

Геофизика 2024 Лекция № 5

<http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/>

Физика твердой Земли (лекция 4)



КАФЕДРА ФИЗИКИ ЗЕМЛИ
Физический факультет
МГУ им. М. В. Ломоносова

[О КАФЕДРЕ](#) [НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ](#) [УЧЕБА](#) [КОНТАКТЫ](#)

<https://earthphysics.ru/students>

Информация для студентов

ОБЩИЕ КУРСЫ

ГЕОФИЗИКА

Курс Отделения геофизики для студентов 2-го курса физического факультета.

Раздел "Физика твердой Земли".

Содержание:

- Сейсмология и строение Земли
- Очаг землетрясения и сейсмичность Земли
- Гравитационное поле и фигура Земли
- Геотермия и энергия процессов в Земле
- Магнитное поле Земли

Материалы лекций

- [1-я лекция](#)
- [2-я лекция](#)
- [3-я лекция](#)
- [4-я лекция](#)

Рекомендуемая литература:

1. Захаров В.С., Смирнов В.Б. Строение и физика Земли. Вводный курс: учебное пособие – Долгопрудный. Издательский дом «Интеллект», 2018. – 224 с.
2. Захаров В.С., Смирнов В.Б. Физика Земли: учебник. М.: ИНФРА-М, 2016. – 328 с. / Учебник для естественнонаучных факультетов
3. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука и образование, 2013. – 413 с. / Учебник для углубленного изучения предмета



Смирнов Владимир Борисович

заведующий кафедрой
физики Земли
vs60@mail.ru

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

Оценки геотермического градиента: Земная кора и верхняя мантия

$$v = v(p, T)$$

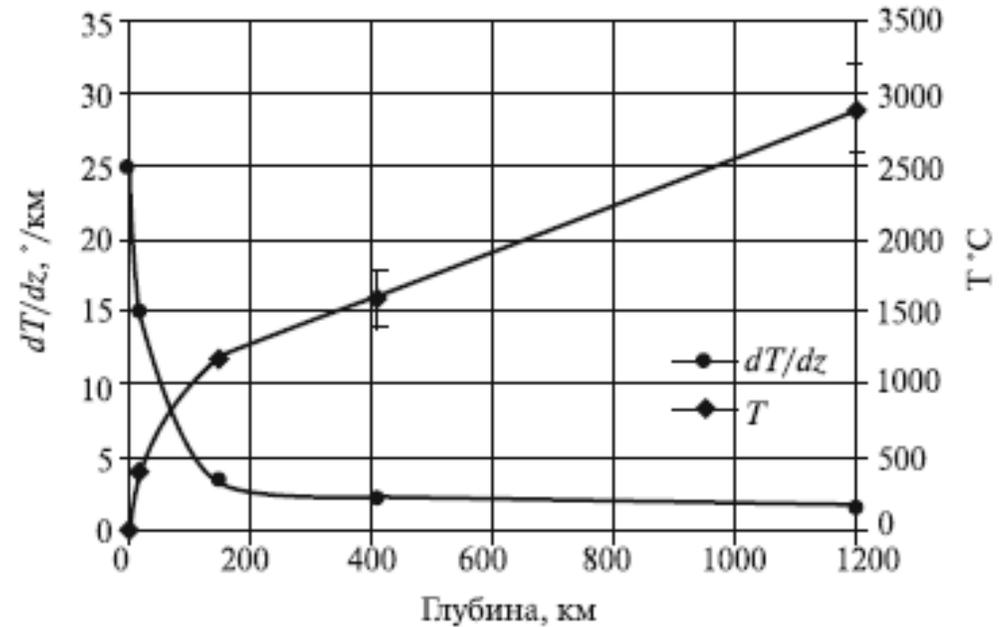
$$\frac{dv}{dz} = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T \frac{dp}{dz} + \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \frac{dT}{dz}$$

$$dp/dz = \rho g.$$

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\frac{dv}{dz}}{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p} - \rho g \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T}{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p}$$

модель
Земли

лаборатория



Температура в Земле, полученная по методу реперных точек

z, км	T, °C	Дополнительные данные
0	10	
40	550	точка Кюри z = 60 км T = 600—700 °C
150	1200—1400	1200—1400 °C — вулканы (магма из астеносферы)
410	1600 ± 200	—
1200	2900	—

Пределы температур

- Нижний предел температуры в Земле – температура нагрева при сжатии Земли; определяется **адиабатическим градиентом**
- Верхний предел температуры в твердой мантии Земли – **температура плавления**
- **Физика твердого тела позволяет связать** теплофизические параметры со скоростями упругих волн

нагрев при сжатии

$$\frac{dT_a}{dp} = \frac{\alpha T_a}{c_p \rho}$$

гидростатика

$$dp/dz = \rho g.$$

$$\frac{dT_a}{dz} = \frac{g\alpha T_a}{c_p}$$

адиабатический градиент

Гипотеза Линдемана

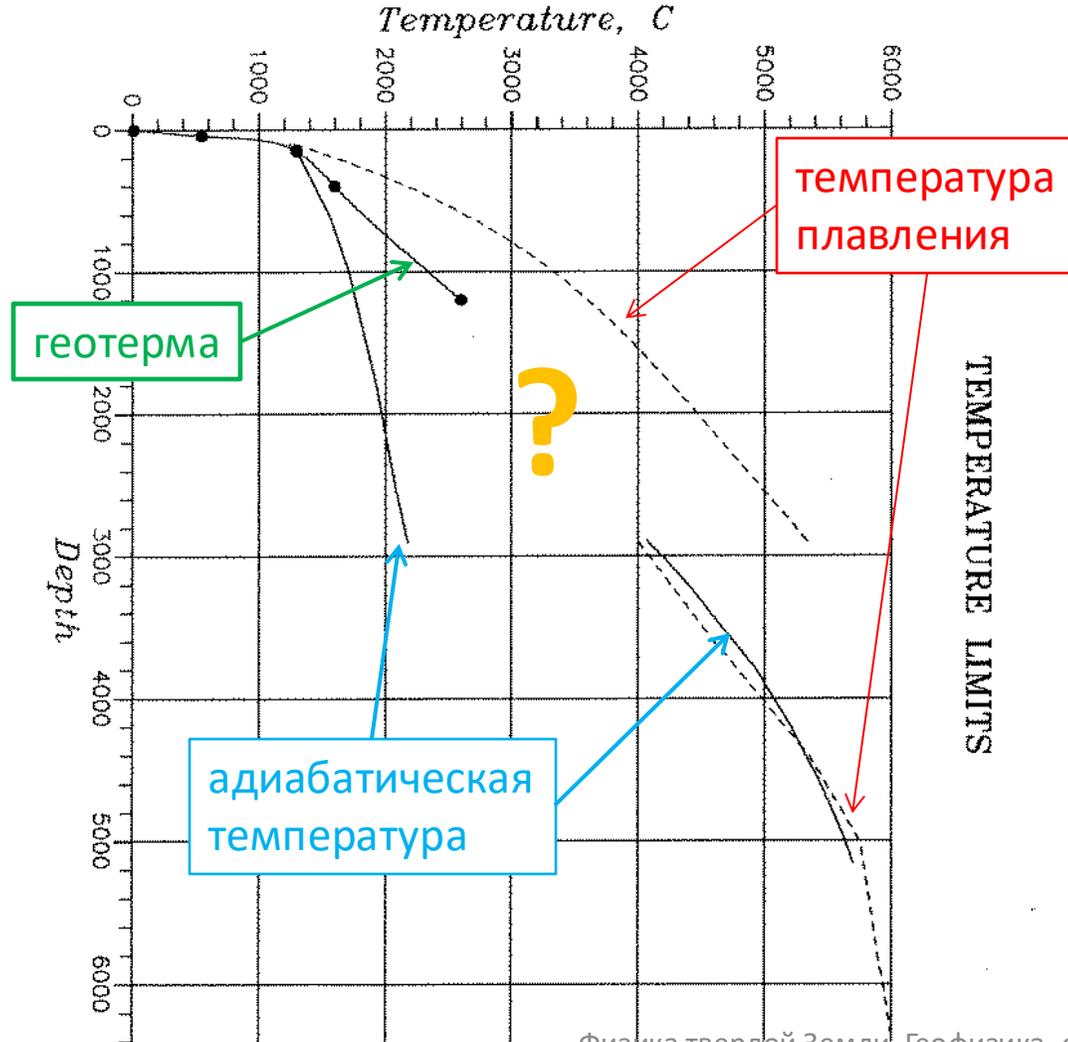
$$\frac{\zeta}{a} = \mathit{const}$$

$$\frac{T_{\text{пл}}(z_1)}{T_{\text{пл}}(z_2)} = \frac{\Phi(z_1)}{\Phi(z_2)}$$

$$\frac{\alpha(z)}{c_p(z)} = f(\rho, v_p, v_s)$$

$$\Phi(z) = v_p^2 - \frac{4}{3} v_s^2$$

Пределы температур в Земле



Уравнение теплопроводности

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\chi}{\rho c} \frac{d^2T}{dz^2} = k \frac{d^2T}{dz^2}$$

$[k] = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ - коэффициент температуропроводности

Масштабы теплопроводности

ΔT – разность температур на расстоянии L

$$\frac{\Delta T}{\tau} = k \frac{\Delta T}{L^2} \Rightarrow \boxed{L^2 = k\tau}$$

Для Земли: $k \approx 5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$

При $\tau=4.6$ млрд лет получаем

$L \approx 300$ км

Только теплопроводность выносит тепло

с очень маленькой глубины

Кондуктивный и конвективный теплоперенос

- Молекулярная теплопроводность – кондуктивный теплоперенос
- Уравнение теплопроводности
- Перемещение горячего (холодного) вещества – конвективный теплоперенос
- Уравнения гидродинамики

