее вектор в северном полушарии направлен вниз.



Величины и единицы

Ханс Кристиан Эрстед

Никола Тесла



1. Напряженность – H (A/m, Э),
2. Магнитная индукция –B (Тл, тесла; Гс, гаусс),
3. Намагниченность – I (A/m),
4. Магнитный момент – M (A*m^2)

1 А/м = $4\pi\ 10^{-3}$ Э;

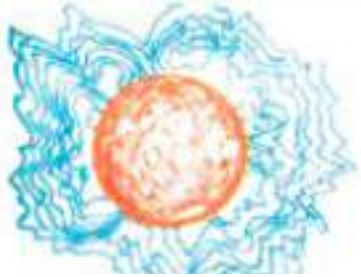
1 Тл = 10^4 Гс

Соотношения единиц

Соотношения единиц в системах СИ и СГСМ

Величина		СИ	СГСМ	Соотношение
Напряжен-ность	T	1 А/м	1 Э	1 А/м = $4\pi \cdot 10^{-3}$ Э
Магнитная индукция	B	1 Тл = = 1 Гн·А/м^2 = = 1 кг/(А·с^2)	1 Гс	1 Тл = 10^4 Гс
Намагничен-ность	J	1 А/м	1 ед. СГСМ/ см^3	1 А/м = 10^{-3} ед. СГСМ/см^3
Магнитный момент	M	1 А·м^2	1 ед. СГСМ	1 А·м^2 = 10^3 ед. СГСМ
Магнитный поток	Ф	1 Вб = = 1 Гн·А = = 1 кг·м^2/(А·с^2)	1 Мкс	1 Вб = 10^8 Мкс
Магнитная проницае-мость вакуума	μ_0	1 Гн/м = = 1 кг·м/(А·с^2)	1 ед. СГСМ	1 Гн/м = $10^7/4\pi$ СГСМ

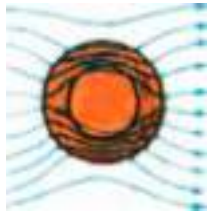
Напряженность магнитных полей в природе



Слабые
до 500 Э

Солнце ..,

Лнн1–1земного
магннтного поля



Меркурнй lt,

Луна lt,

Сердце человека lt,

Мозг человека

10^{2}

10^{1}

10^{0}

10^{-1}

10^{-2}

10^{-3}

10^{-4}

10^{-6}

10^{-7}

10-8

10^{-9}

10^{-10}

10^{-14}

Школьный магннт

Солнечные протуберанцы

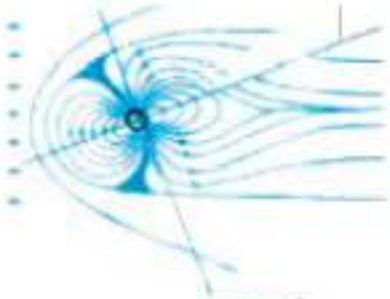
Юпнтер

'4 Земля

На граннце магннтосферы Землн

Геомагннтный экватор

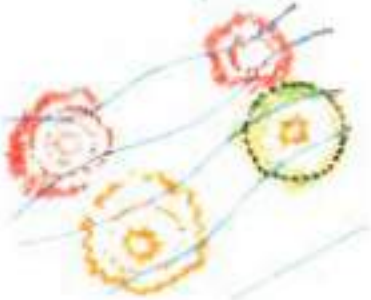
Солнечный ветер



Межпланетное пространство вблнзн орбнты Землн

Межзвездная

'4 среда



Достнгнутый предел нзмереннй

История

- С **XV** века Склонение **D**
- **1492** - Христофор Колумб: **D= D(θ,ϕ)**
- **1544** - Георг Хартман: открытие

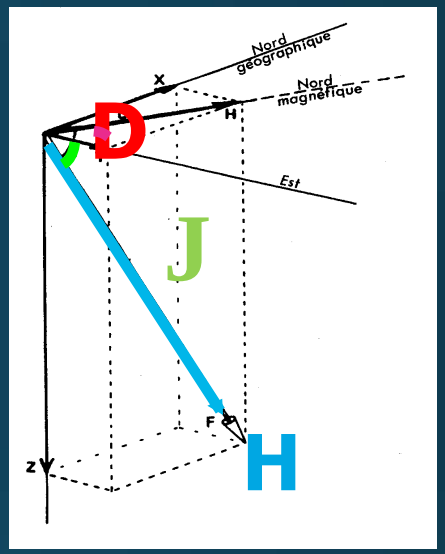
Магнитного Наклонения J

- **1600** – Уильям Гильберт **(«De Magnete»)**
  Земля-Магнит
- **1667** – Обсерватория в Париже

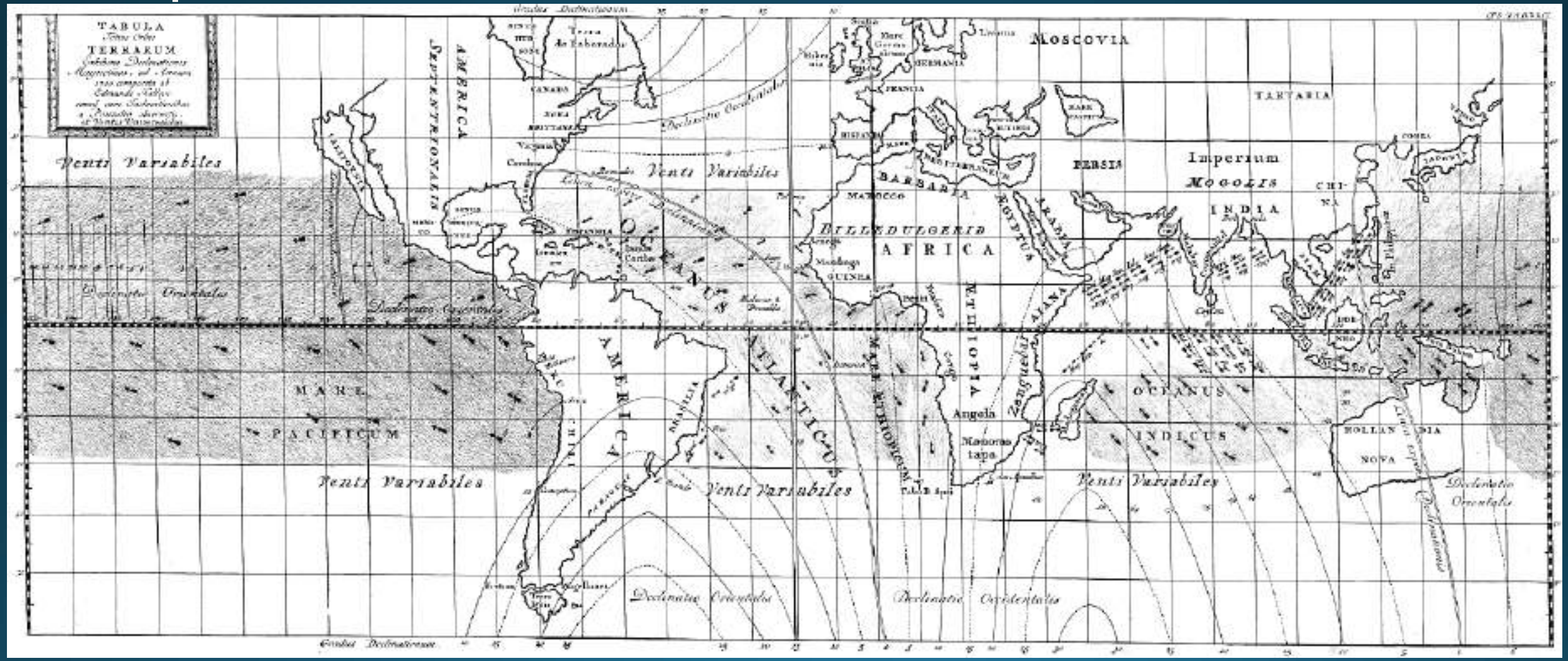
(Messieurs de l'Académie)

- **1759** М. В. Ломоносов «Рассуждение о большой точности морского пути»: точность компаса, Создание Обсерваторий
- **1832** - Гаус (Gauss) Измерил интенсивность

магнитного поля Земли **H**



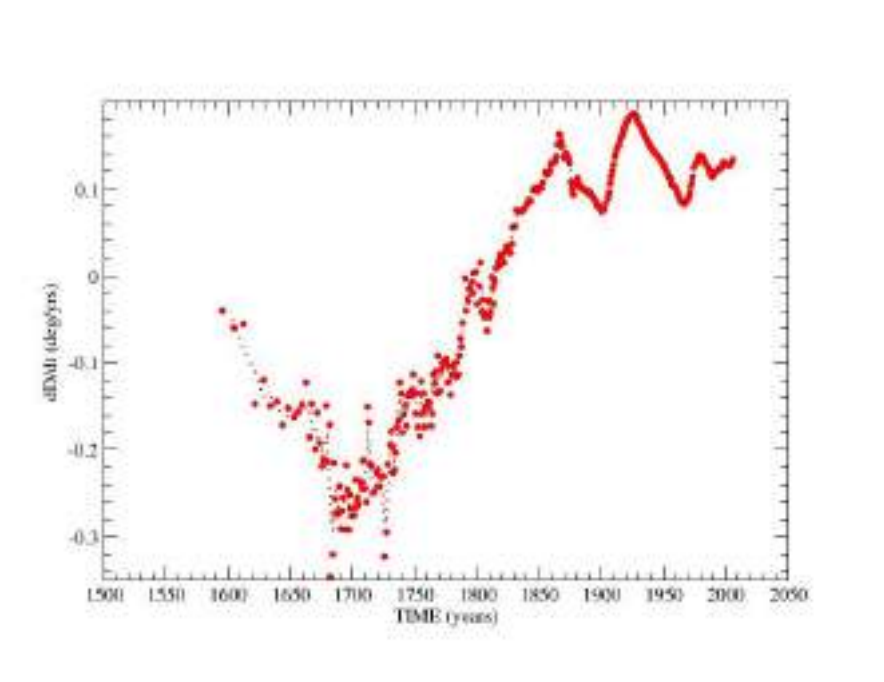
Карта магнитного поля Земли Галлея, 1701

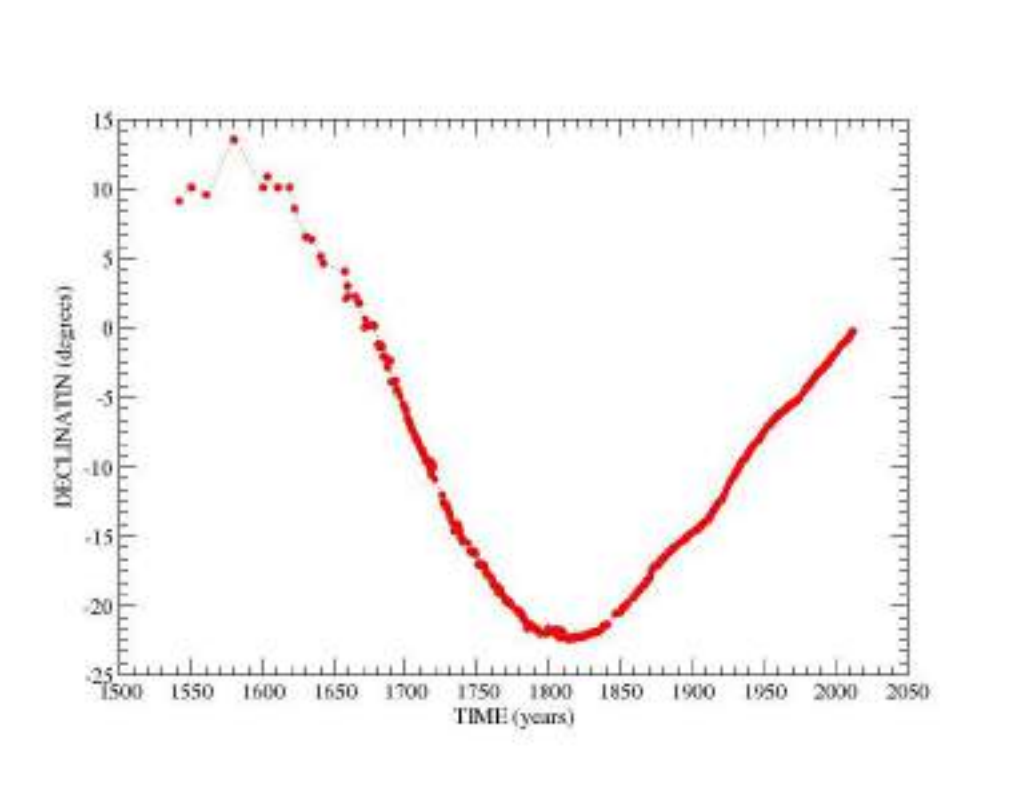


Инструментальные наблюдения МПЗ

- **1667** – Обсерватория в Париже (Messieurs de l'Académie)
- **Измерения:**
  - СКЛОНЕНИЕ 1541 :7°
  - НАКЛОНЕНИЕ 1660 : 70°

Скорость изменения магнитного Склонения





Изменение магнитного Склонения

Измерение магнитного поля

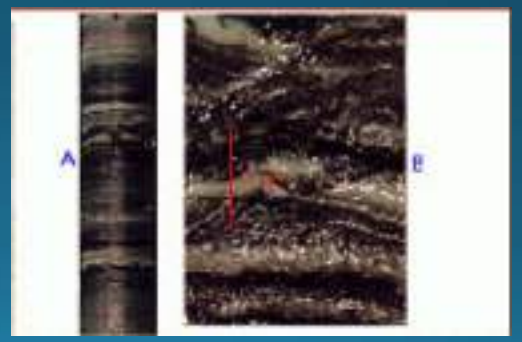
Инструментальные наземные измерения:

Склонения < 500 лет

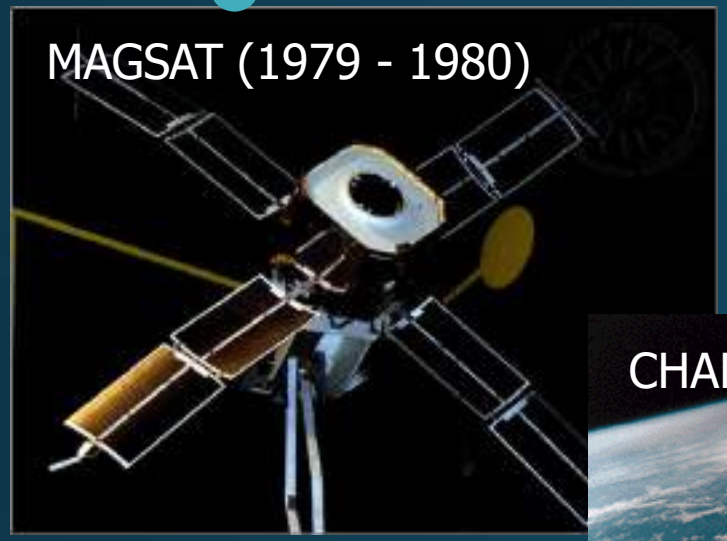
Наклонение < 400 лет

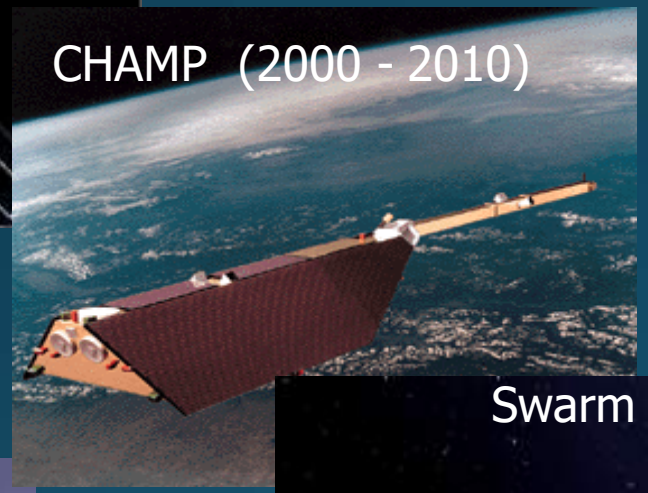
Интенсивность < 200 лет

Геологический масштаб времени: Остаточная намагниченность
*** археология**
*** лава**
*** Образцы из литосферы**