Конвекция (теория будет рассмотрена позже, в лекциях по физике моря и физике атмосферы)

Конвективной неустойчивостью называется неустойчивость в ~~газовой или жидкой~~ ^{вязкой} среде, находящейся в поле силы тяжести, которая пронизывается потоком тепла в направлении противоположном вектору g

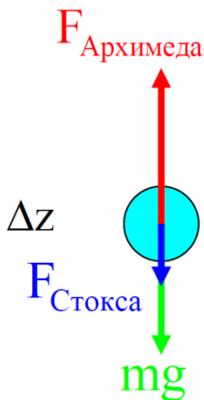
$$F_A - mg = g \Delta \rho V \sim g \Delta \rho r^3$$

$$F_C = 6\pi \rho \nu r U \sim \rho \nu r U$$

$$F_A - mg = F_C$$

$$U \sim \frac{\Delta \rho g r^2}{\rho \nu} = \frac{\alpha g r^2 (T_2 - T_1)}{\nu d} \Delta z$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \alpha \frac{T_2 - T_1}{d} \Delta z$$

$$\tau_{\Delta z} \sim \frac{\Delta z}{U} = \frac{\nu d}{g \alpha (T_2 - T_1) r^2}$$


На временах в **десятки-сотни тысяч лет** мантию Земли можно рассматривать как **вязкую жидкость** с диффузионной вязкостью:

$$\eta \sim e^{\frac{\delta H}{kT}} \sim 10^{21} \div 10^{23} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$Ra \sim 10^6 \gg Ra_K \quad (Ra_K \sim 10^3)$$

Конвекция возможна!

$$\tau_{\Delta z} \sim \frac{\nu d}{g \alpha (T_2 - T_1) r^2} \quad ? \quad \tau_T \sim \frac{r^2}{\chi}$$

$$\tau_T = \frac{g \alpha (T_2 - T_1) r^4}{\chi \nu d}$$

$$Ra = \frac{g \alpha (T_2 - T_1) d^3}{\chi \nu}$$

Температуропроводность χ [м²/с]

$r \sim d$

Число Рэлея

Конвекция в мантии Земли

Геологическая схема конвекции



Сейсмическая томография

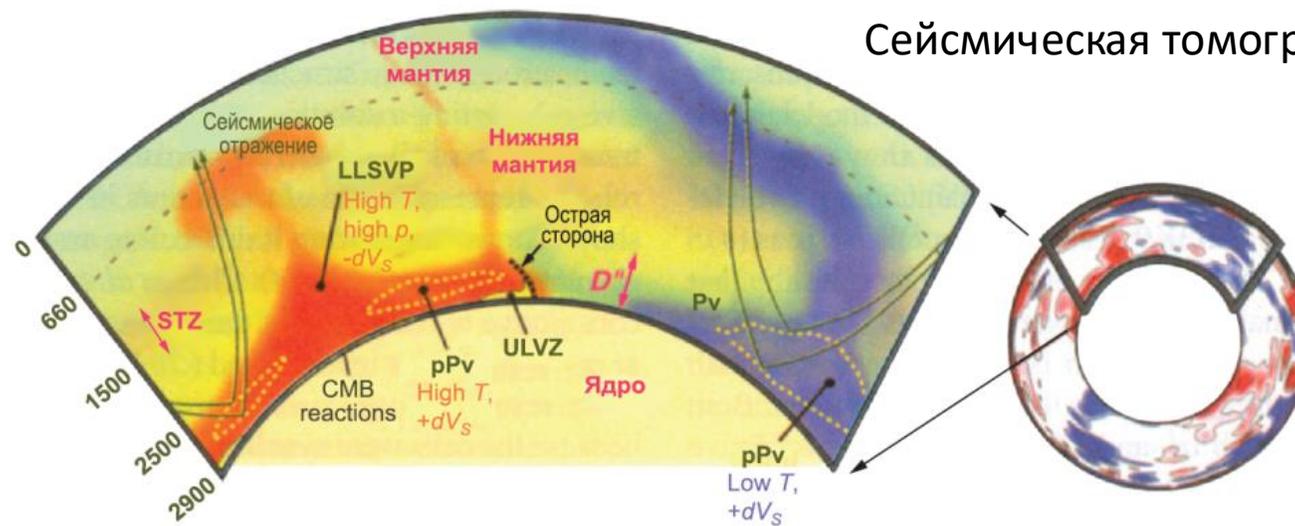


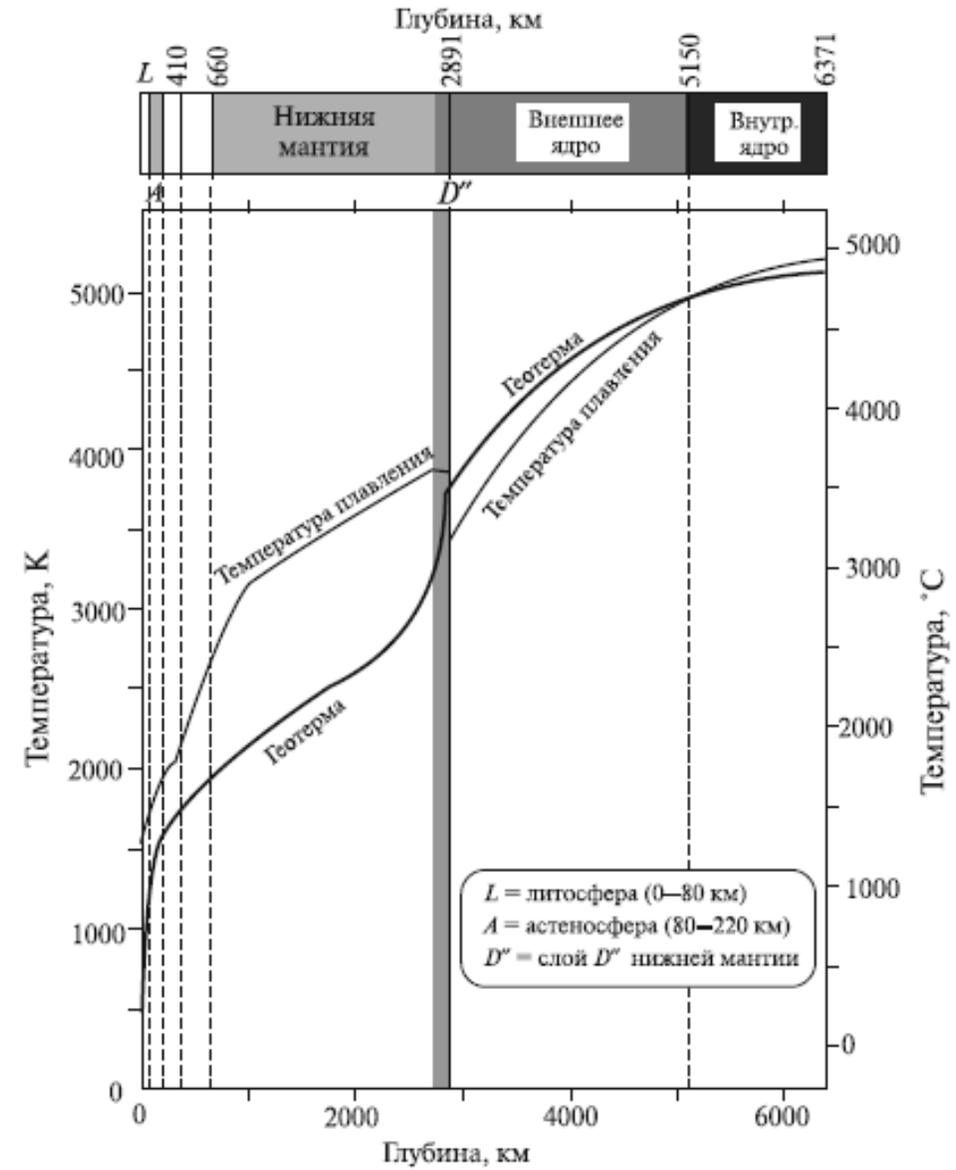
Рис. 65. Изображение, полученное методом сейсмической томографии [Ritsema et al., 2004] зон больших и малых вариаций скоростей поперечных волн в мантии Земли (си-

Профиль температуры (геотерма) с учетом конвекции

- Эффективность конвекции – число Нуссельта:

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

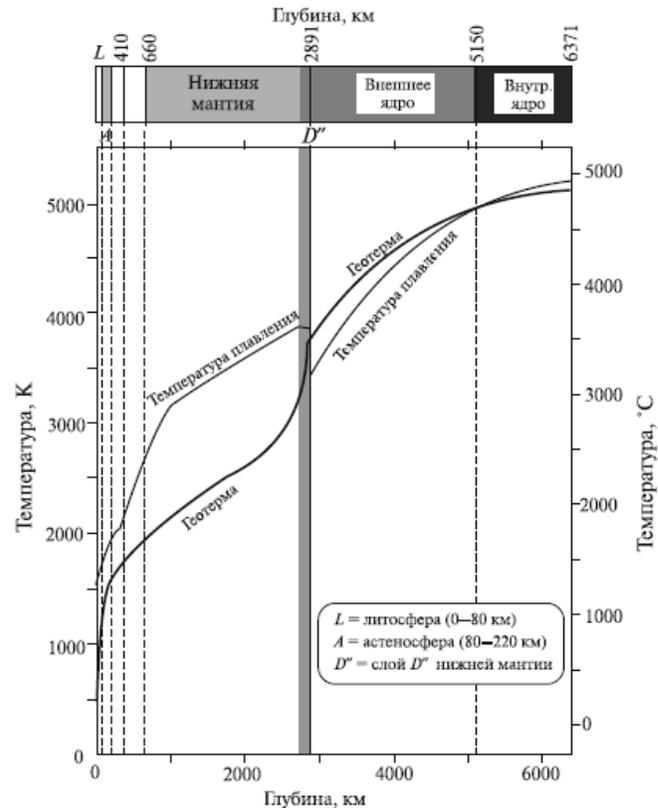
- В мантии: $Nu \sim 10 - 20$



Средняя температура Земли:
примерно 3300 К

Баланс тепла Земли

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



Средняя температура Земли: примерно 3300 К

«Приход»

Источник тепла	Количество, град.
Солнце: разогрев протопланетного вещества	300
Гравитационная энергия: аккреция	1300
адиабатическое сжатие	900
Распад радиоактивных элементов в веществе Земли	1800
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, $\tau=4.6$ млрд лет (возраст Земли)

$$\Delta T \approx 1000 \text{ градусов}$$

$$\text{Баланс: } 4300 - 1000 = 3300$$

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



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**

Физика Земли

- Сейсмология и строение Земли
 - Основной инструмент исследования строения Земли
 - Физическая (механическая) модель Земли
- Очаг землетрясения и сейсмичность Земли
 - Землетрясение с точки зрения физики
 - Проблема прогноза землетрясений
- Гравитационное поле и фигура Земли (продолжение)
 - Сила тяжести – основная движущая сила
 - Форма Земли
- Геотермия и энергия процессов в Земле
 - Основная энергетика Земли
- **Магнитное поле Земли**
 - **Магнитогидродинамика в ядре Земли**
 - **«Измеритель» движений литосферы в геологическом масштабе времени**

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 (изопоры),

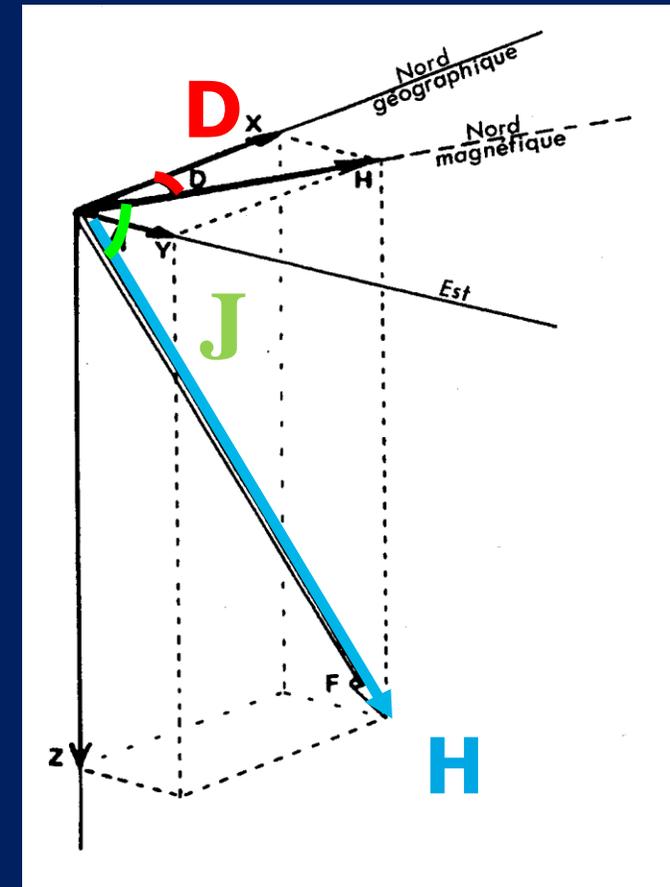
D – склонение (изогоны), J – наклонение (изоклины)

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

$$\operatorname{tg} D = \frac{H_y}{H_x};$$

$$\operatorname{tg} J = \frac{H_z}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}$$

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



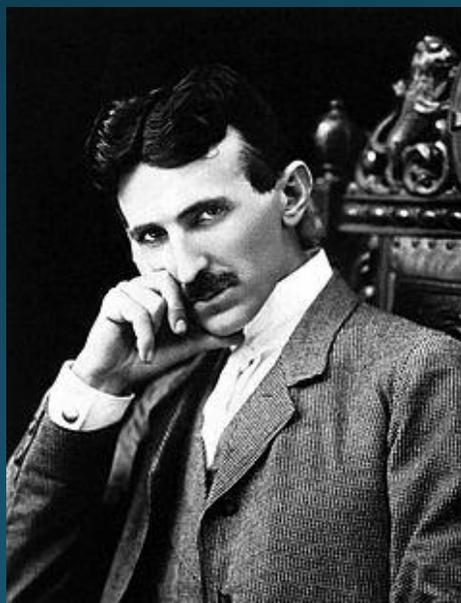
Величины и единицы

Ханс
Кристиан
Эрстед



1. Магнитная индукция – B (Тл, Тесла; Гс, Гаусс),
2. Напряженность – H (А/м, Э),
3. Намагниченность – I (А/м),
4. Магнитный момент – M (А*м²)

Никола
Тесла

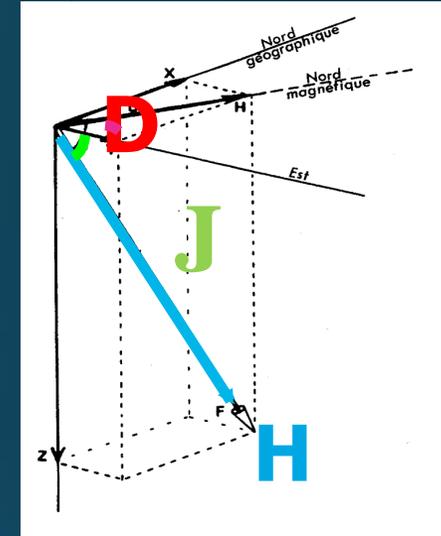
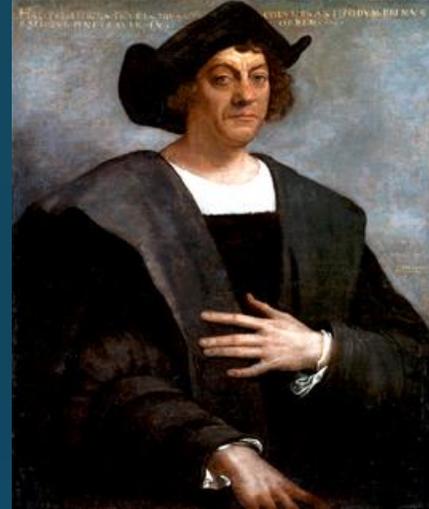


Соотношения единиц в системах СИ и СГСМ

Величина		СИ	СГСМ	Соотношение
Напряженность	H	1 А/м	1 Э	$1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э}$
Магнитная индукция	B	$1 \text{ Тл} =$ $= 1 \text{ Гн} \cdot \text{А/м}^2 =$ $= 1 \text{ кг}/(\text{А} \cdot \text{с}^2)$	1 Гс	$1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$
Намагниченность	I	1 А/м	1 ед. СГСМ/см ³	$1 \text{ А/м} = 10^{-3} \text{ ед. СГСМ/см}^3$
Магнитный момент	M	1 А·м ²	1 ед. СГСМ	$1 \text{ А} \cdot \text{м}^2 = 10^3 \text{ ед. СГСМ}$
Магнитный поток	Φ	$1 \text{ Вб} =$ $= 1 \text{ Гн} \cdot \text{А} =$ $= 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/(\text{А} \cdot \text{с}^2)$	1 Мкс	$1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ Мкс}$
Магнитная проницаемость вакуума	μ_0	$1 \text{ Гн/м} =$ $= 1 \text{ кг} \cdot \text{м}/(\text{А} \cdot \text{с}^2)$	1 ед. СГСМ	$1 \text{ Гн/м} = 10^7/4\pi \text{ СГСМ}$

История

- С XV века **Склонение D**
- 1492 - Христофор Колумб: $D = D(\theta, \phi)$
- 1544 - Георг Хартман: открытие Магнитного **Наклонения J**
- 1600 – Уильям Гильберт («О магните, магнитных телах и большом магните — Земле»)
1667 – Обсерватория в Париже
- 1759 М. В. Ломоносов «Рассуждение о большой точности морского пути»: точность компаса, Создание Обсерваторий
- 1832 - Карл Фридрих Гаус (Gauss) Измерил напряженность магнитного поля Земли **H**



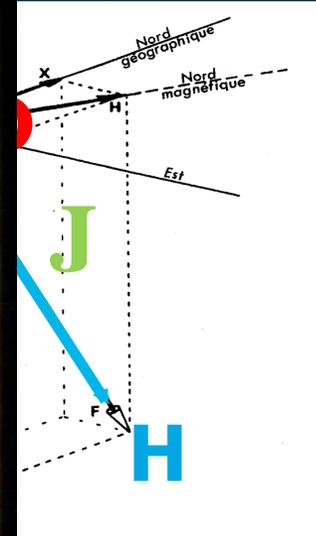
История

- С XV века **Скандинавия**
- 1492 - Христофор Колумб
- 1544 - Георгий Брелонд
- Магнитного **Н**
- 1600 – Уильям Гильберт («О магнитных телах Земли»)
- 1667 – Обсерватория в Париже
- 1759 М. В. Ломоносов («О магнитном поле Земли»)
- 1832 - Карл Фридрих Гаусс («О магнитном поле Земли»)
- Измерил напряженность магнитного поля Земли **Н**