Спутниковые измерения

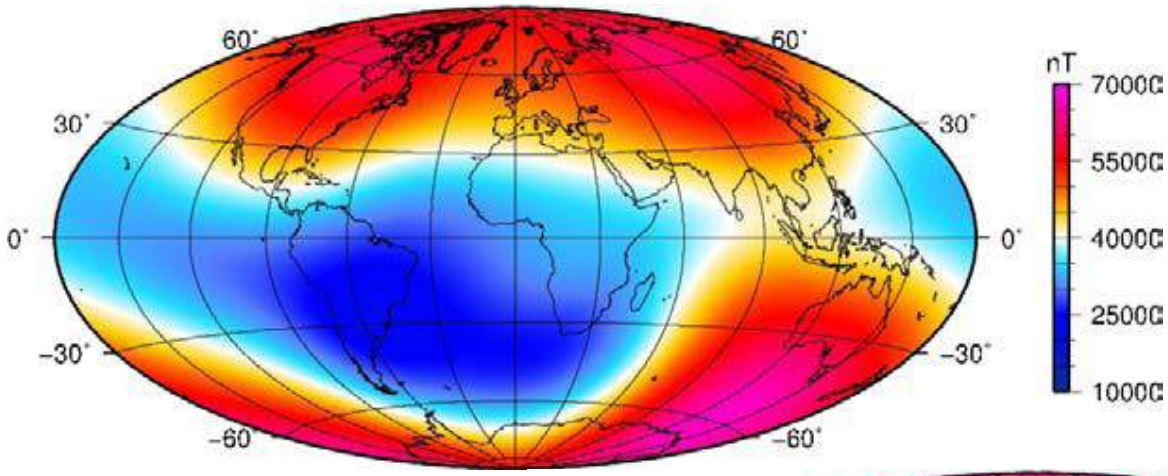




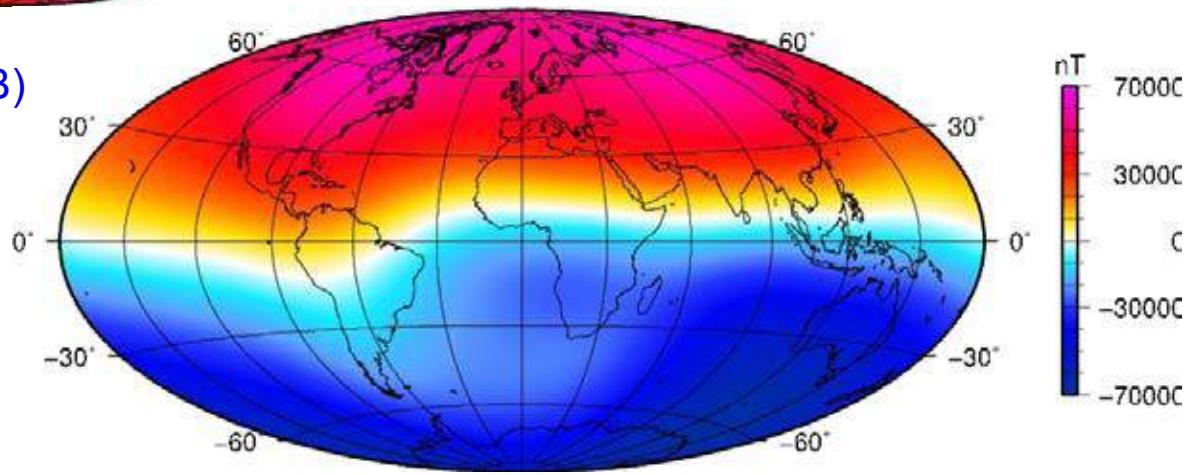
Методы измерения магнитного поля

- ***Феррозондовые*** – измерение магнитного потока. Чувствительность - 10 нТл
- ***Протонные*** - явлении прецессии спинового магнитного момента протонов (частота прецессии пропорциональна величине магнитного поля). Чувствительность - 1 нТл
- ***Оптические*** – эффект Зеемана (расщепления спектральных линий некоторых газов в магнитном поле). Чувствительность – 0.01-0.1 нТл
- ***SQUID*** *(*superconducting quantum interference device*)* — сверхпроводящий квантовый интерферометр. Ток, проходящий через контакт сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (контакты Джозефсона), зависит от величины магнитного поля. Чувствительность – 0.001 нТл

Магнитное поле Земли



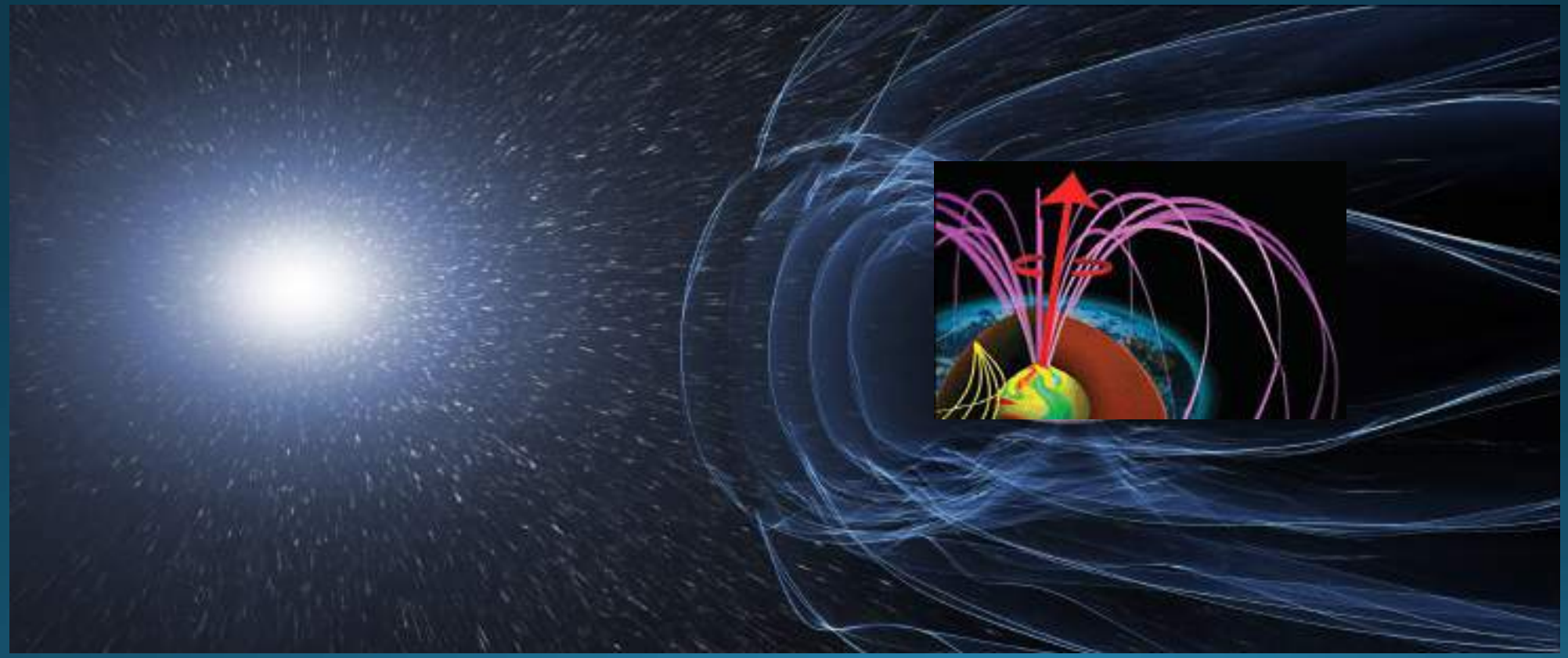
Интенсивность поля (B)



Вертикальная составляющая(-Br)

Наблюдаемое магнитное поле

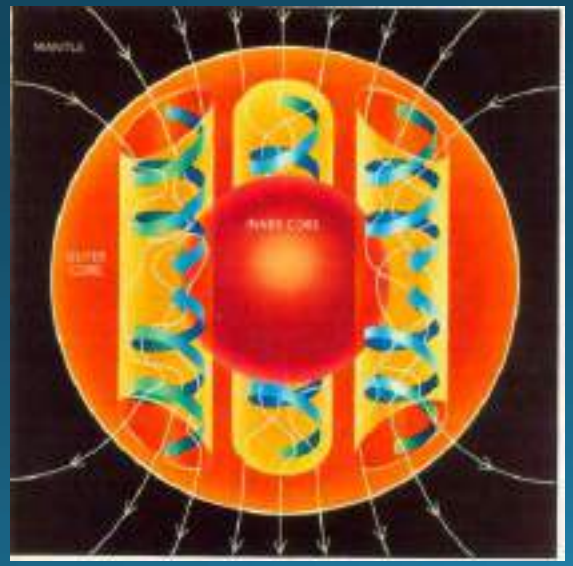
$$\vec{T}_{\text{наб}} = \vec{T}_{\text{глав}} + \vec{T}_{\text{аном}} + \vec{T}_{\text{внеш}}$$



Источники

$$\vec{T}_{наб} = \vec{T}_{глав} + \vec{T}_{аном} + \vec{T}_{внеш}$$

Внешнее ядро



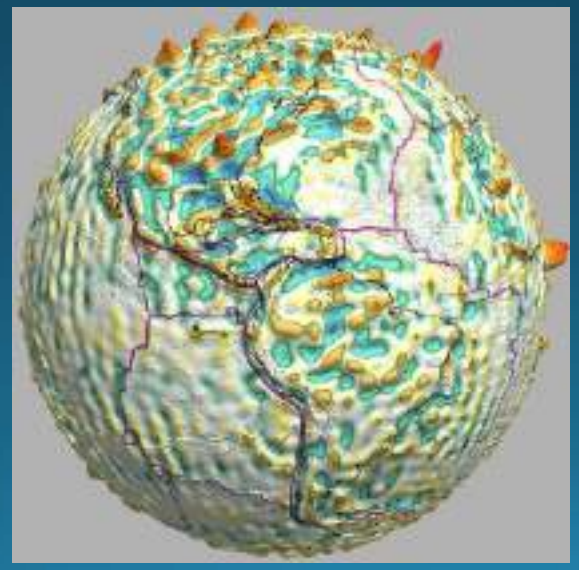
Главное магнитное поле с источником в области ядра Земли -95%

Источники

$$\vec{T}_{наб} = \vec{T}_{глав} + \underline{\vec{T}_{аном}} + \vec{T}_{внеш}$$

Земная кора

Аномальное магнитное поле с источниками в области земной коры -4%



Источники

$$\vec{T}_{наб} = \vec{T}_{глав} + \vec{T}_{аном} + \vec{T}_{внеш}$$

Ионосфера, магнитосфера

Электромагнитное поле с источниками в околоземном пространстве -1%

Структура магнитного поля Земли

Наблюдения за магнитным полем

↓

Геомагнитный потенциал:

- Разложение потенциала по сферическим гармоникам

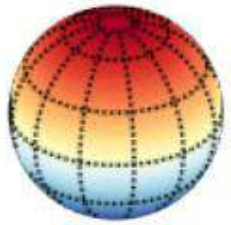
↓

$$V(r,\theta,\varphi)=R_3\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{R_3}{r}\right)^{n+1}(g_n^m\cos m\varphi+h_n^m\sin m\varphi)\,P_n^m(\cos\theta)$$

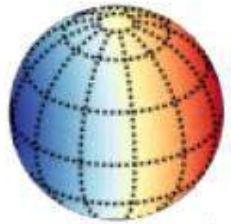
↓

Потенциал → векторное поле напряженности

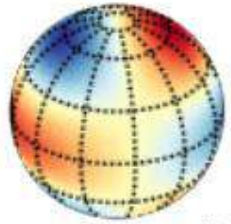
$$\nabla V(x,y,z)\to\left\{\frac{dV(x,y,z)}{dx},\frac{dV(x,y,z)}{dy},\frac{dV(x,y,z)}{dz}\right\}$$



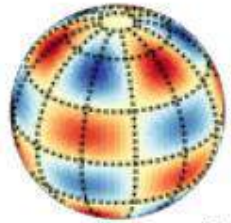
$m=0,\ n=1$



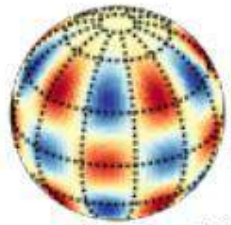
$m=1,\ n=2$



$m=2,\ n=2$



$m=4,\ n=5$



$m=6,\ n=10$

Сферические гармоники

Spherical harmonics

m = 0 :	**zonal** harmonics
n = m :	**sectorial** harmonics
0 < m < n :	**tesseral** harmonics
n-m even	symmetric about equator
n-m odd	antisymmetric about equator