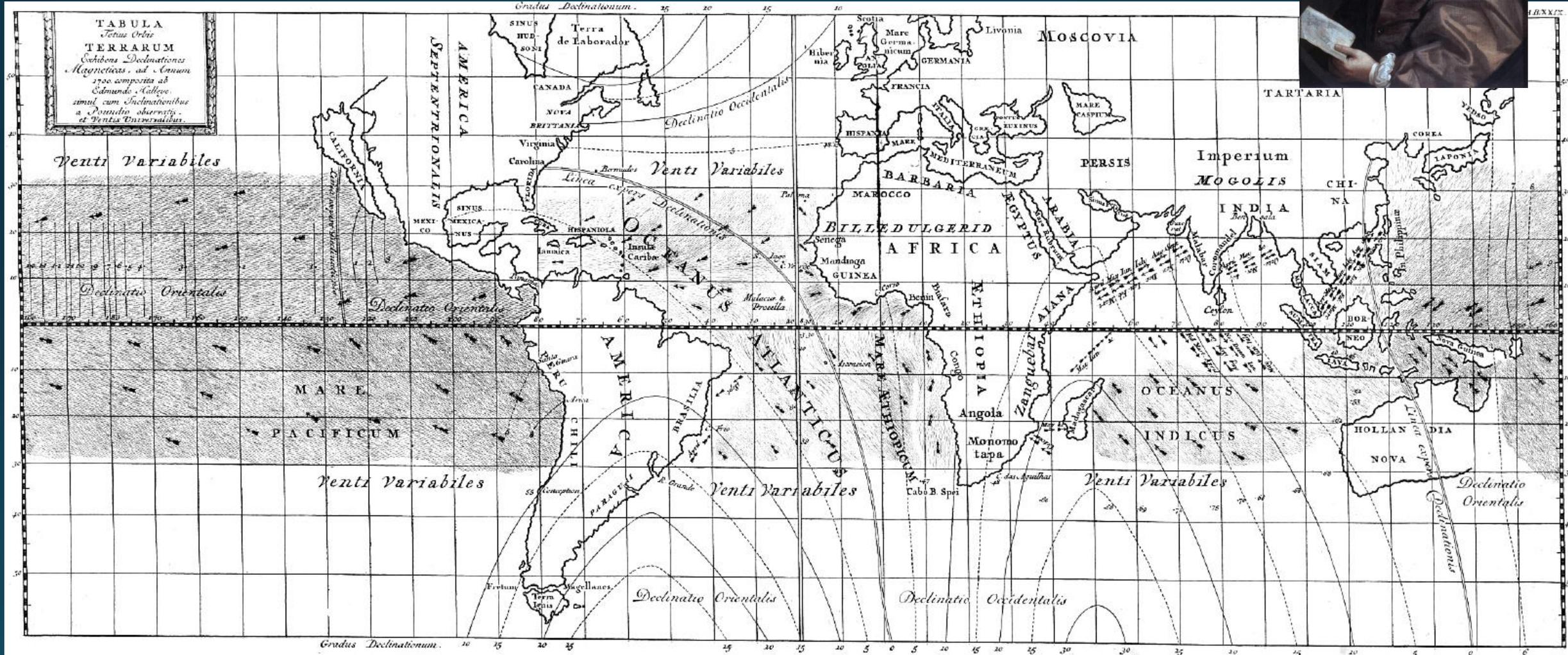
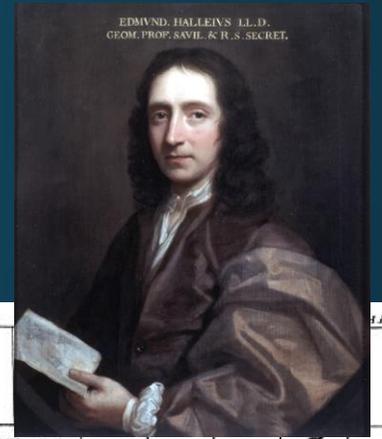


Уильям Гильберт демонстрирует магнит королеве Елизавете I в 1598 году

Физика твердой Земли. Геофизика, физфак МГУ, 2024



Карта магнитного поля Земли Галлея, 1701



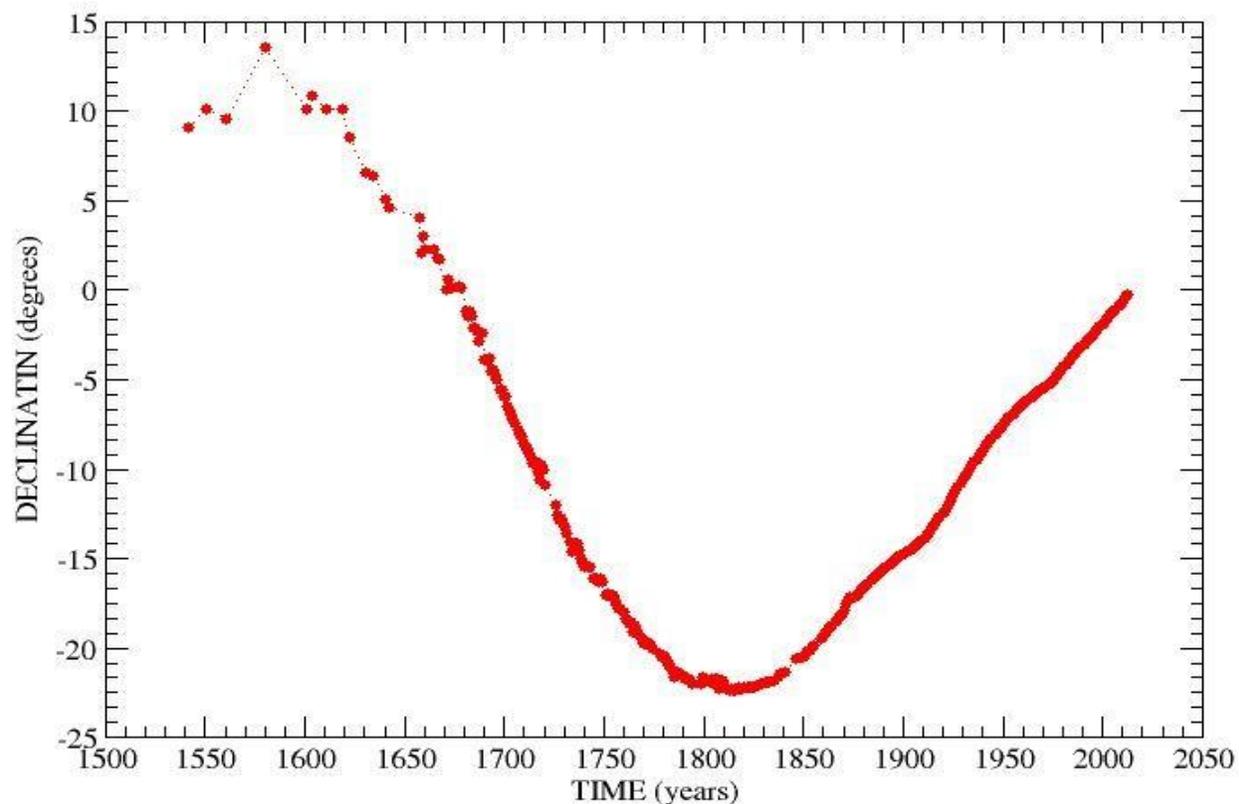
Инструментальные наблюдения МПЗ

- 1667 – Обсерватория в Париже

Магнитное склонение

- Измерения:

- СКЛОНЕНИЕ 1541
- НАКЛОНЕНИЕ 1660



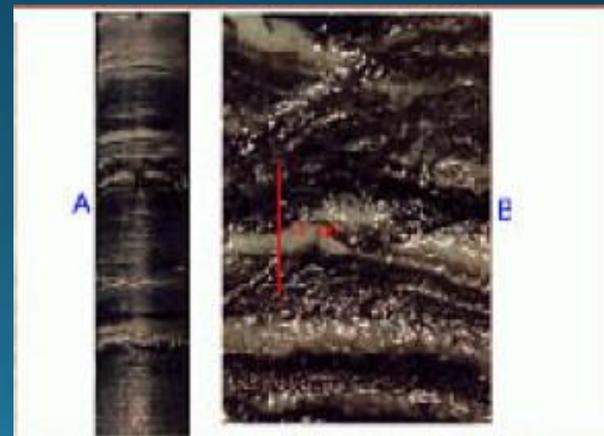
Принципы измерения магнитного поля

- **Феррозондовые** – Электромагнитная индукция. Измерение магнитного потока.
Чувствительность - 10 нТл
- **Протонные** - явления 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: 30-60 мкТл)

Геологический масштаб времени: Остаточная намагниченность

- Археология
- Вулканическая лава
- * Образцы из литосферы



Магнитное поле Земли в геологическом масштабе времени

Ucheny Sovet IFZ 2021 10

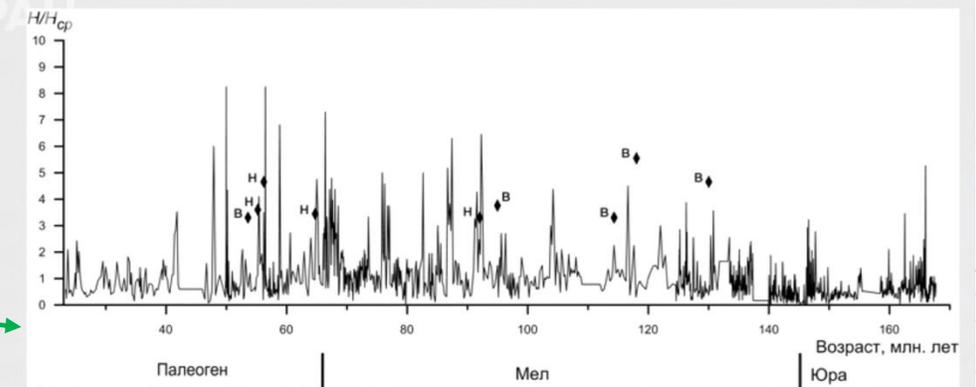
jitsi.ifz.ru/Ucheny_sovet_IFZ_2021_10_20

Задача исследования поведения геомагнитного поля в геологическом прошлом
проведение постоянного **мониторинга** и анализа мировой базы данных (МБД) по палеонапряжённости и её непрерывное наполнение новыми надёжными определениями палеонапряжённости

PHANEROZOIC **PRECAMBRIAN**

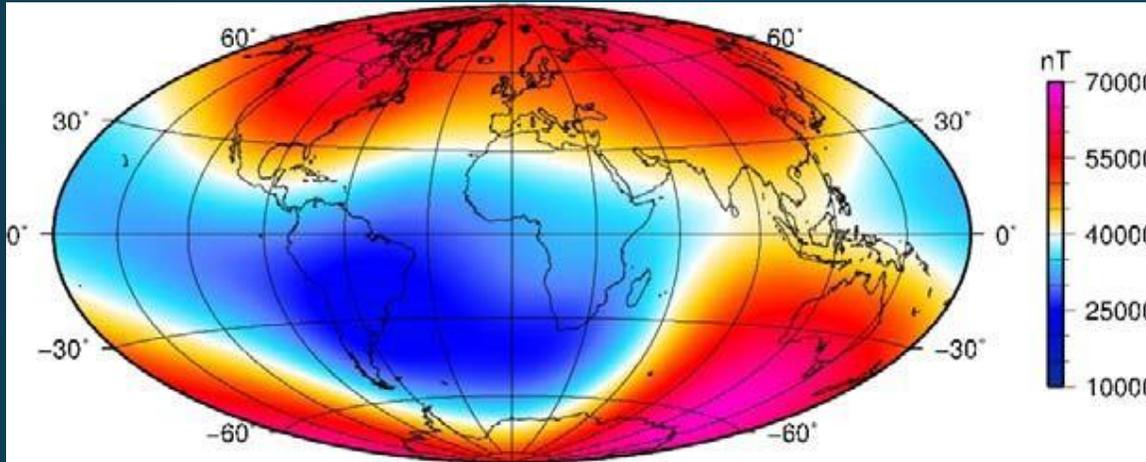
Изменение VDM: в интервале (0+542) млн лет (1160 определений VDM/VADM), в интервале (542+3500) млн лет (106 определений VDM). Чёрная кривая отвечает усреднению между соседними точками с окном в 7 точек.

В 2017-2021 гг. в Базу внесено более 200 новых определений палеонапряженности - по публикациям, вышедшим из печати в 2016-2021 гг., добавлены определения из работ 2012-2015 гг. На настоящий момент МБД содержит определения VDM из 364 источников. Всего записей в Базе - 4733. Записей, содержащих значения VDM/VADM - 4591, из них фанерозой - 4294 определений VDM/VADM, докембрий - 297 определений VDM/VADM. Отбор по критериям: фанерозой - 1160 определений VDM/VADM, докембрий - 106 определений VDM/VADM. БД BOROKPINT помещена для свободного скачивания на сайт ГО «Борок» ИФЗ РАН <http://www.brk.adm.yar.ru/palmag/index.html>.

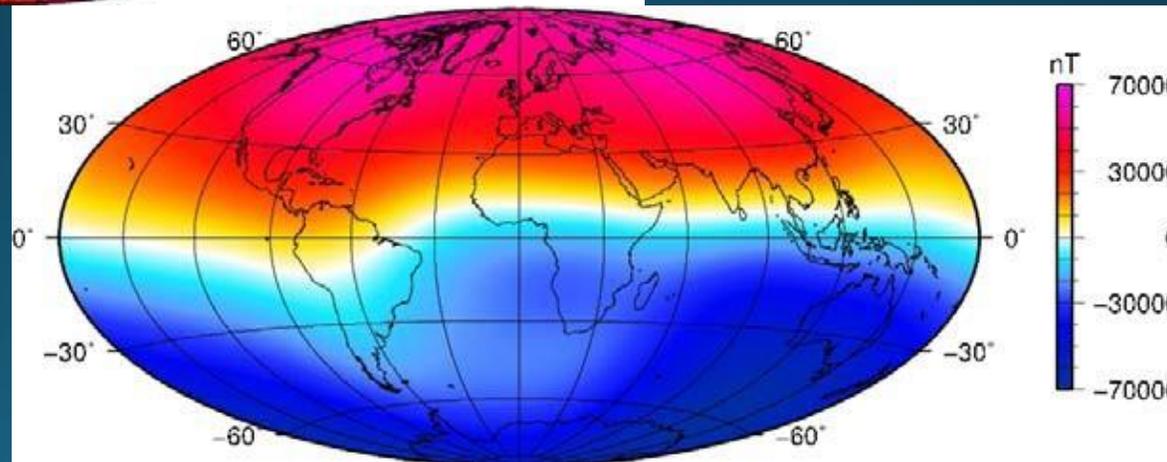


Поведение палеонапряженности по осадочным породам в интервале 167–23 млн. лет из [Куражковский и др., 2019a], ромбами обозначены всплески палеонапряженности по термонамагнитным породам из PINT (2015.05). Виртуальная палеоширотная локализация термонамагнитных пород, фиксирующих всплески палеонапряженности. Высокоширотная и низкоширотная локализация обозначена, соответственно буквами (в) и (н)

Магнитное поле Земли



Полное поле (B)



Вертикальная составляющая(-B_r)

Структура магнитного поля Земли



Наблюдения за магнитным полем

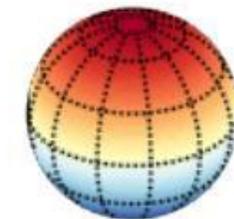
Геомагнитный потенциал:

- Разложение потенциала по сферическим гармоникам

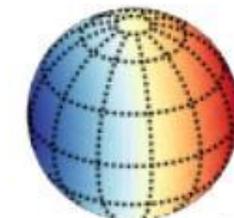
$$V(r, \theta, \varphi) = R_3 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_3}{r} \right)^{n+1} (g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi) P_n^m(\cos \theta)$$

Потенциал \rightarrow векторное поле напряженности

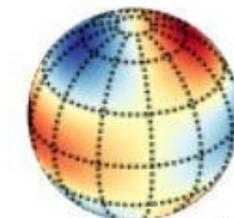
$$\nabla V(x, y, z) \rightarrow \left\{ \frac{dV(x, y, z)}{dx}, \frac{dV(x, y, z)}{dy}, \frac{dV(x, y, z)}{dz} \right\}$$