Example

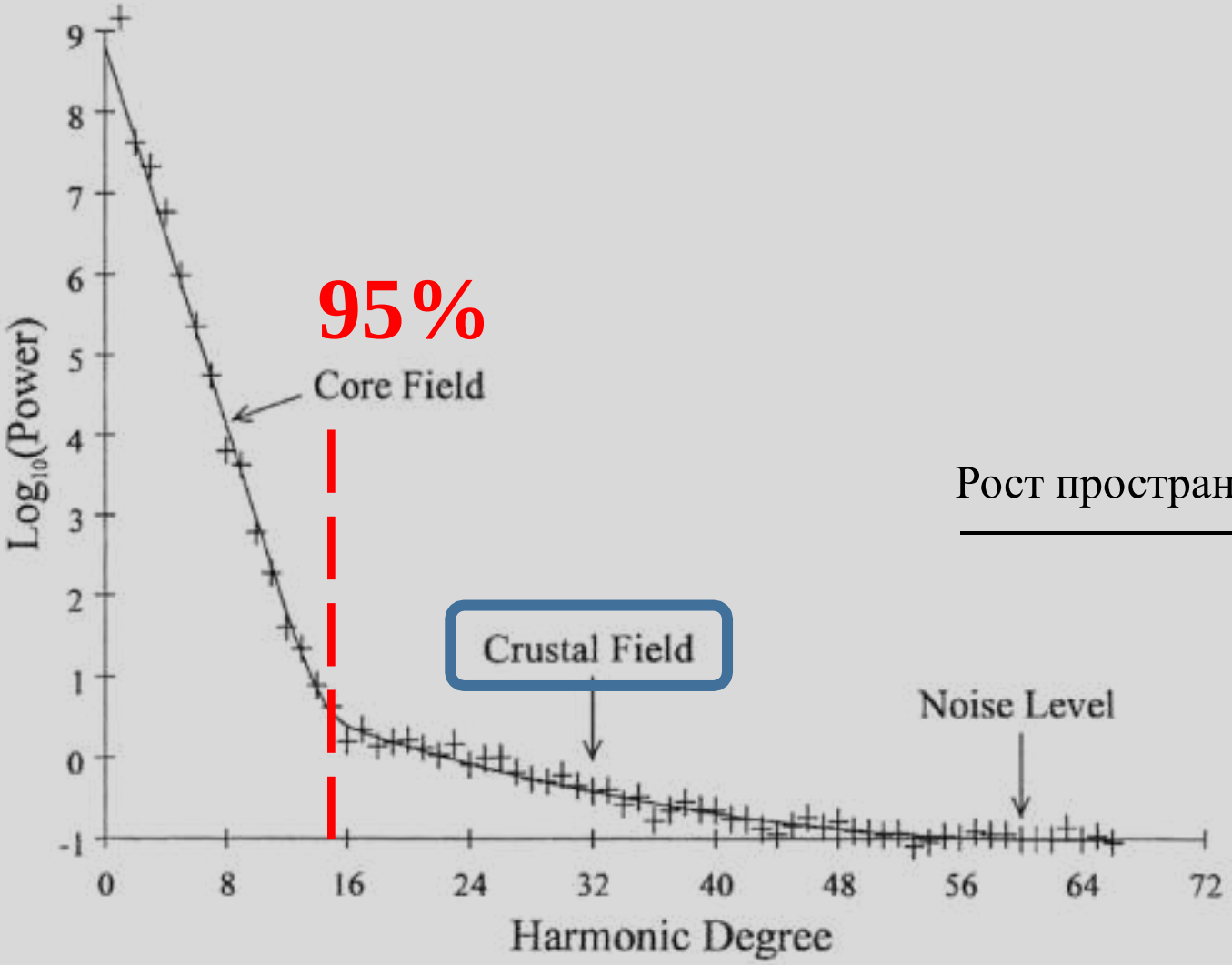
zonal	sectorial	tesseral
m = 0	n = m	0 < m < n

n = 7 in all cases here

N.B: For **tesseral** harmonics

$\Rightarrow$ 2m(n-m+1) **regions**

Энергетический спектр магнитного поля на поверхности Земли

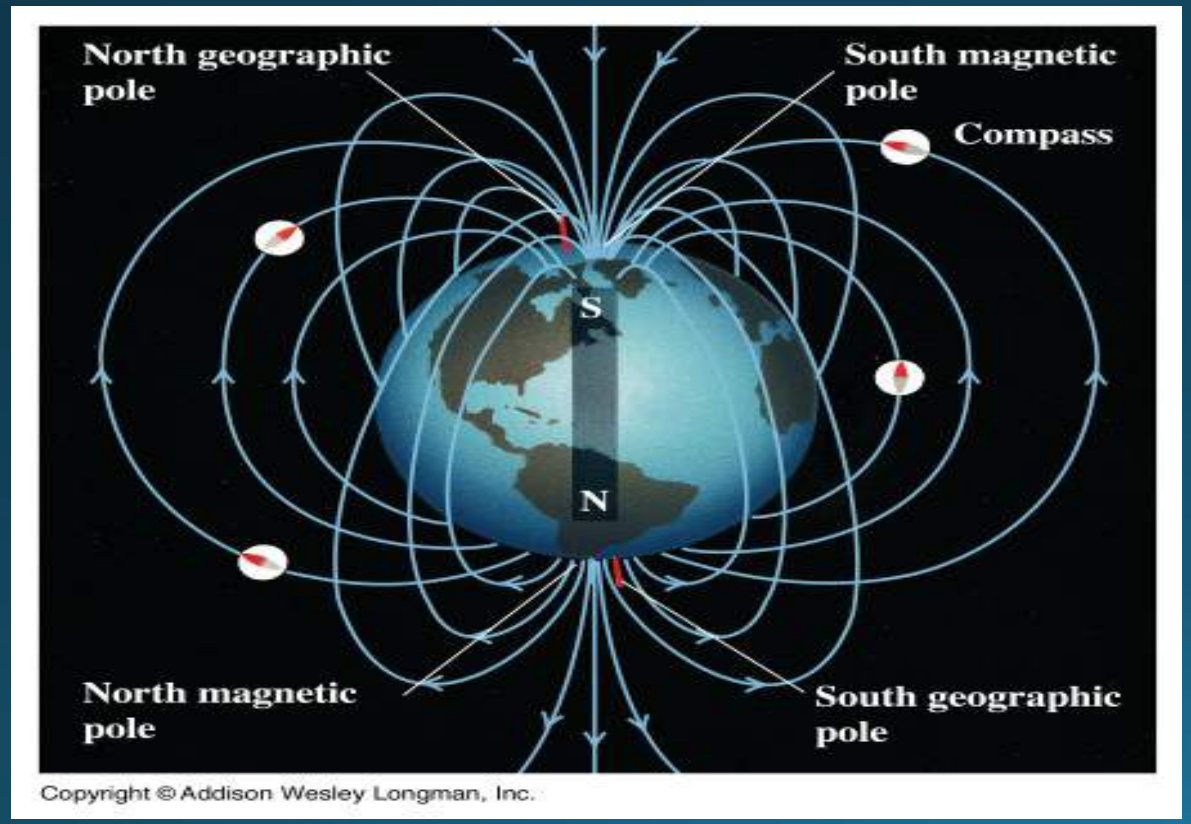


Рост пространственной вариабельности

[R. Merrill et al., 1996]

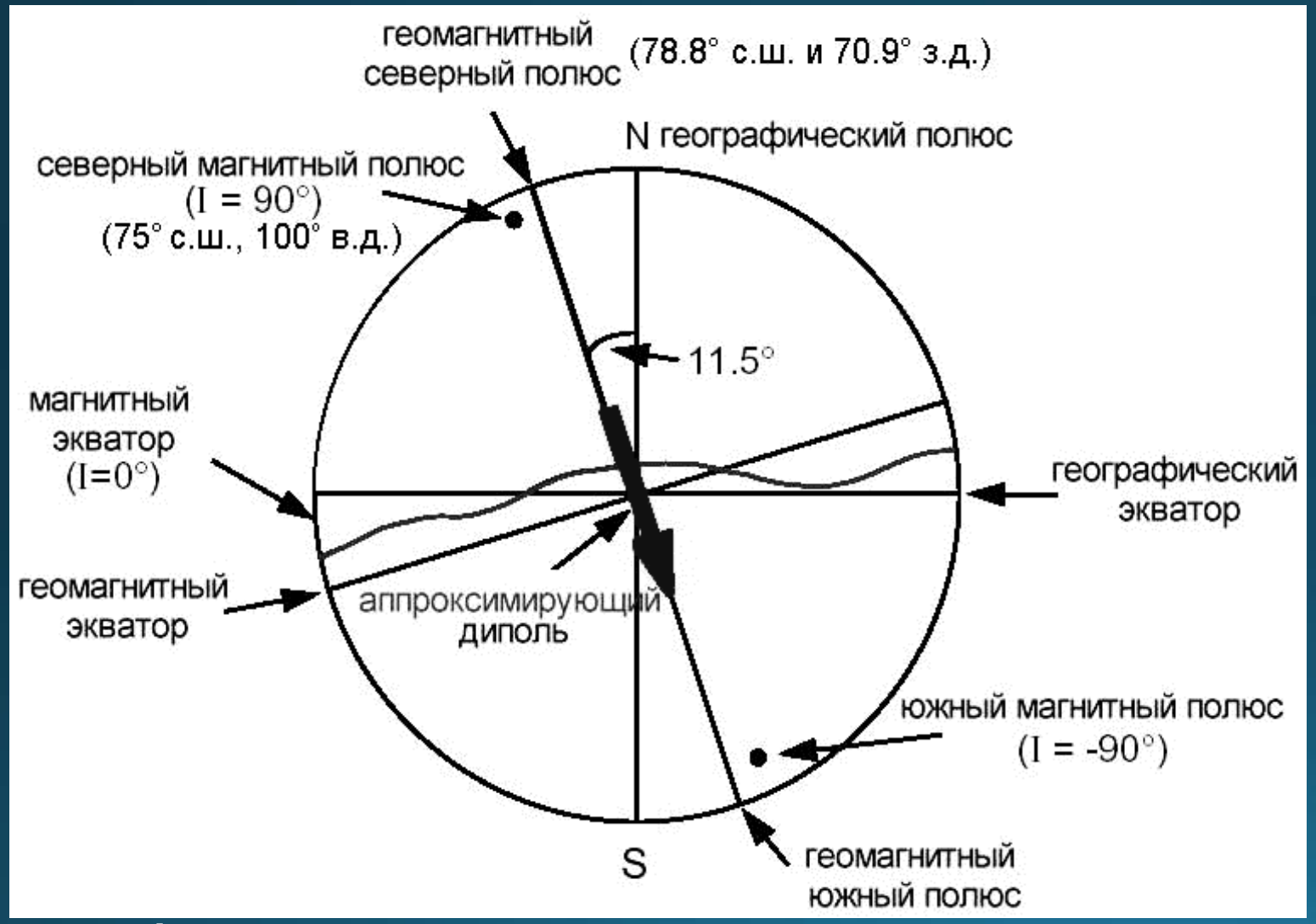
Дипольное поле

Главное магнитное поле представляет собой в первом приближении диполь



Возникновение магнитного поля Земли связано с турбулентным движением токов в жидком ядре. Механизм Магнитное динамо действует на расстоянии 2-3 радиусов Земли