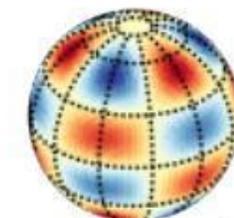
$m = 0, n = 1$



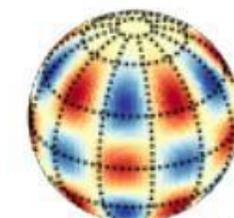
$m = 1, n = 2$



$m = 2, n = 2$



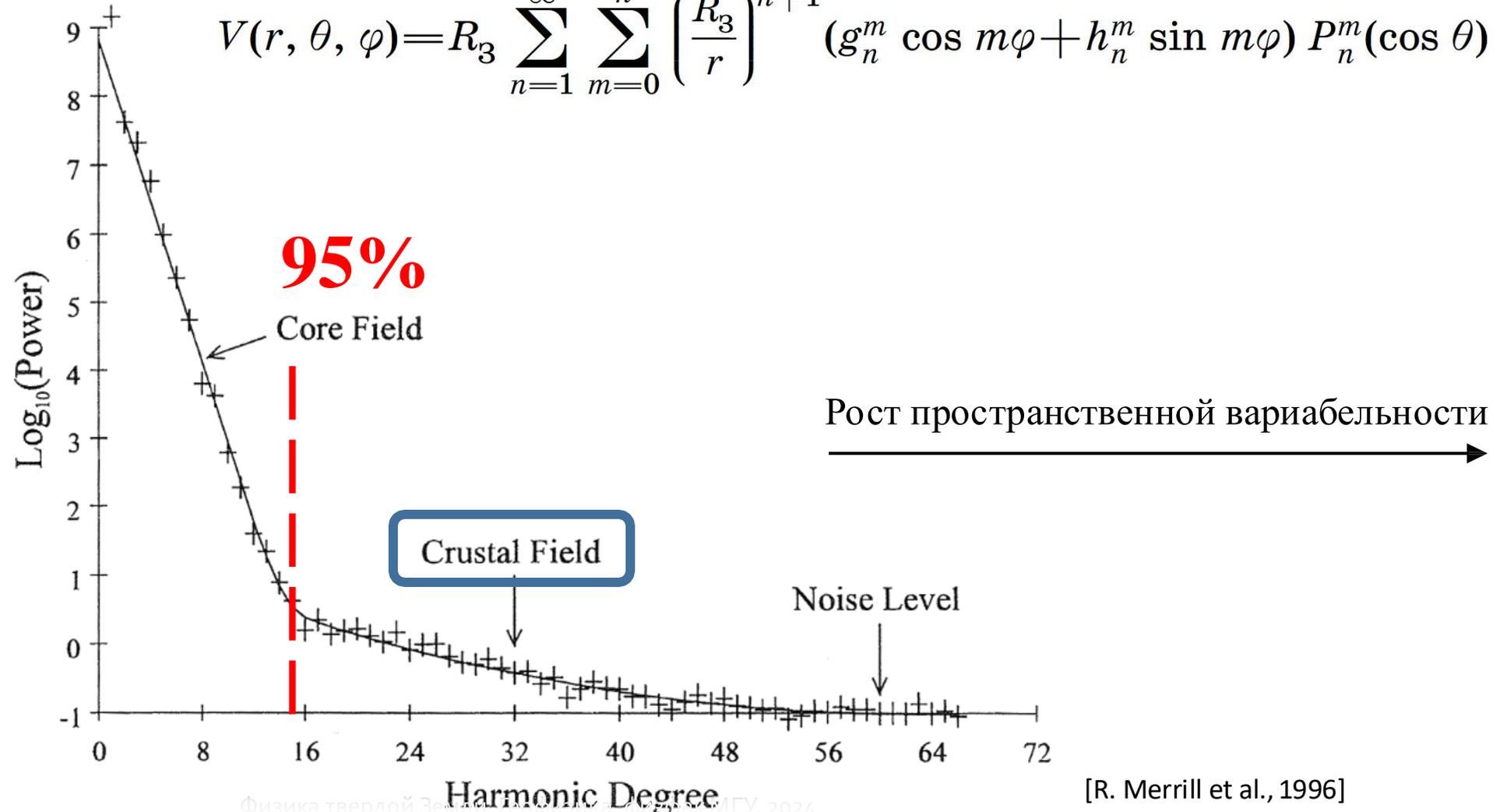
$m = 4, n = 5$



$m = 6, n = 10$

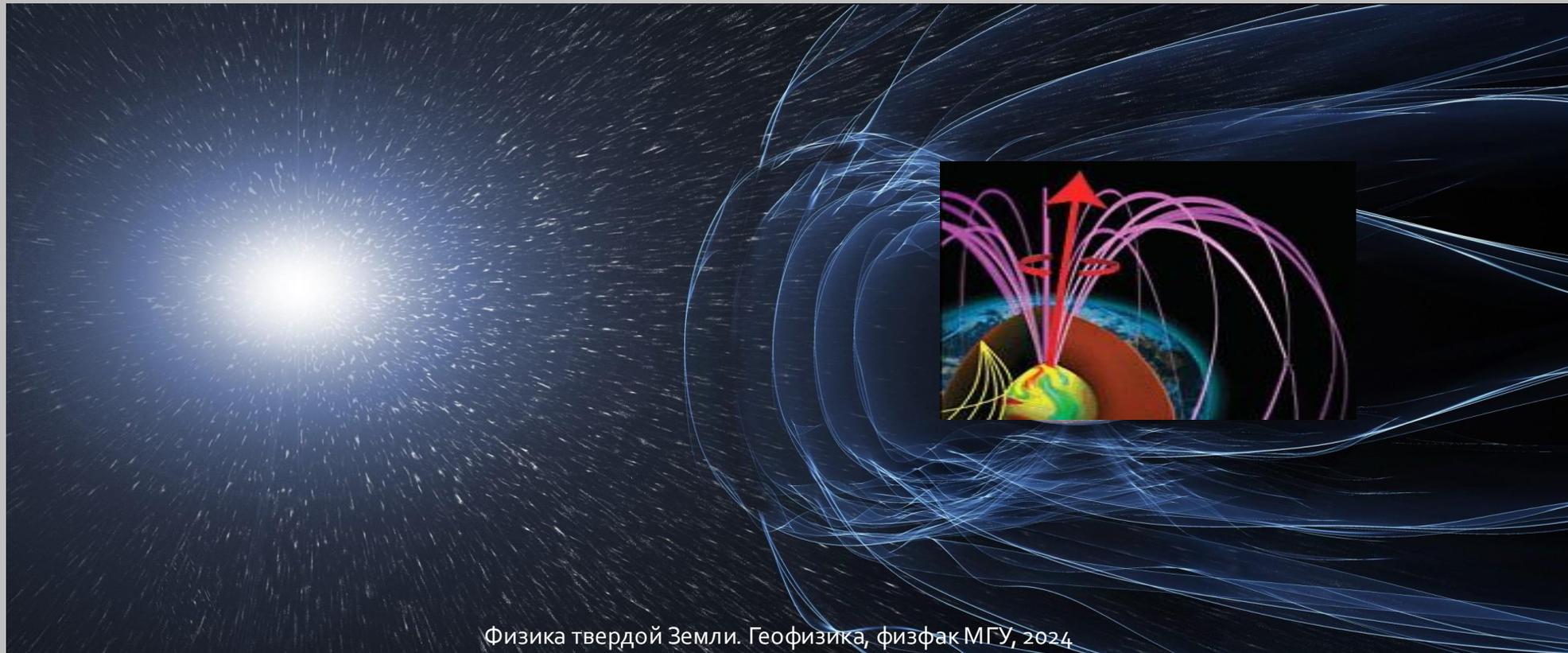
Пространственный спектр магнитного поля на поверхности Земли

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



Наблюдаемое магнитное поле

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



Источники

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

Внешнее
ядро

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

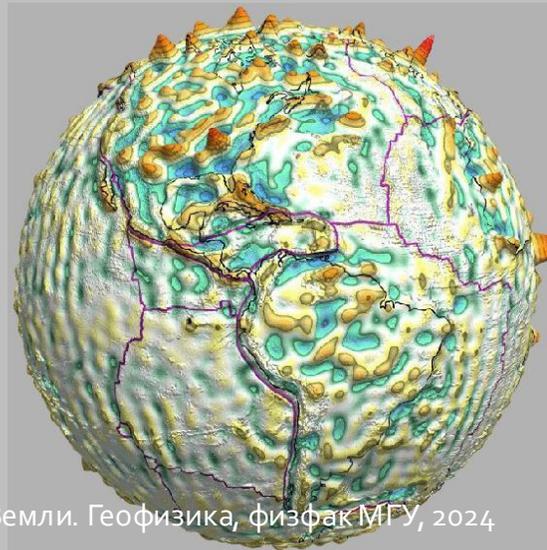


Источники

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

Земная
кора

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



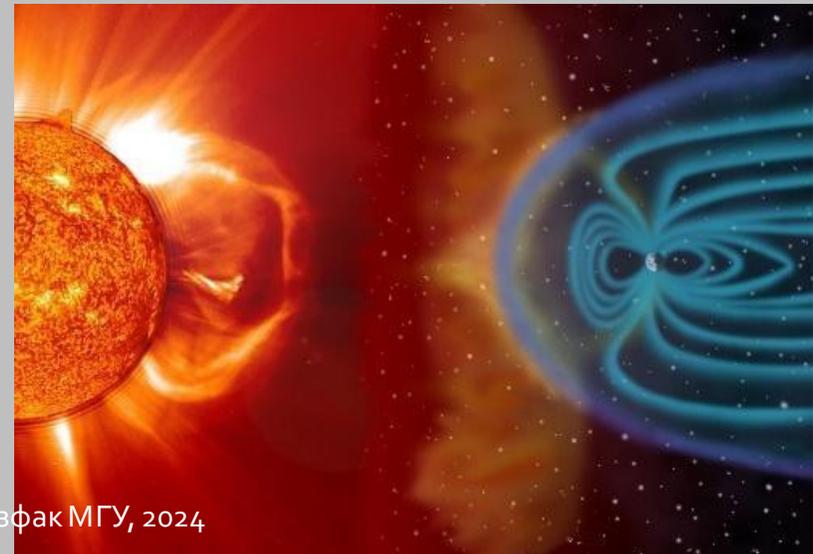
СОСТАВЛЯЮЩИЕ МПЗ

Источники

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

Ионосфера,
магнитосфера

Электромагнитное поле
с источниками в
околоземном
пространстве - 1%



Генерация главного магнитного поля (ГМП) Земли

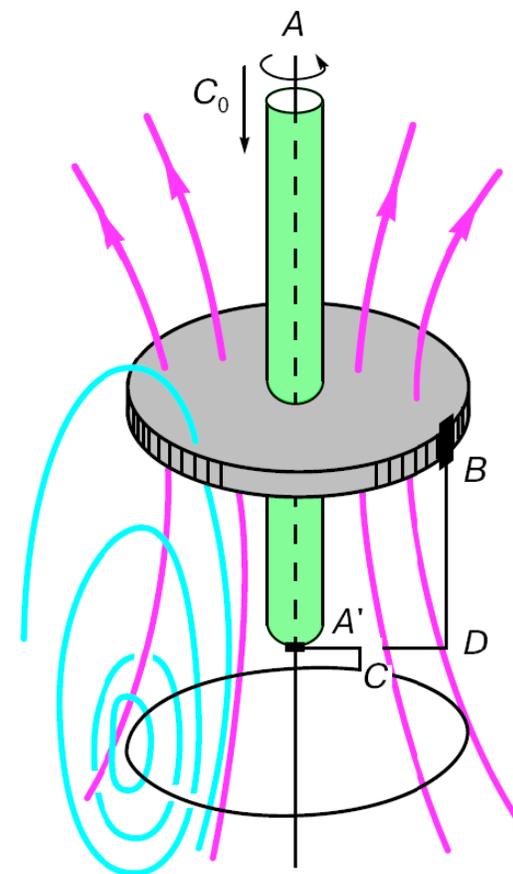
ГМП генерируется движениями проводящей жидкости во внешнем ядре Земли

- 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 $Ra_{тб}$. 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 **самоподдерживающееся динамо**.