Магнитный и геомагнитный полюса

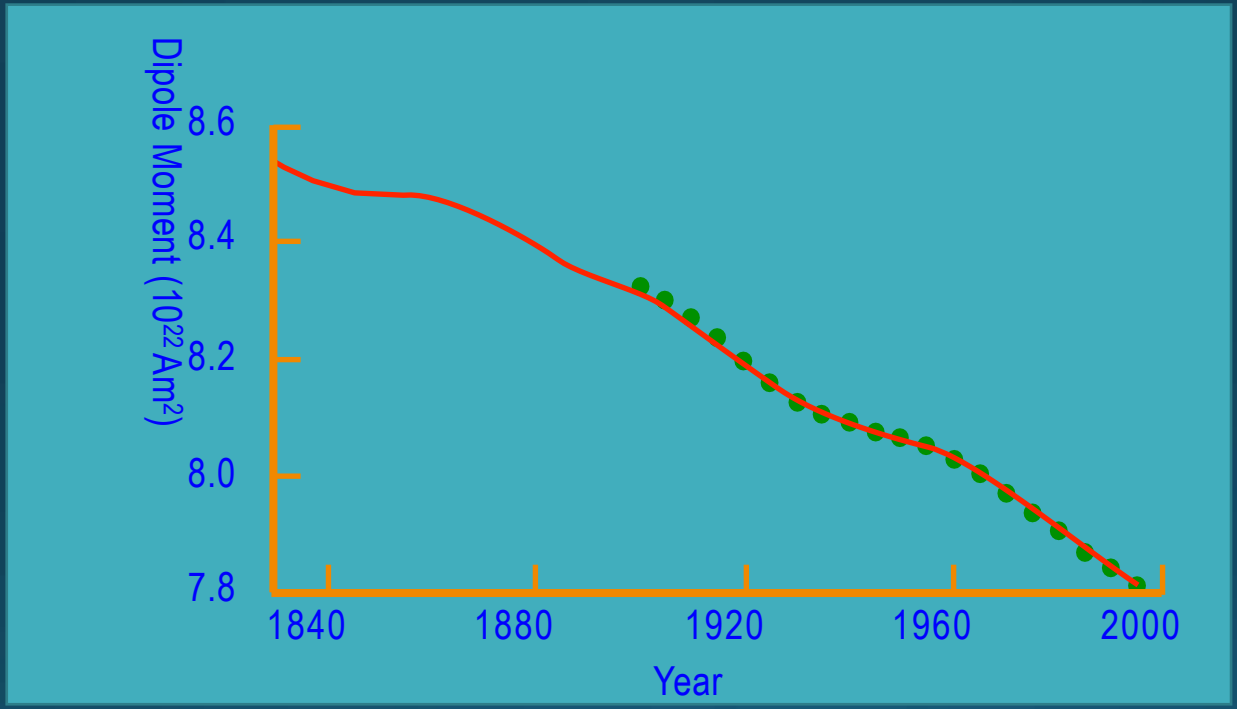


Магнитный полюс : полное поле

Геомагнитный полюс: аппроксимация дипольным полем

Аппроксимация геомагнитного поля полем наклоненного эксцентрического диполя

Уменьшение дипольного поля

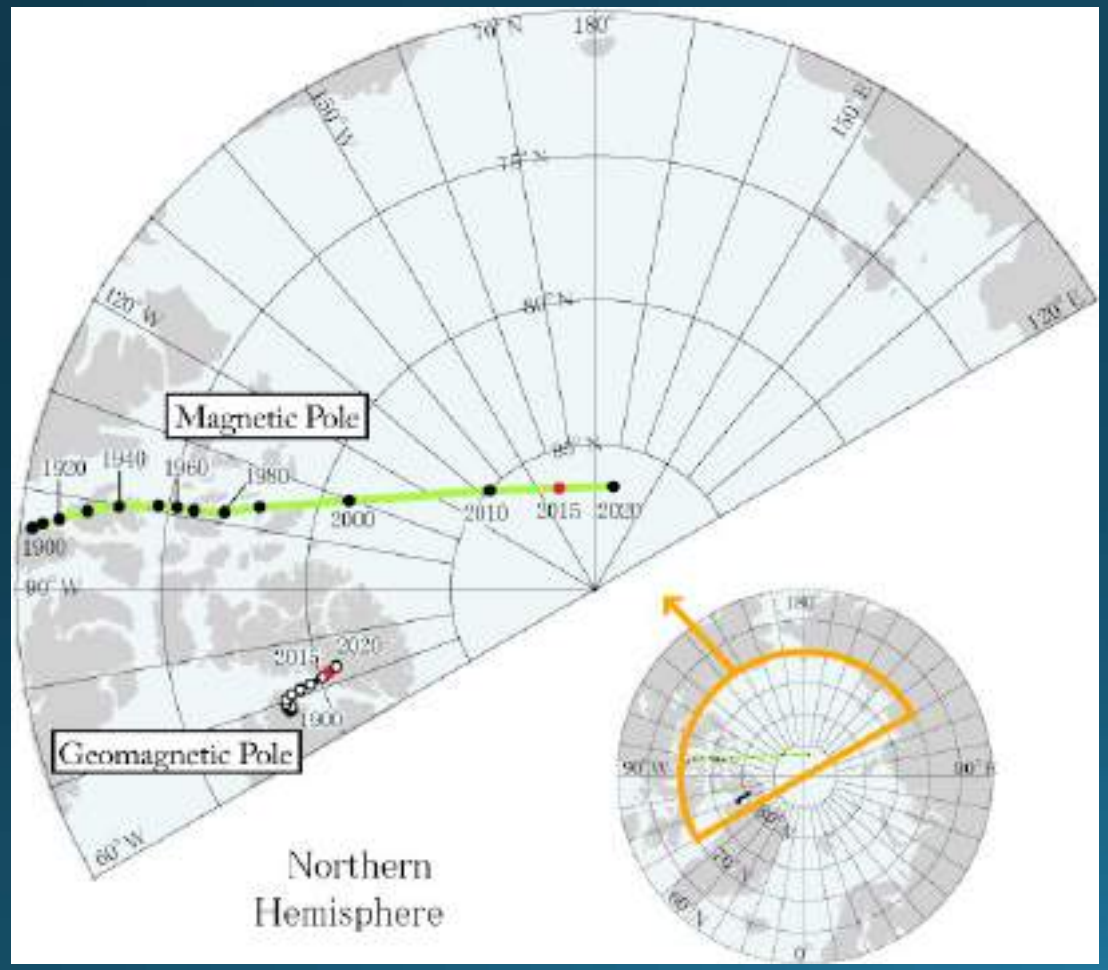


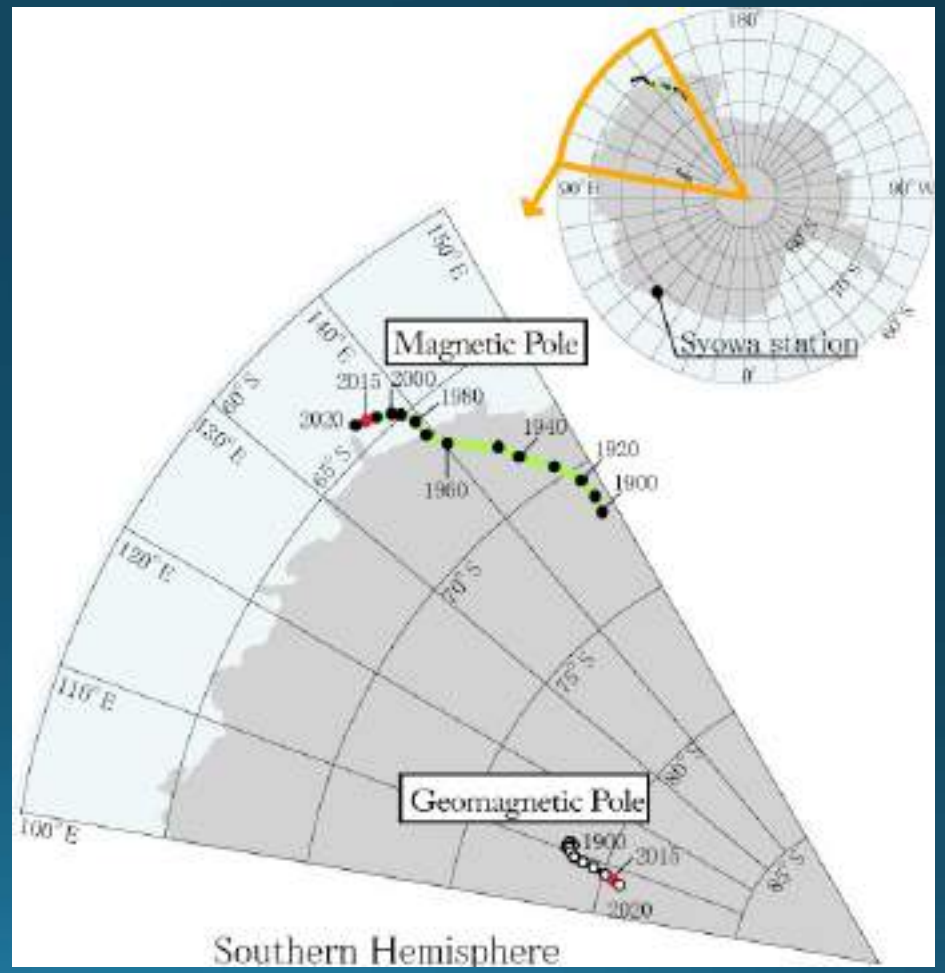
Дипольное поле затухает на 5 - 6% за столетие

Дрейф полюсов

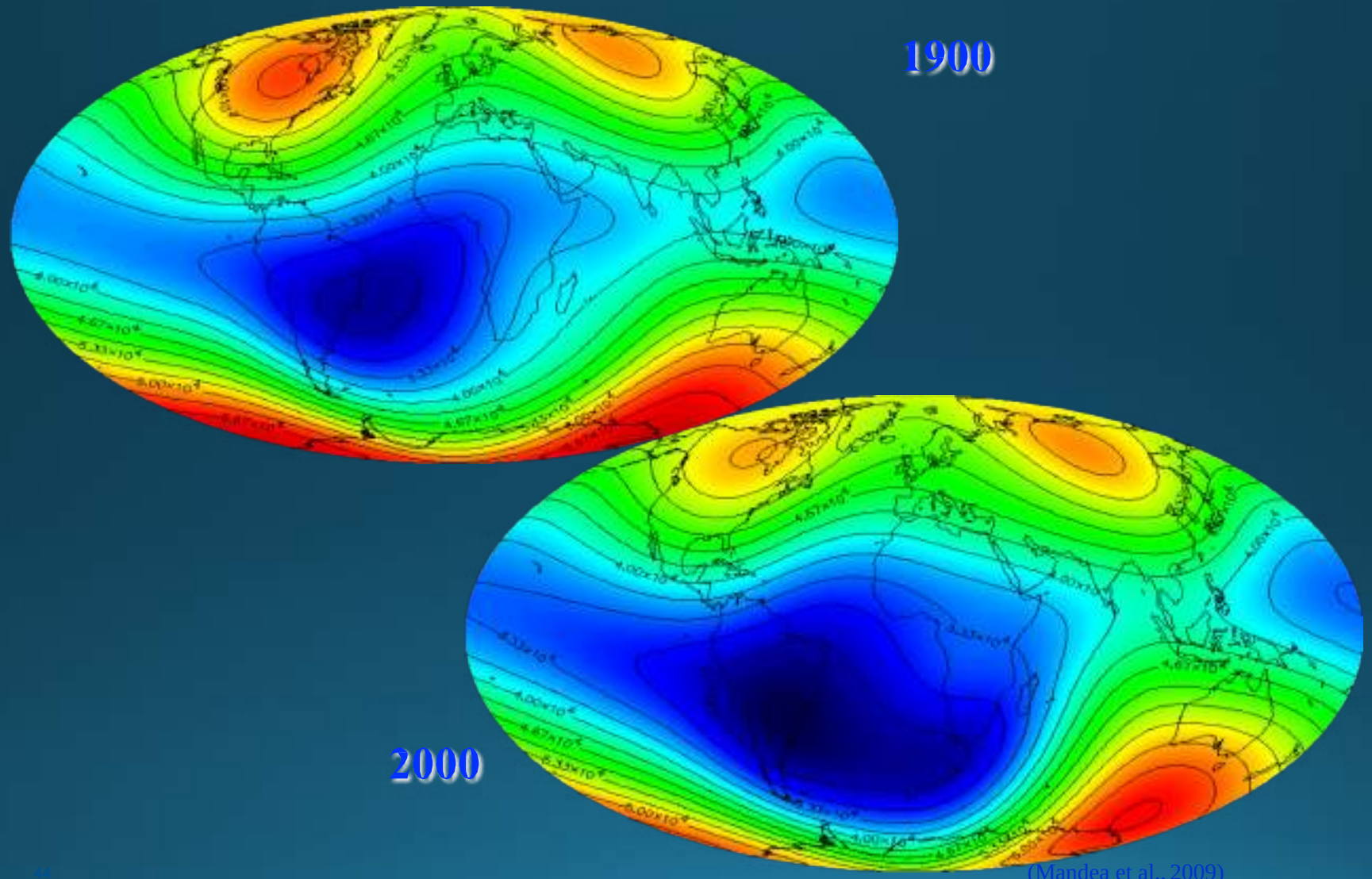
Магнитные полюса перемещаются в пространстве

http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html





Изменение поля за 100 лет

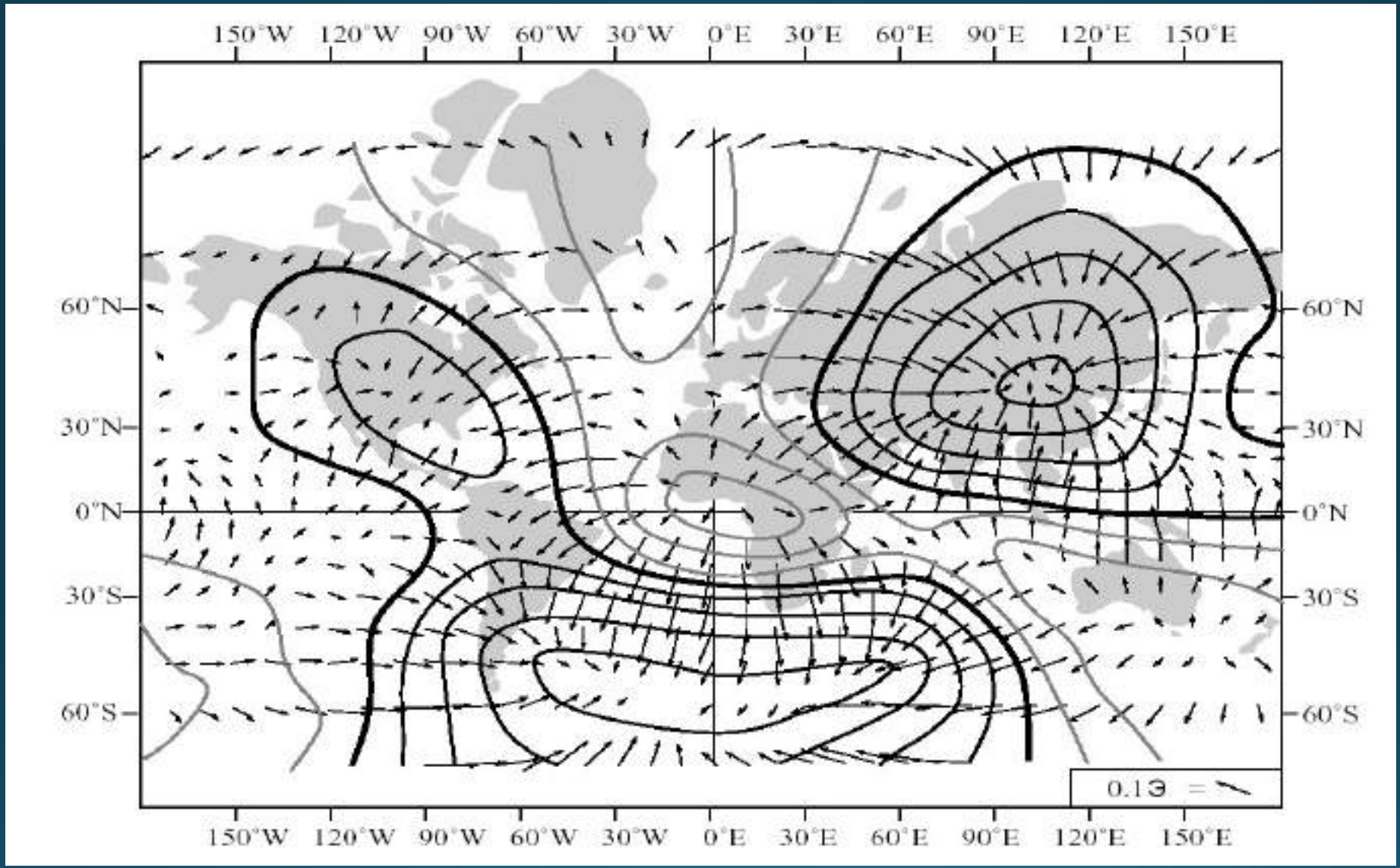


(Mandea et al., 2009)

Недипольное поле

Сферический гармонический анализ показал, что главное геомагнитное поле состоит из дипольной части (>80 %) и недипольной части. Недипольное поле называют также остаточным **полем**.

Недипольная составляющая может быть определена вычитанием дипольного поля из наблюдённого геомагнитного. Недипольное геомагнитное поле для эпохи 1945 г. представлено на следующем слайде.



Недипольное геомагнитное поле для эпохи 1945 г. (т.н. «лицо клоуна»). Стрелки — горизонтальная компонента недипольного поля. Контуры соединяют точки с одинаковой величиной вертикальной компоненты недипольного поля, жирные линии — 0, тонкие черные линии — положительные значения (направление вниз), серые — отрицательные (направление вверх), линии проведены через 0.02 Э, по (Bullard et al, 1950).

Западный дрейф магнитного поля

Характерную особенность имеет недипольная часть главного поля: она дрейфует с течением времени на запад. Это явление, называемое *западным дрейфом* МП, было замечено ещё в XVII в., однако только в середине XX в. удалось установить скорость западного дрейфа — она составляет около 0.2°/год. Предполагается, что физическим механизмом западного дрейфа является более высокая скорость вращения мантии Земли по сравнению с внешним ядром.

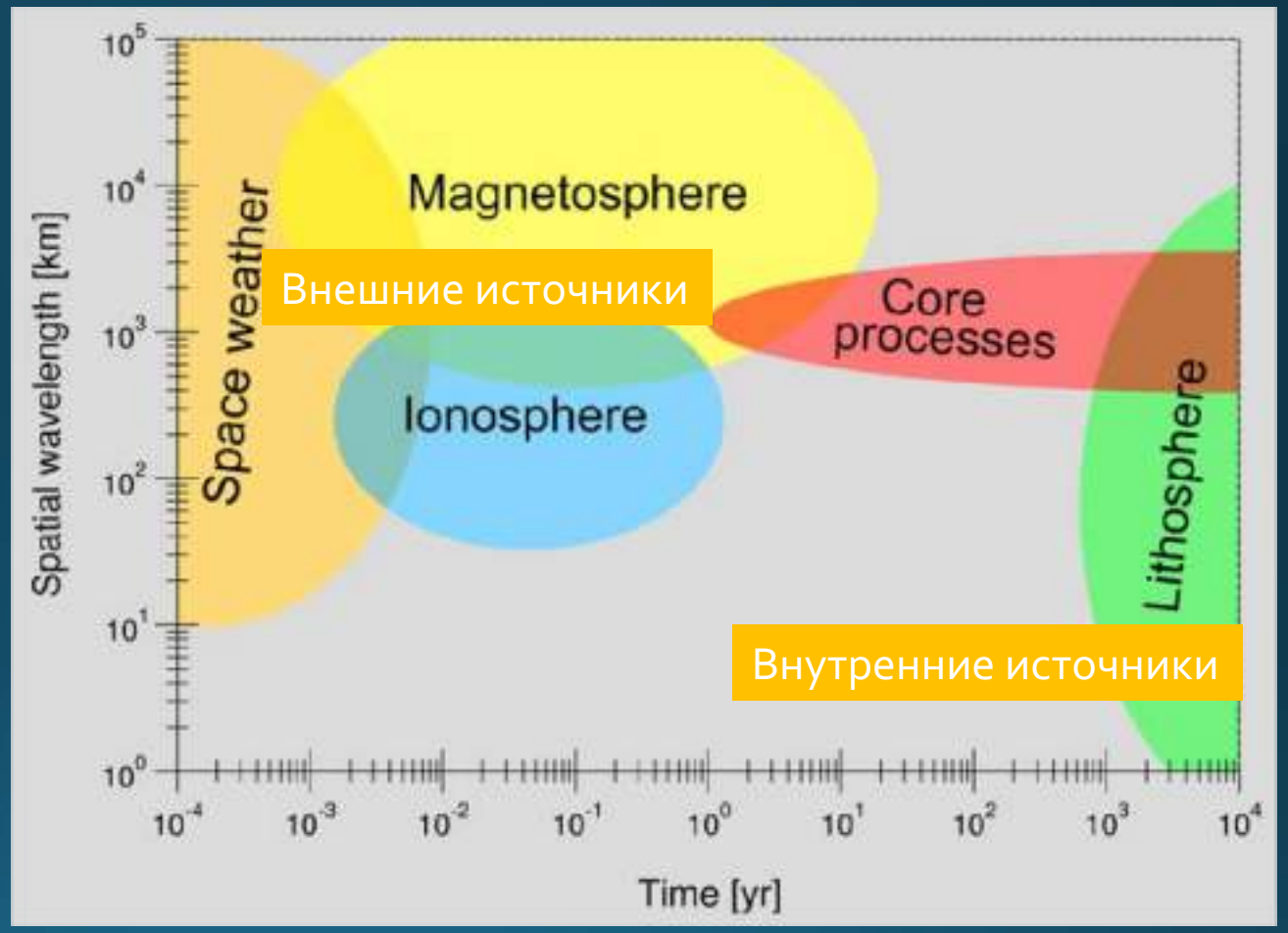
Генерация главного магнитного поля (ГМП) Земли

ГМП генерируется движениями проводящей жидкости во внешнем ядре Земли

- Поскольку нижняя граница внешнего ядра имеет более высокую температуру, чем верхняя, то создаются условия для возникновения тепловой конвекции. Число Рэлея для жидкого ядра Земли оценивается $Ra = 10^9$, что существенно превышает пороговое значение числа Рэлея для турбулентной конвекции $Ra_{mб}$. Это дает основание полагать, что во внешнем ядре возможна турбулентная тепловая конвекция.
- Само по себе движение проводящей жидкости не приводит к появлению магнитного поля. Чтобы в движущейся проводящей жидкости возник ток, необходимо внешнее магнитное поле. Тогда при определенных конфигурациях движений и соотношениях скорости и потерь, выделяющихся в виде тепла (омические потери), возможно *самоподдерживающее динамо.*

Вариации магнитного поля Земли

Изменчивость во времени и пространстве называется вариациями магнитного поля.