Модель магнитного гидродинамо

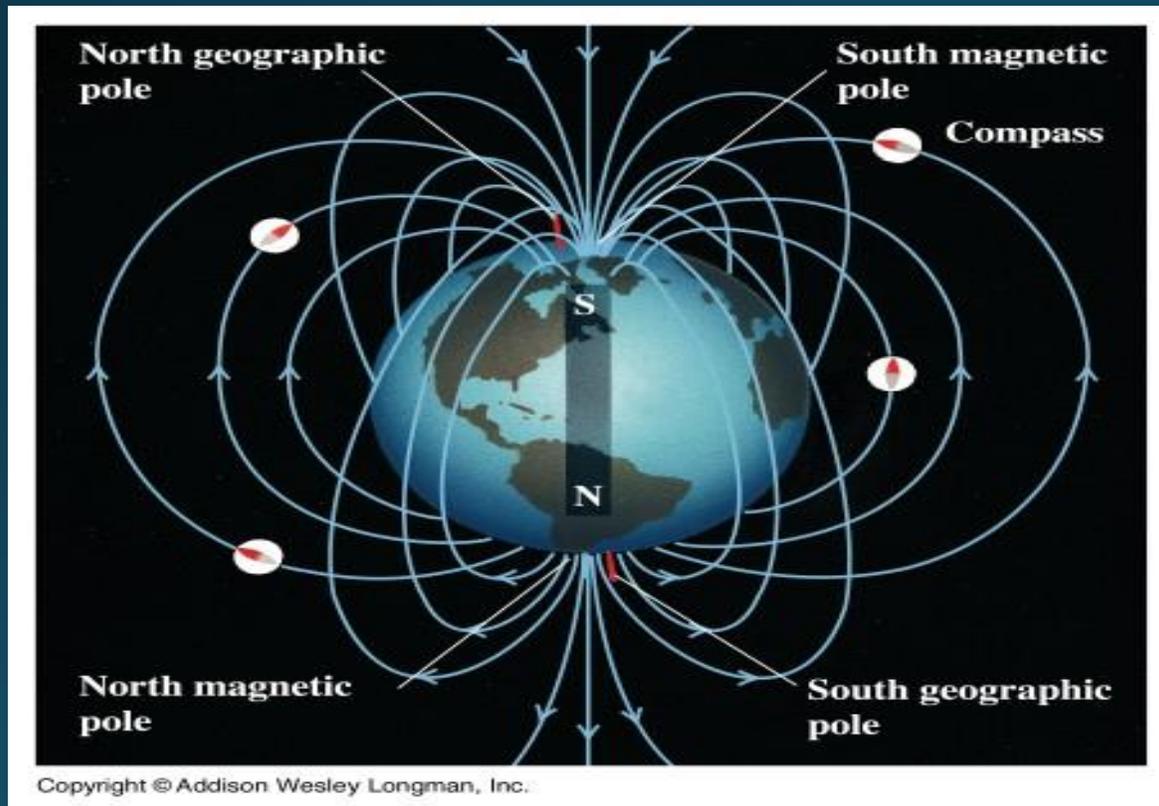
- Наличие жидкого внешнего ядра и конвективных потоков вещества в нем
- Для запуска процесса необходимо наличие хотя бы очень слабого магнитного поля

- Лармор (1919), для объяснения магнетизма Солнца;
- В физику Земли идея введена Френкелем, Эльзассером (1940-е)



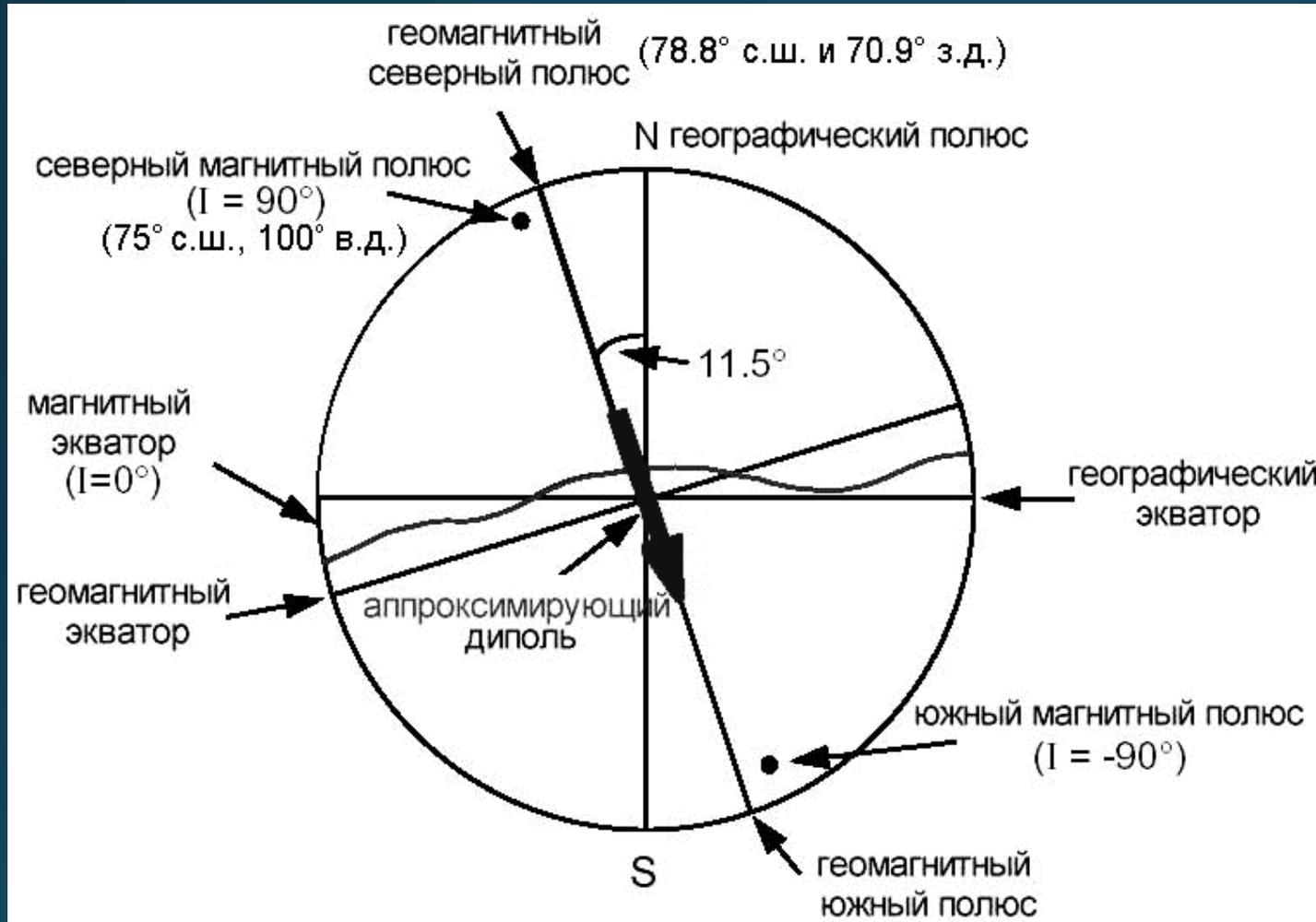
Дипольное поле

Главное магнитное поле представляет собой в первом приближении **диполь**



Возникновение главного магнитного поля Земли связано с турбулентным движением токов в жидком ядре.