Характерные диапазоны в пространство-времени геомагнитных аномалий

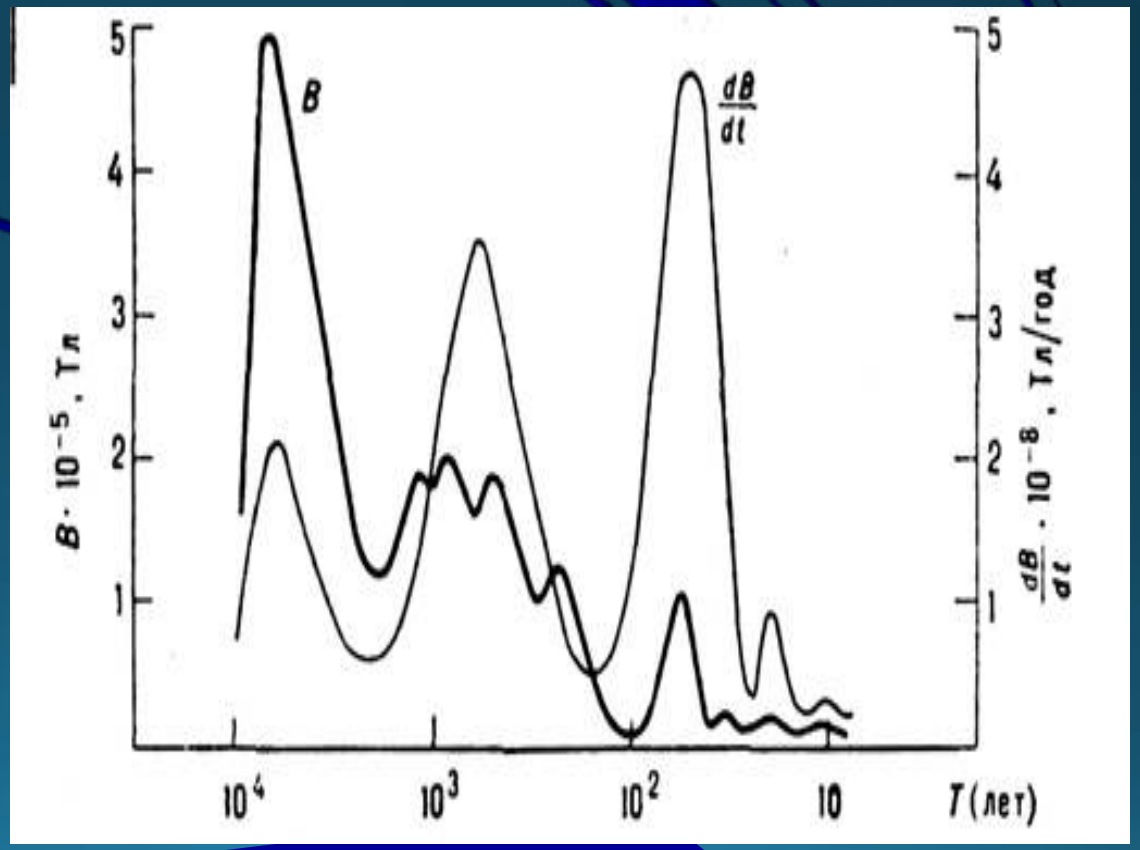
Вековые вариации связаны с процессами во внешнем ядре Земли

Периоды от 10 до 10 000 лет.
Максимумы: 7000 лет, 600лет, 60 лет

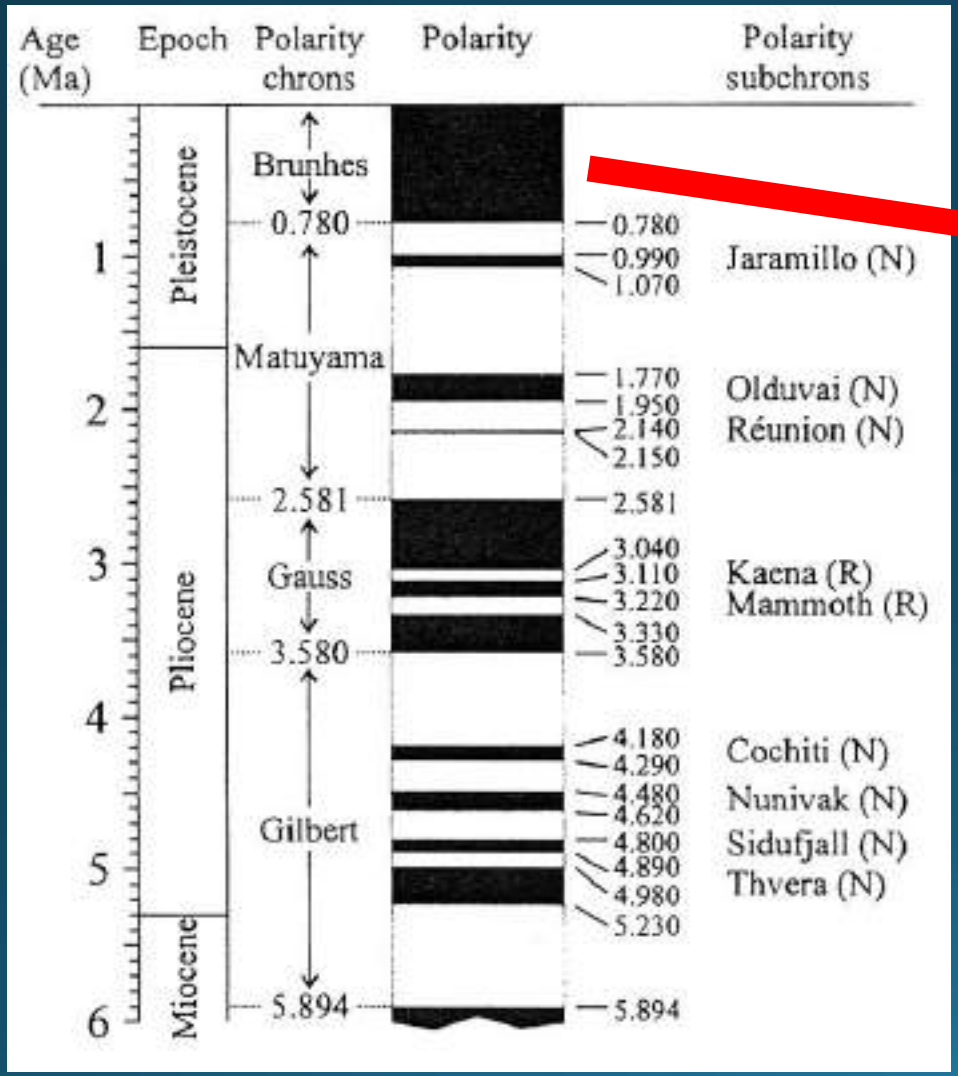
Временные вариации МП

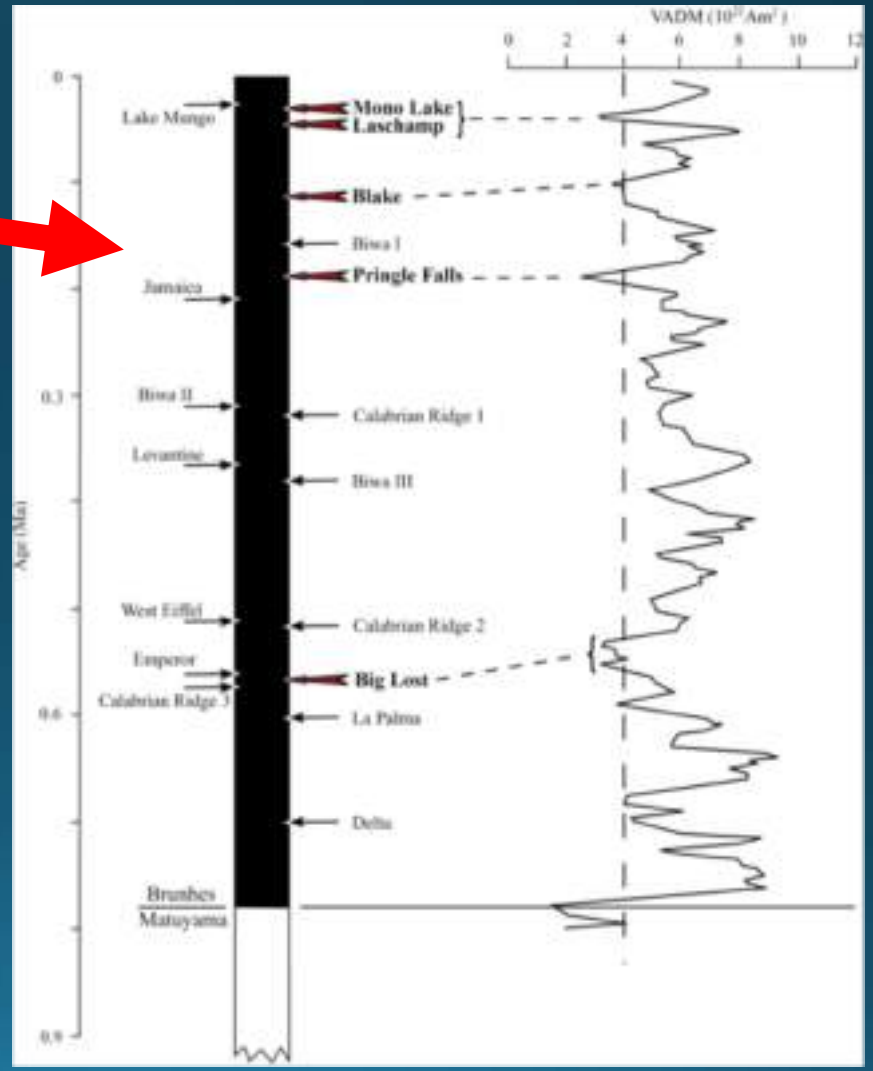
-Вековые вариации сотни лет

- Быстрые вариации десятки лет

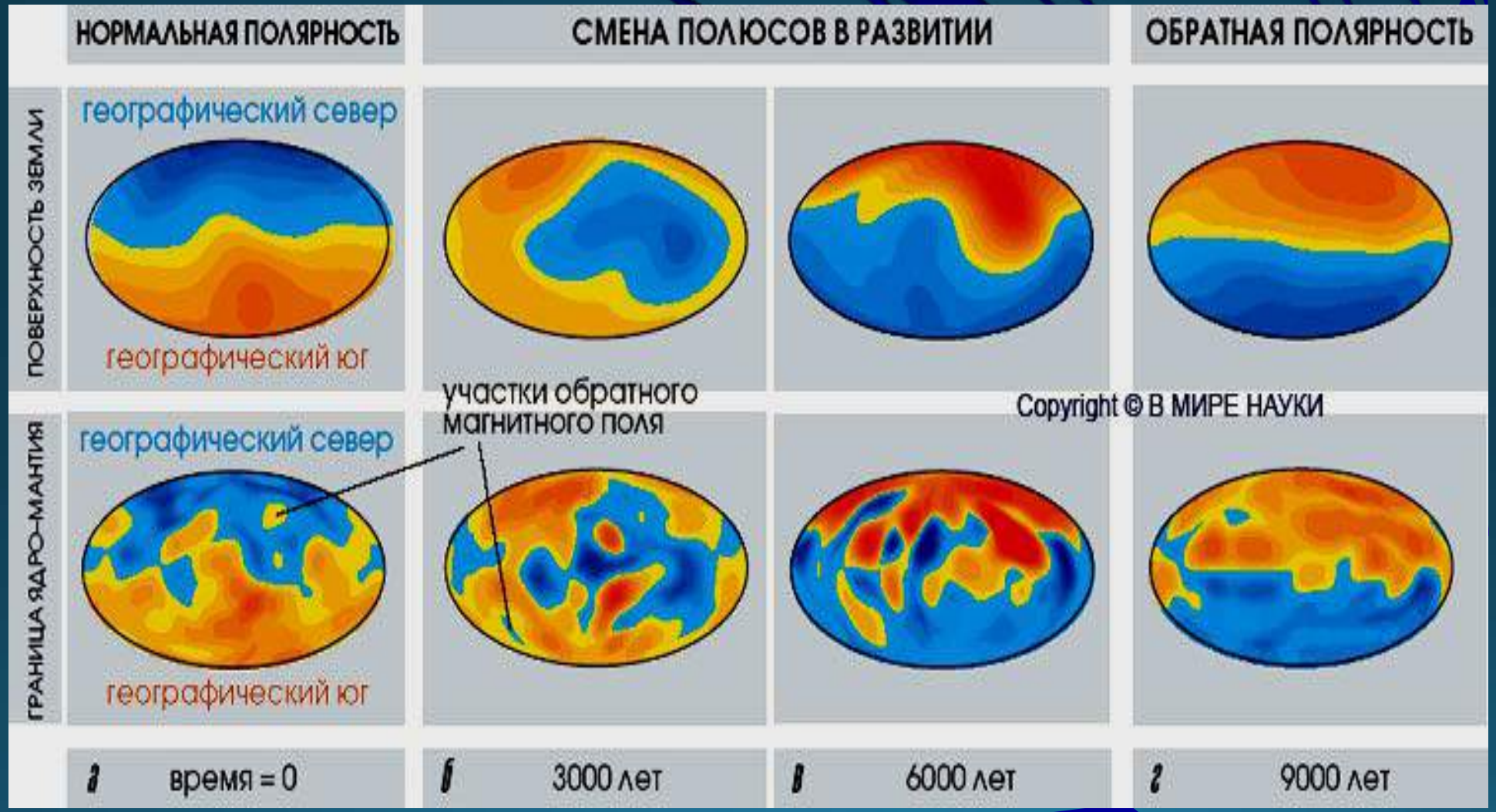


Инверсии магнитного поля Земли

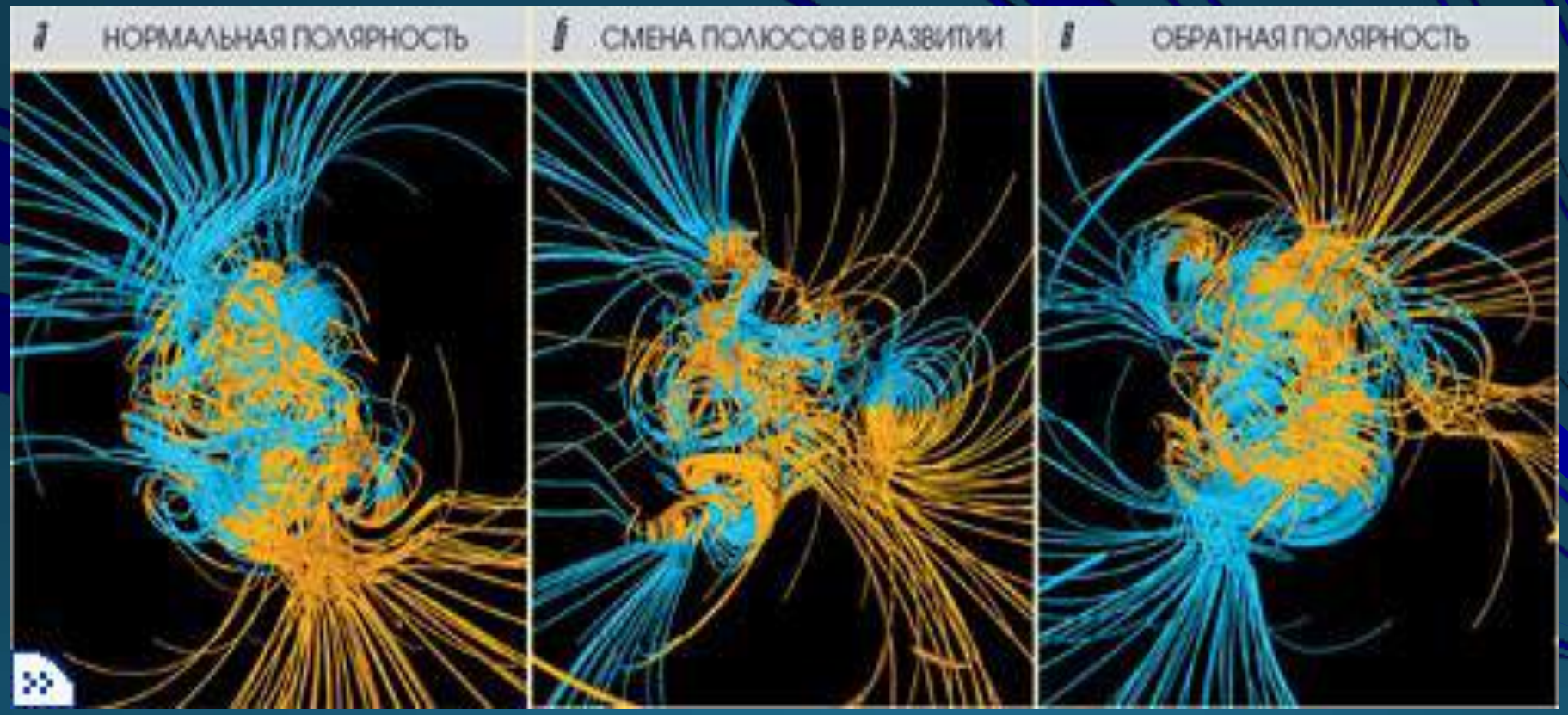




Теоретическая модель инверсии МПЗ



Ориентация магнитных силовых линий за 500 лет до смены полярности, в процессе инверсии и через 500 лет после неё.



Палеомагнетизм

- Литосферный или коровый магнетизм – магнитное поле от изверженных горных пород (напр., базальты), содержащих ферромагнитные минералы,охлажденных ниже точки Кюри
- Нагрев материалов выше точки Кюри приводит к потере намагниченности

Минерал	Хим. формула	Точка Кюри (°C)	Намагниченность 10^3 А/м	χ Ед. СИ
магнетит	Fe_3O_4	578	490	4-25
гематит	Fe_2O_3	560-640	1.5-2.5	10^{-4}-$2*10^{-3}$
маггемит	Fe_2O_3	560-640	435	4-25
пирротин	Fe_7O_8	300-325	17-70	10^{-2}-10^{-1}

- Глубины образования: ~30 км в континентальных зонах, 6-7 км от дна океана
- Магнитная восприимчивость χ – способность породы намагничиваться под действием внешнего магнитного поля

Палеомагнетизм

Палеомагнетизм, свойство горных пород намагничиваться в период своего формирования под действием магнитного поля Земли и сохранять приобретённую остаточную намагниченность в последующие эпохи.

$$I = \chi\mu_0 H + I_n;$$

$$\mu_0 = 1{,}25\times10^{-6}\,\frac{B\cdot c}{A\cdot м}$$ Магнитная постоянная

$\chi\mu_0 H$ -индуктивная намагниченность, всегда направлена по современному полю

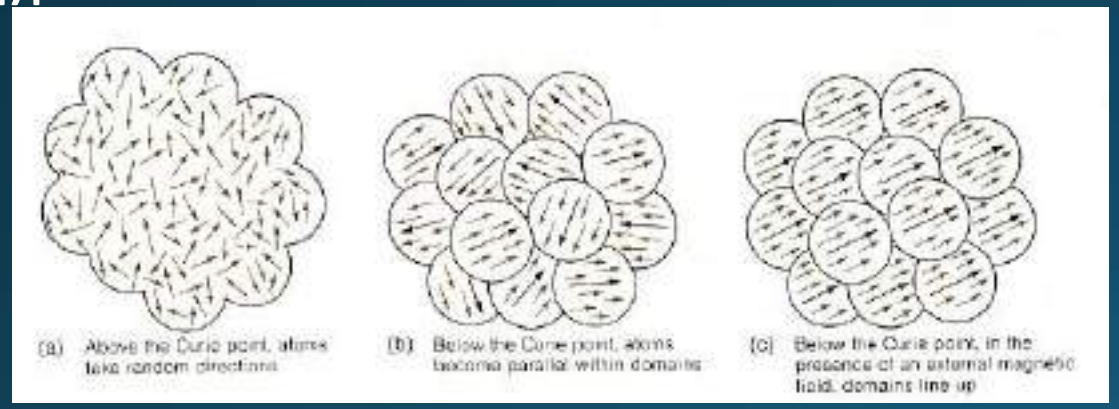
I_n -естественная остаточная намагниченность, возникла в момент образования пород и отражает направление древнего поля

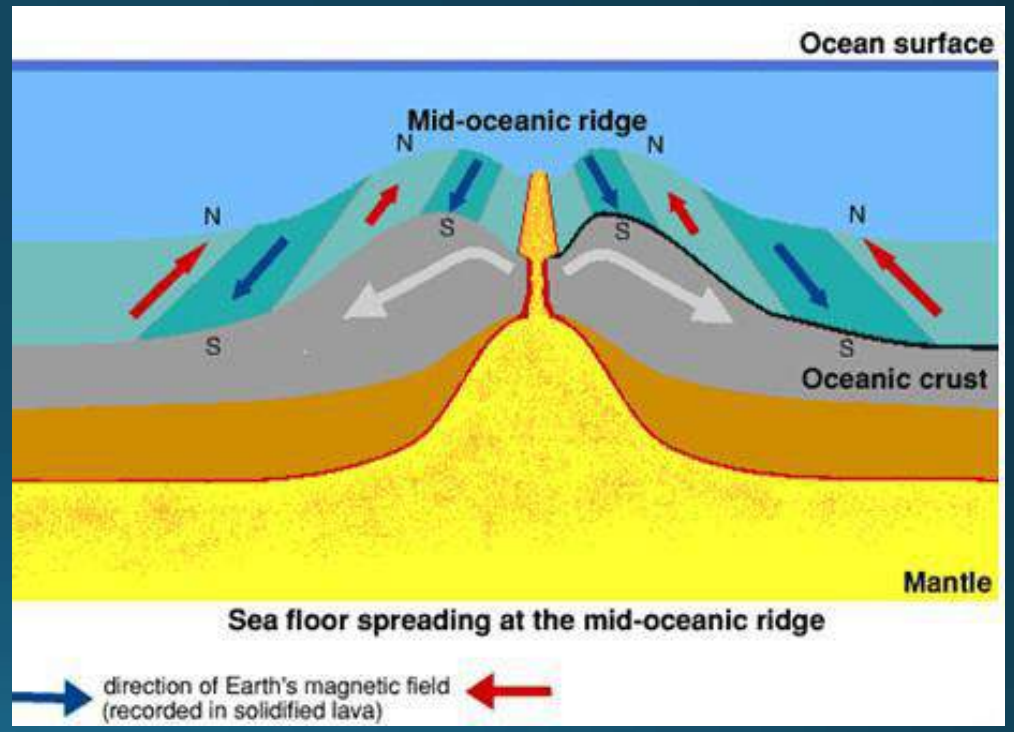
$$I_n \geq \chi\mu_0 H$$

χ - магнитная восприимчивость ферромагнетика

Механизм формирования литосферных аномалий

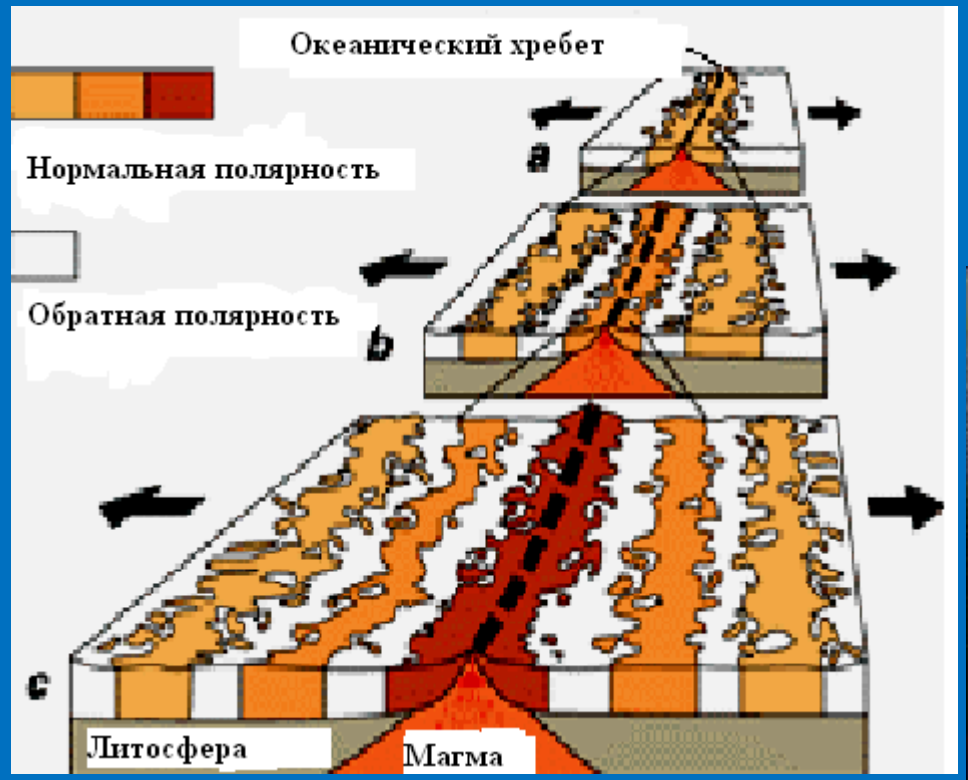
- При охлаждении под воздействием внешнего поля атомные моменты ферромагнитных веществ выстраиваются по направлению поля

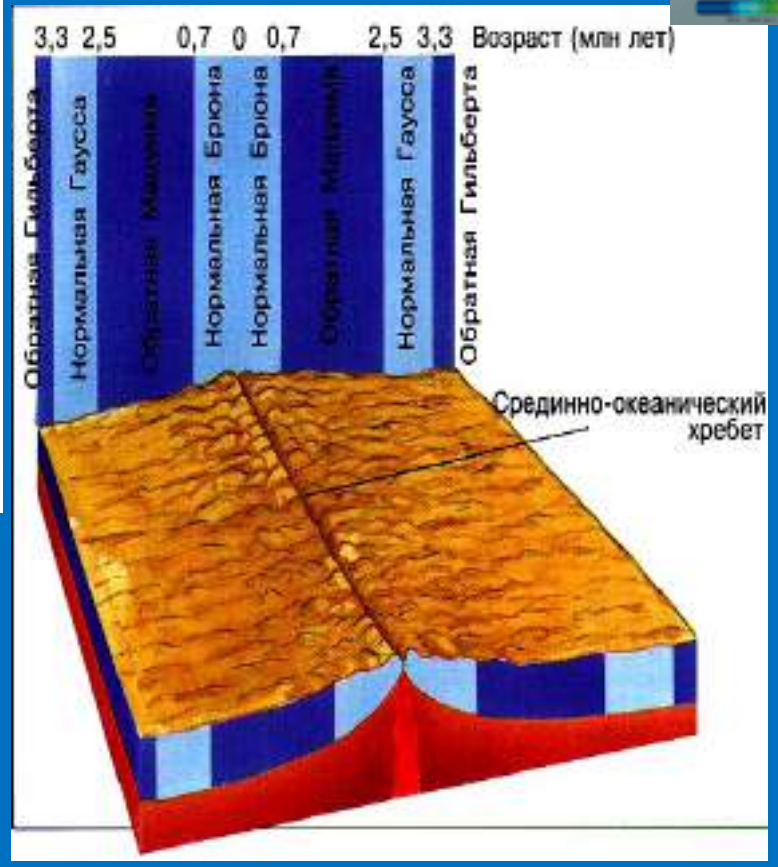


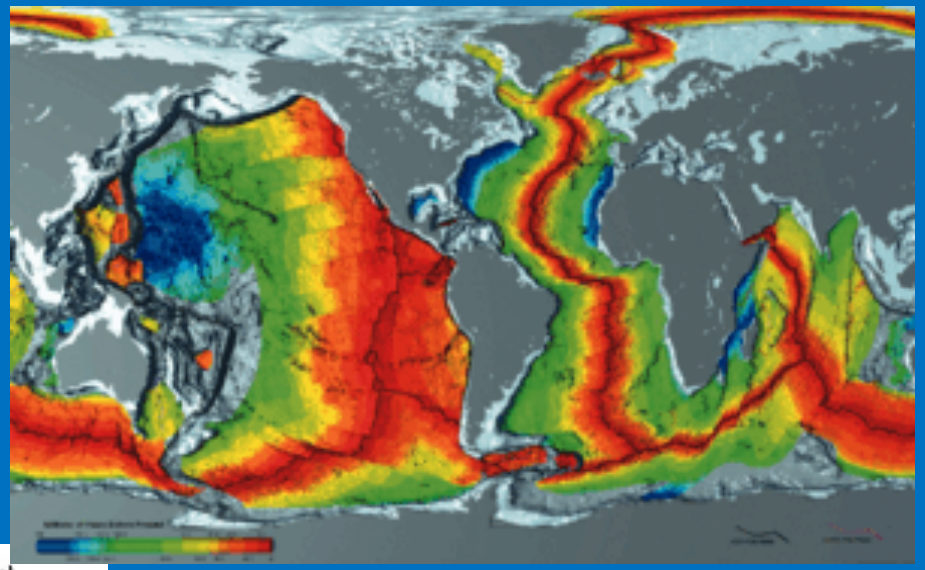


- Древнее поле оказывается "запомненным" в куске породы на тот момент, когда температура материала опустилась ниже точки Кюри

Линейчатые магнитные аномалии срединно-океанических хребтов.

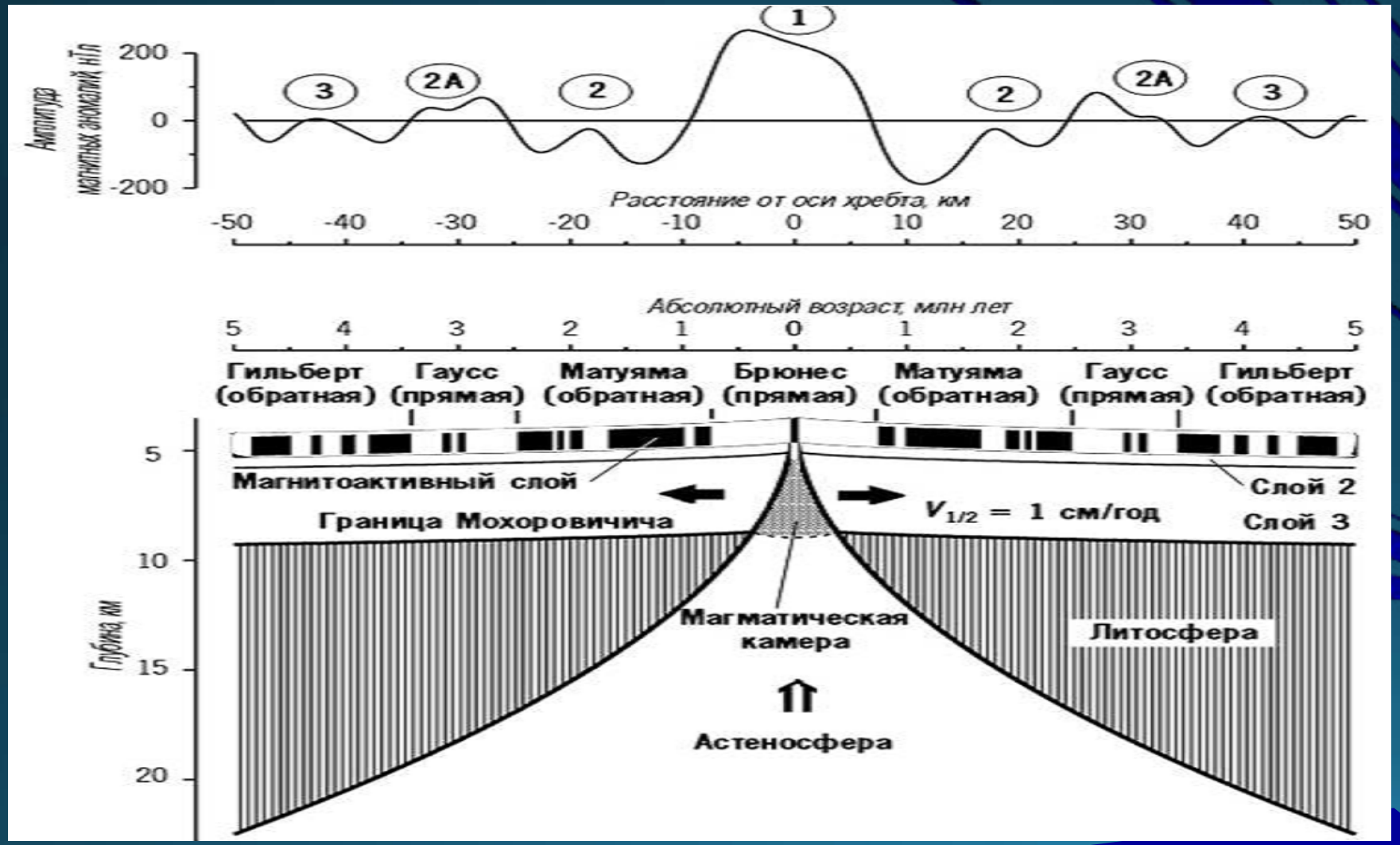


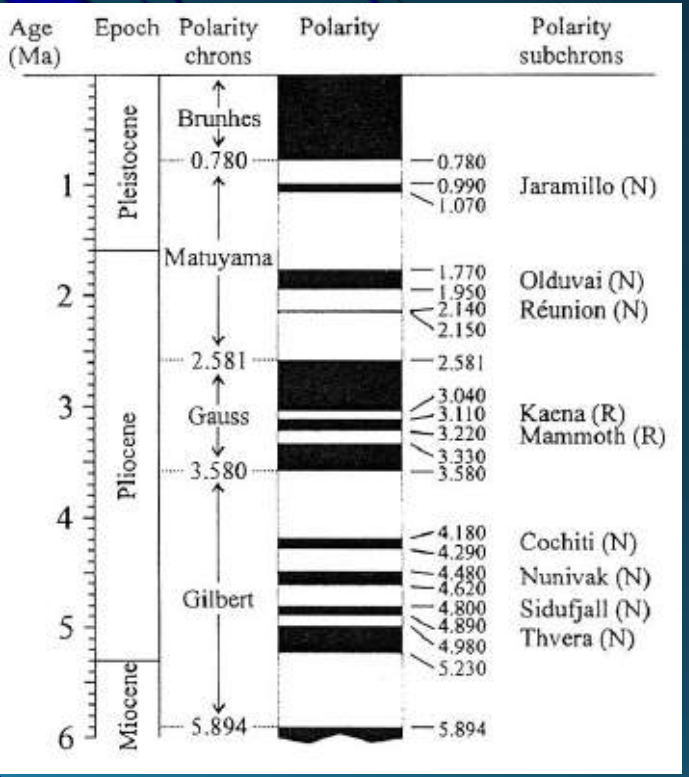




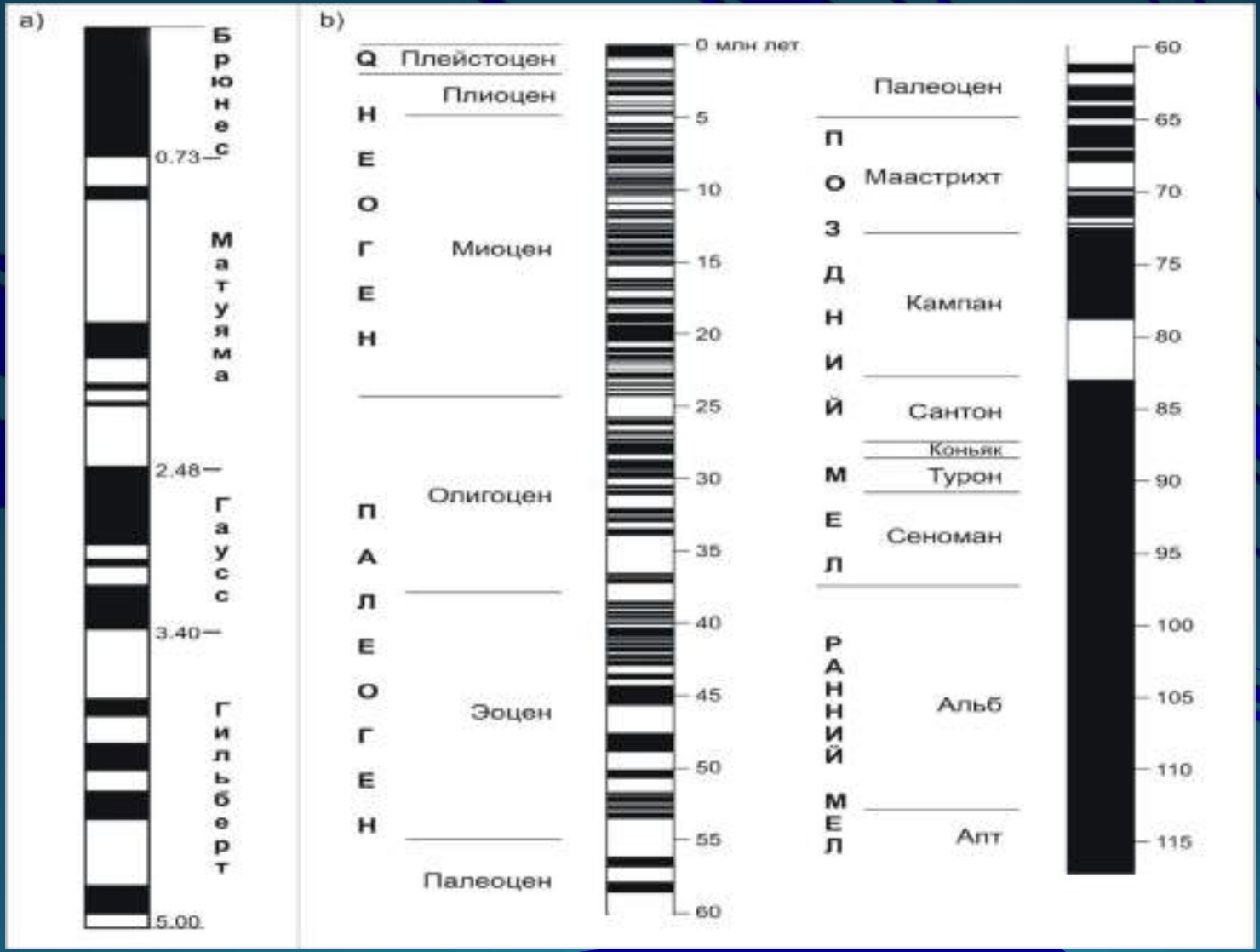
Возраст океанической коры (красный цвет – молодая кора)

Симметрия магнитных аномалий относительно оси срединно-океанического хребта



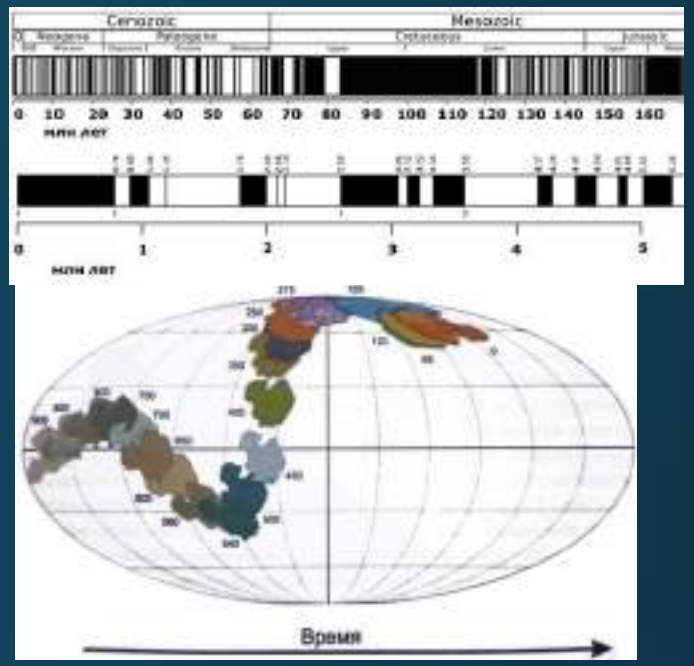


Магнитохронологическая шкала на период 115 млн.лет

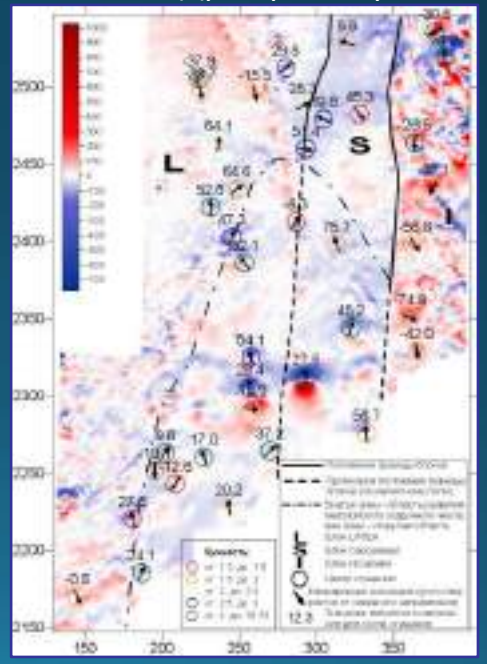


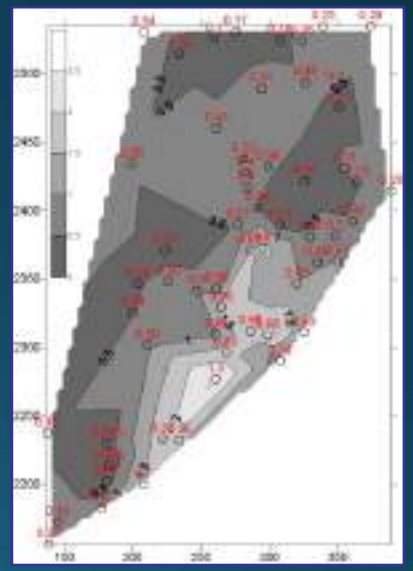
Научные области применения

- Эволюция магнитного поля Земли
- Геологическая история Земли
- Геохронология
- Геотектоника
- Палеогеография



[В.Э. Павлов и др., 2015] *Дрейф Сибирской платформы в фанерозое*





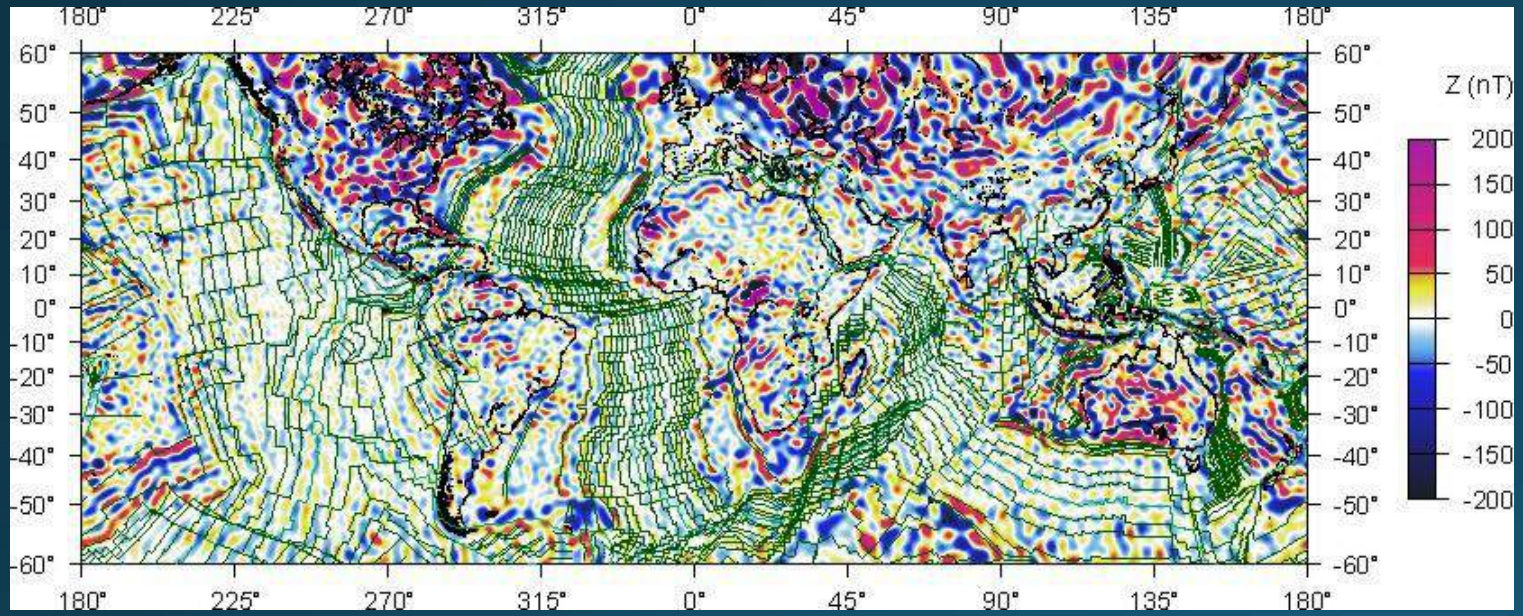
[А.А. Соловьев и др., 2004]

Глобальная палеомагнитная реконструкция движения континентов (600 млн. лет тому назад)

Современные данные по литосферному Магнитному полю

- Глобальные модели литосферного поля: NGDC-720, MF7
- Глобальные сеточные данные: EMAG-2
- Глобальная цифровая карта магнитных аномалий WDMAM

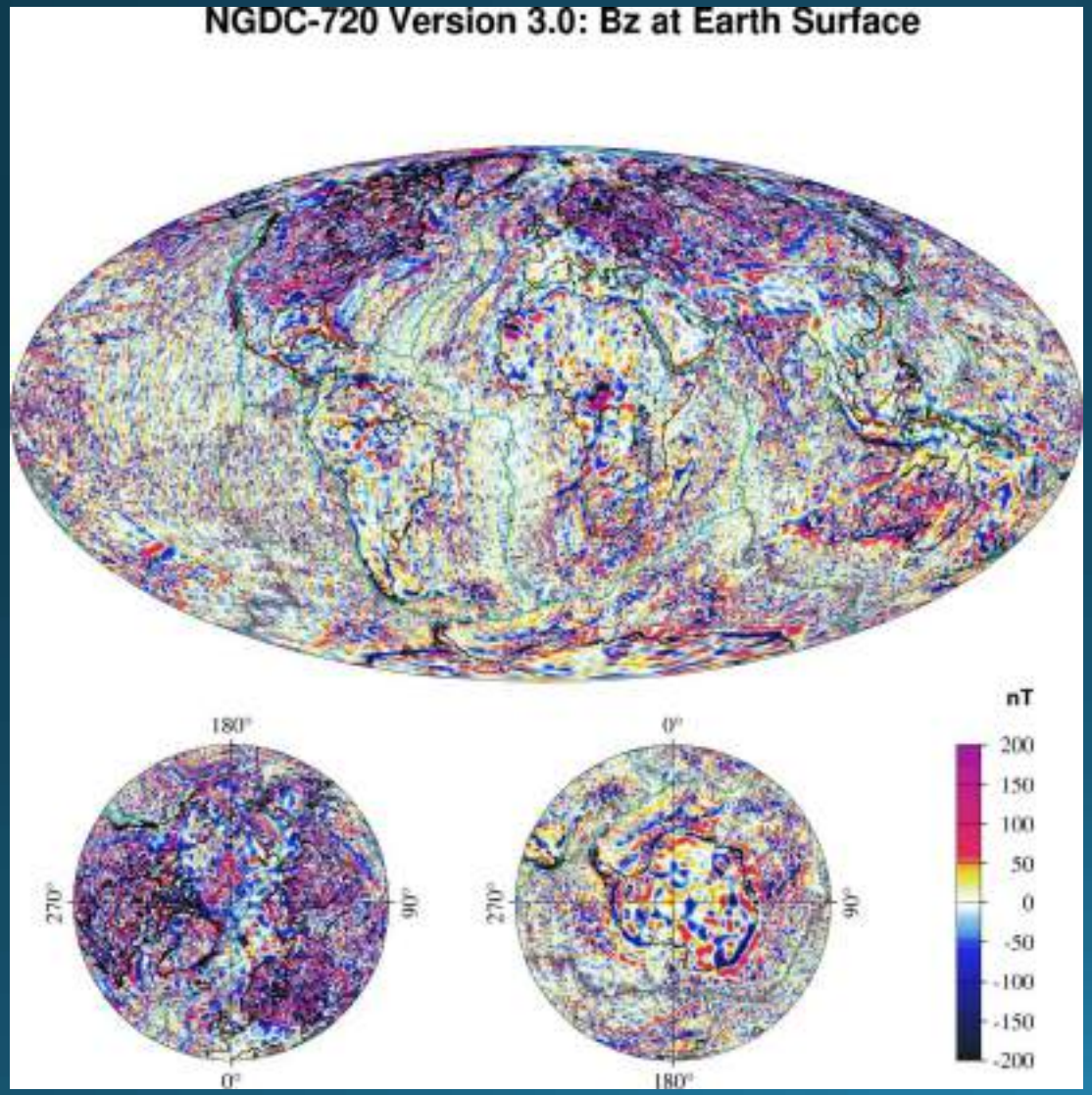
Модель MF-7



- **Степень разложения:** 133
- **Диапазон волн:** до 300 км
- **Разрешение:** ~1.35 градуса
- **Источники:** спутниковые данные CHAMP (2007-2010)
- **Данные:** коэффициенты разложения; сеточные данные Z и F, 6 угловых минут на высоте эллипсоида WGS84

[S. Maus, 2010]

Модель NGDC-720

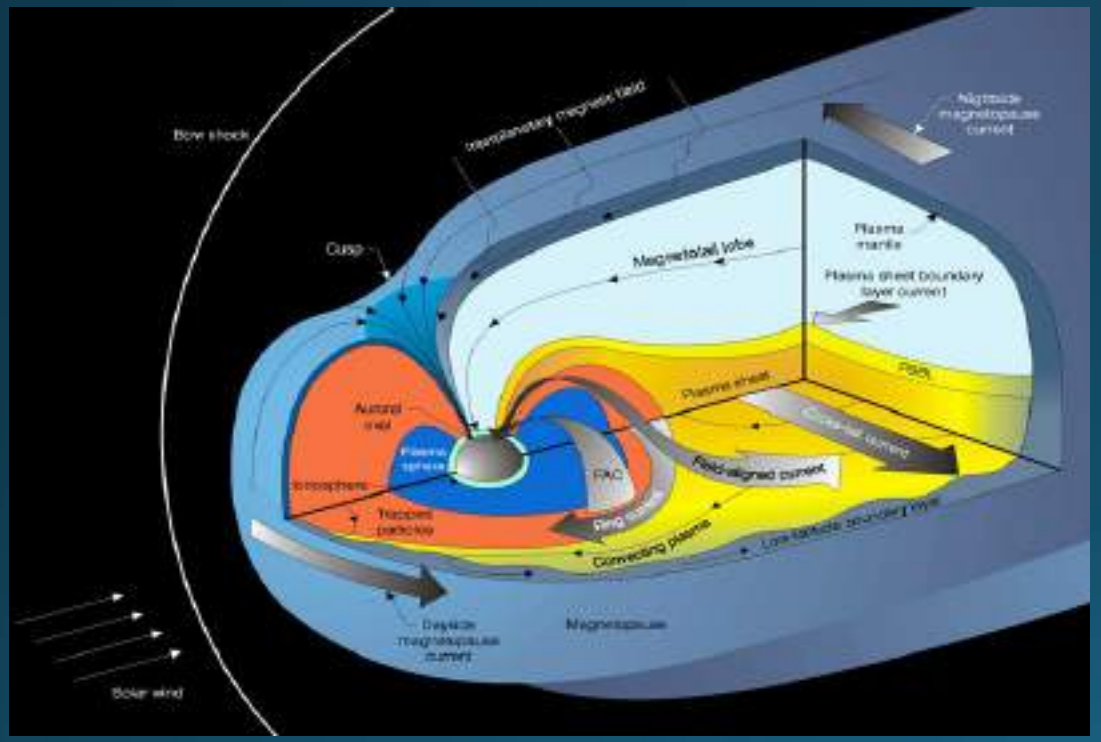


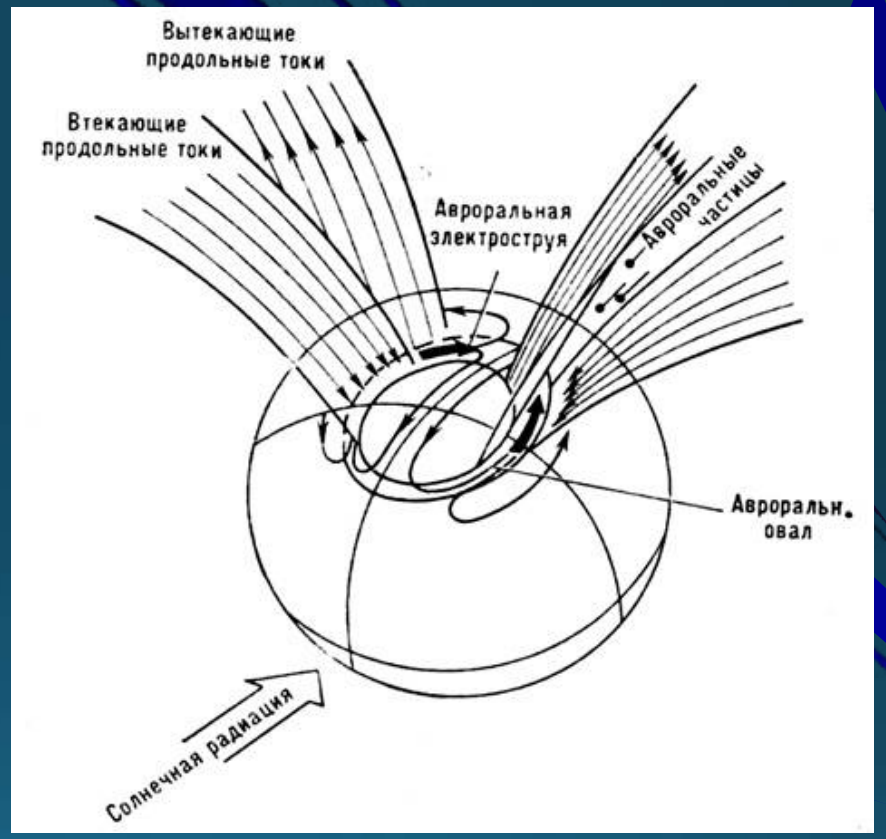
- **Степень разложения:** 16-720
- **Диапазон волн:** 2500-56 км
- **Разрешение:** 15 минут
- **Источники:** спутниковые, морские, аэромагнитные и наземные данные
- **Данные:** коэффициенты разложения; сеточные данные XYZ, 7.5 угловых минут (1/8 градуса) на высоте эллипсоида

[S. Maus, 2010]

Полярные сияния

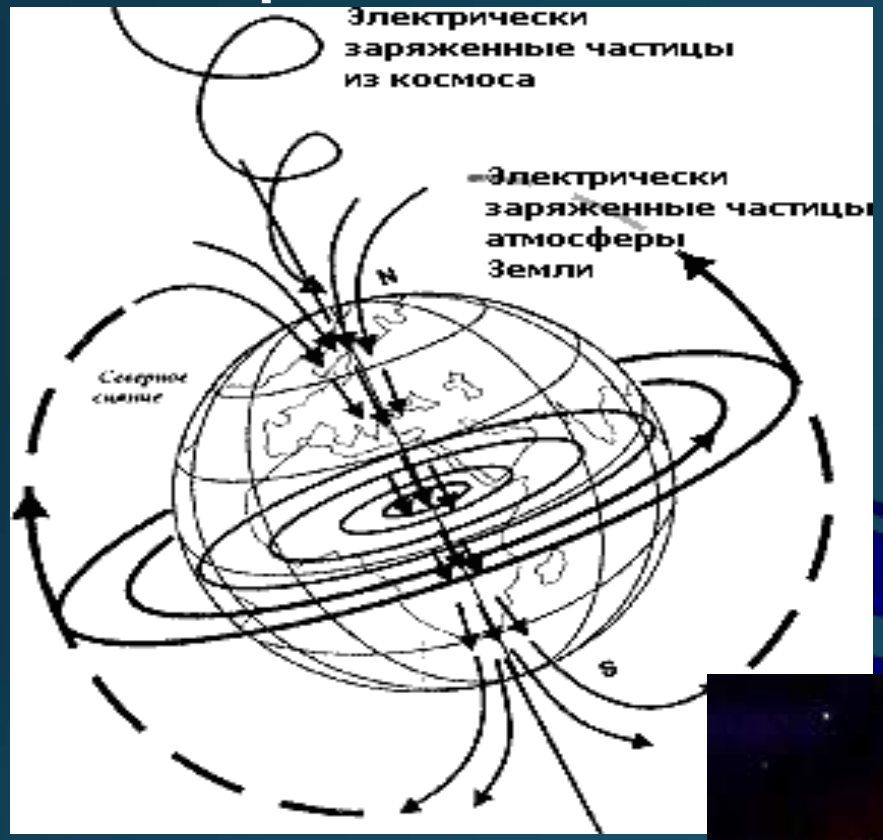
Полярные сияния возникают вследствие бомбардировки верхних слоёв атмосферы заряженными частицами, движущимися к Земле вдоль силовых линий геомагнитного поля из области околоземного космического пространства, называемой *плазменным слоем*.



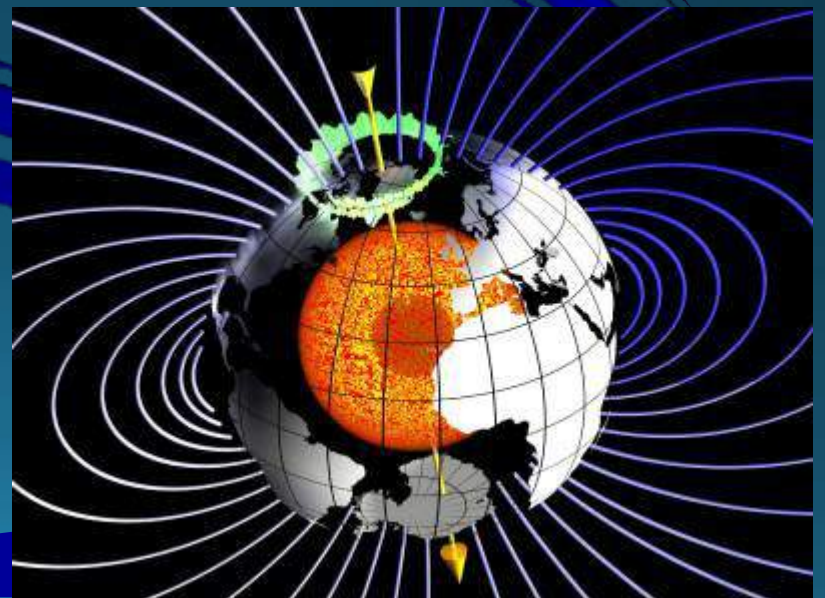


Проекция плазменного слоя вдоль геомагнитных силовых линий на земную атмосферу имеет форму колец, окружающих северный и южный магнитные полюса (***авроральные овалы***).

Полярные сияния.



- **Полярное сияние** (лат. *Aurora Australis*)
- — свечение (люминесценции) верхних слоёв атмосфер планет, обладающих магнитосферой, вследствие их взаимодействия с заряженными частицами солнечного ветра.



Магнитное поле Земли: Резюме

- Для измерения магнитного поля используются **различные физические явления**: электромагнитная индукция, прецессия спинового магнитного момента протонов, эффект Зеемана, эффект Джозефсона.
- Магнитное поле разделяется на **главное** (соответствует младшим гармоникам разложения потенциала), **аномальное** и **внешнее** (соответствуют старшим гармоникам разложения потенциала)
- Главное магнитное поле (ГМП), составляющее 95% МПЗ, генерируется **течениями во внешнем ядре Земли**. В первом приближении ГМП можно представить **диполем**.
- Аномальное поле, составляющее 4% МПЗ, обусловлено намагниченностью горных пород **литосферы Земли**
- Внешнее поле, составляющее 1% МПЗ, определяется источниками в **околоземном пространстве**
- МПЗ **не постоянно во времени**, вариации МПЗ имеют широкий диапазон периодов – от суток до десятков тысяч лет
- МПЗ **не постоянно в пространстве**, магнитные полюса «дрейфуют», недипольное поле испытывает западный дрейф
- МПЗ испытывало многократные **инверсии** (переполюсовки)
- Горные породы земной коры **намагничиваются** полем в момент их образования. Это позволяет по **палеомагнитным** данным определять величины и направления МПЗ в **геологическом масштабе времени**.