Магнитный и геомагнитный полюса

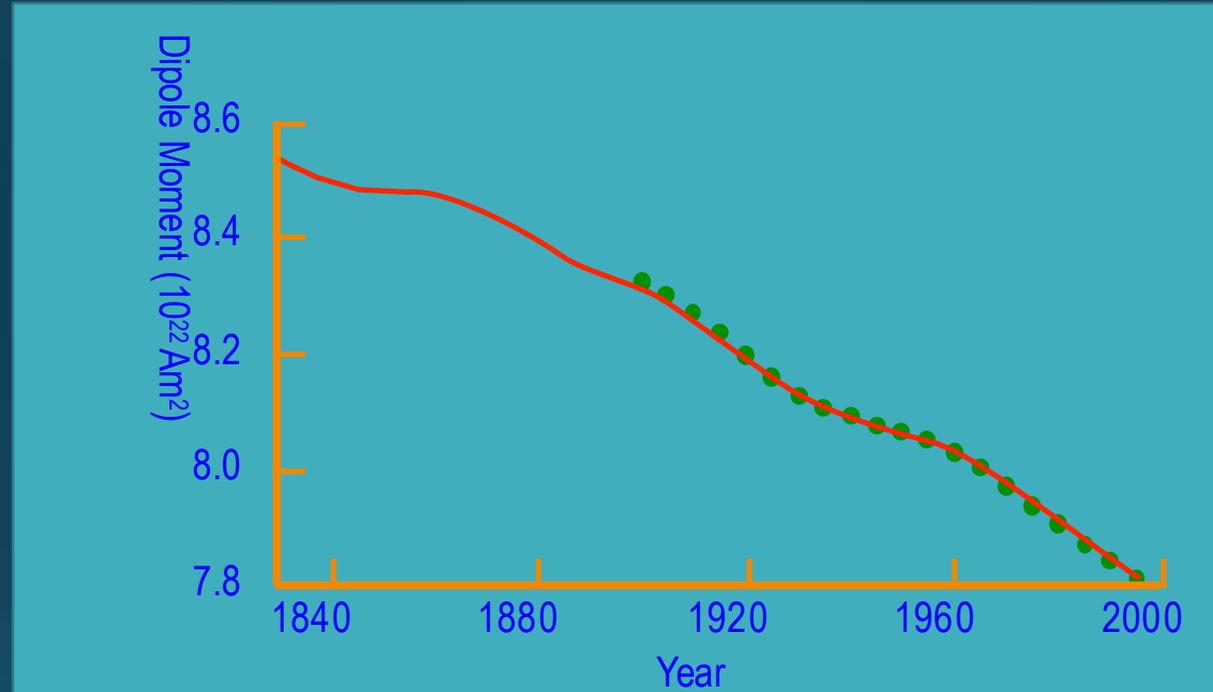


Магнитный полюс :
полное поле

Геомагнитный полюс:
аппроксимация
дипольным полем

**Аппроксимация геомагнитного поля полем наклоненного
эксцентрического диполя**

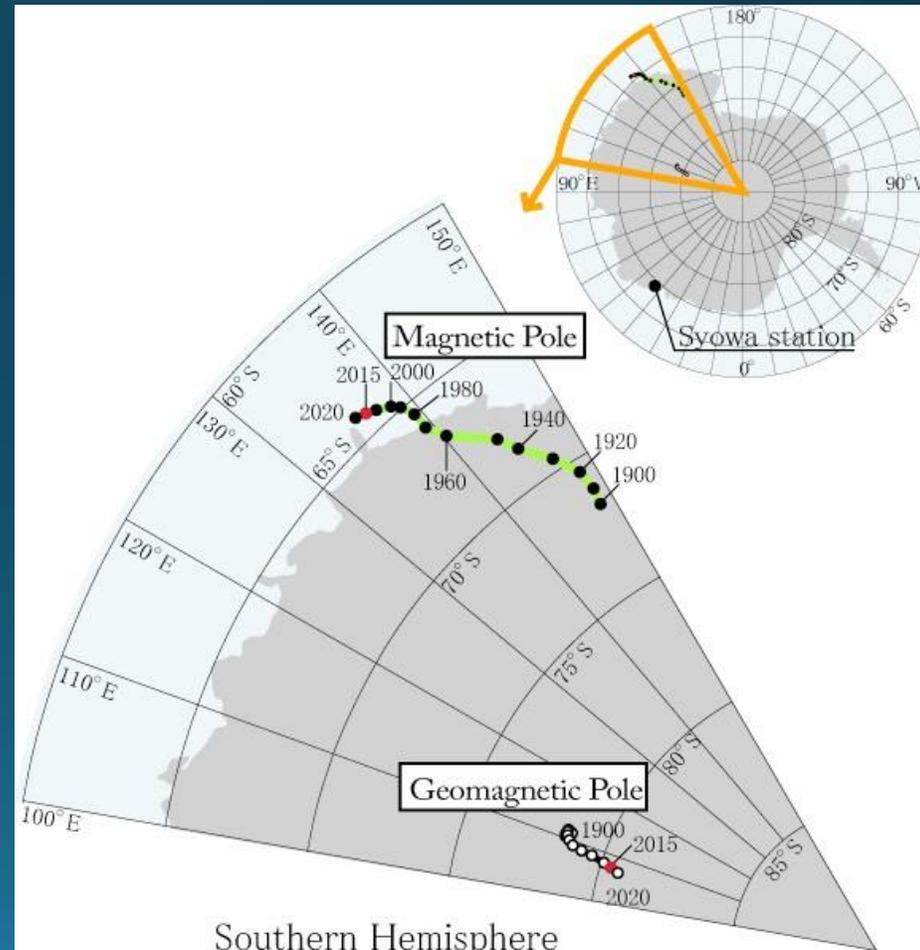
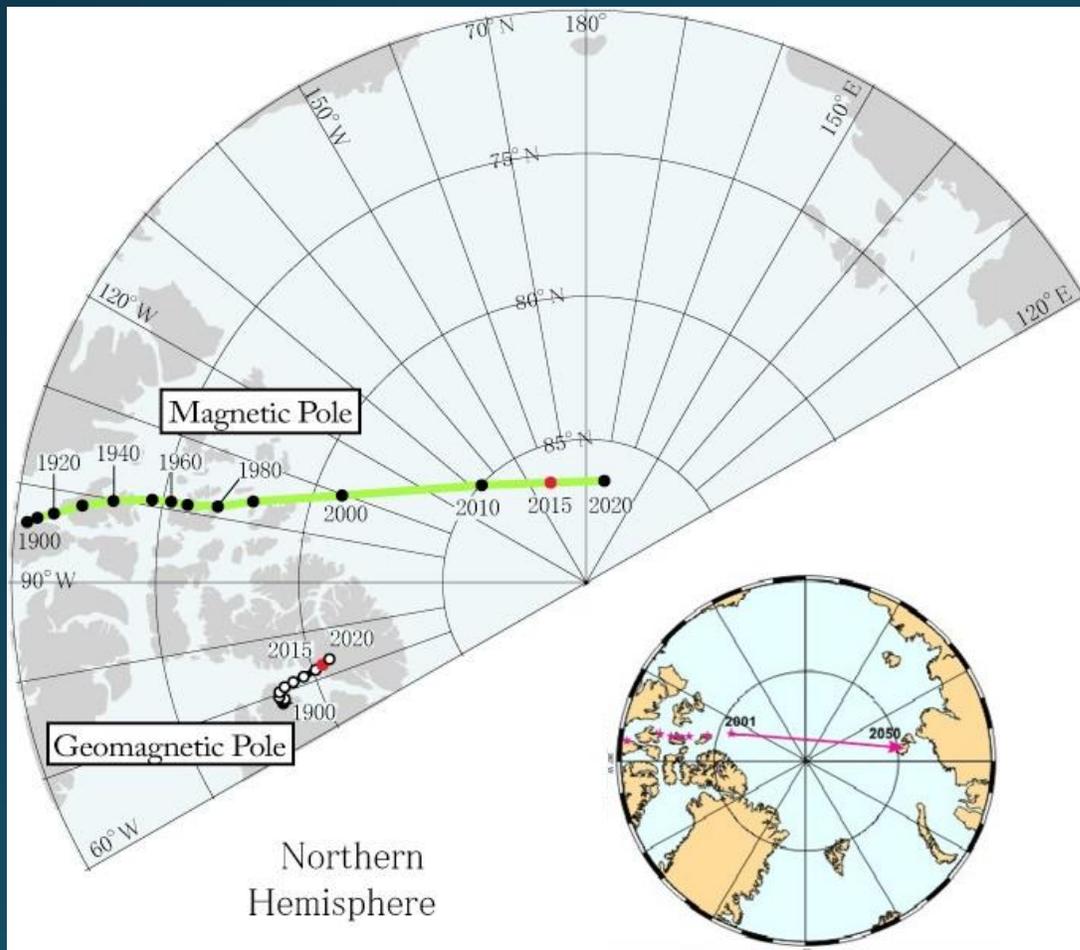
Уменьшение дипольного поля



Дипольное поле затухает на 5 - 6% за столетие

Дрейф полюсов

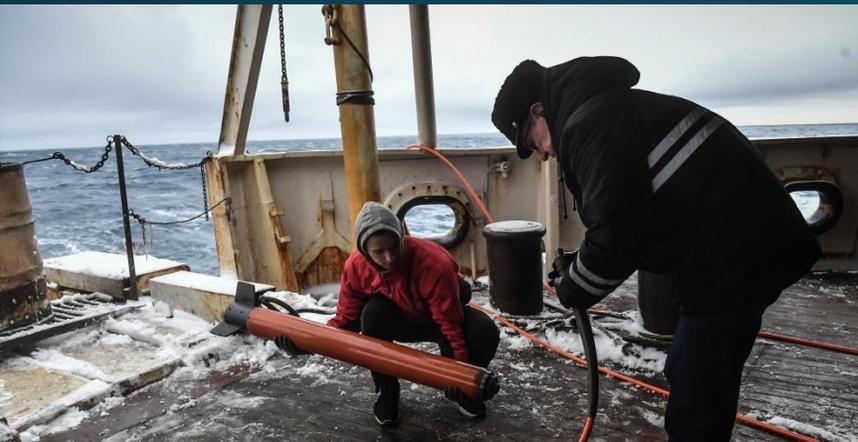
Магнитные полюса перемещаются в пространстве



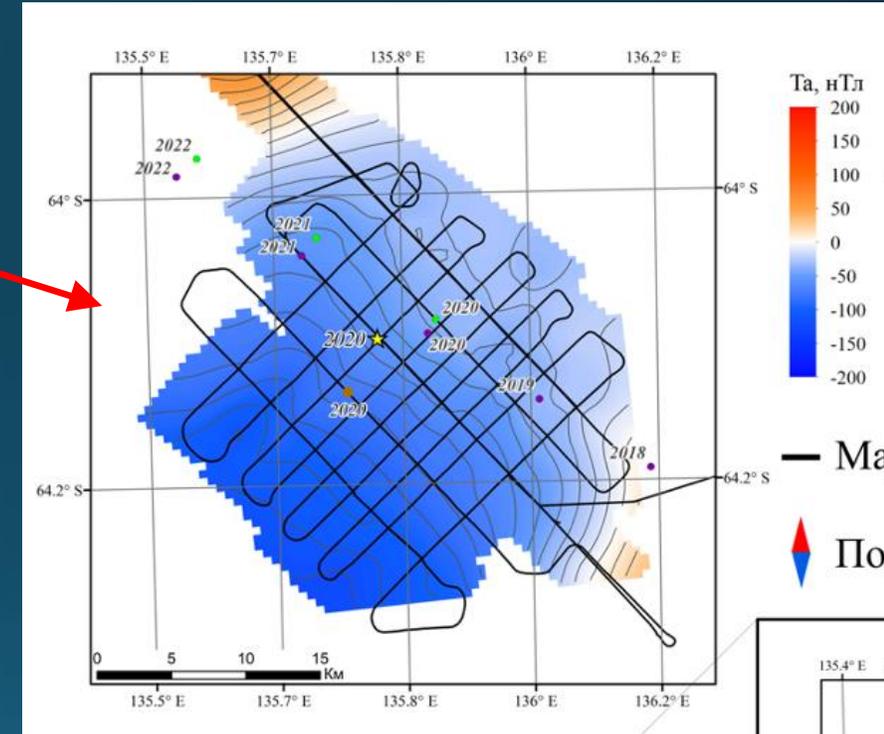
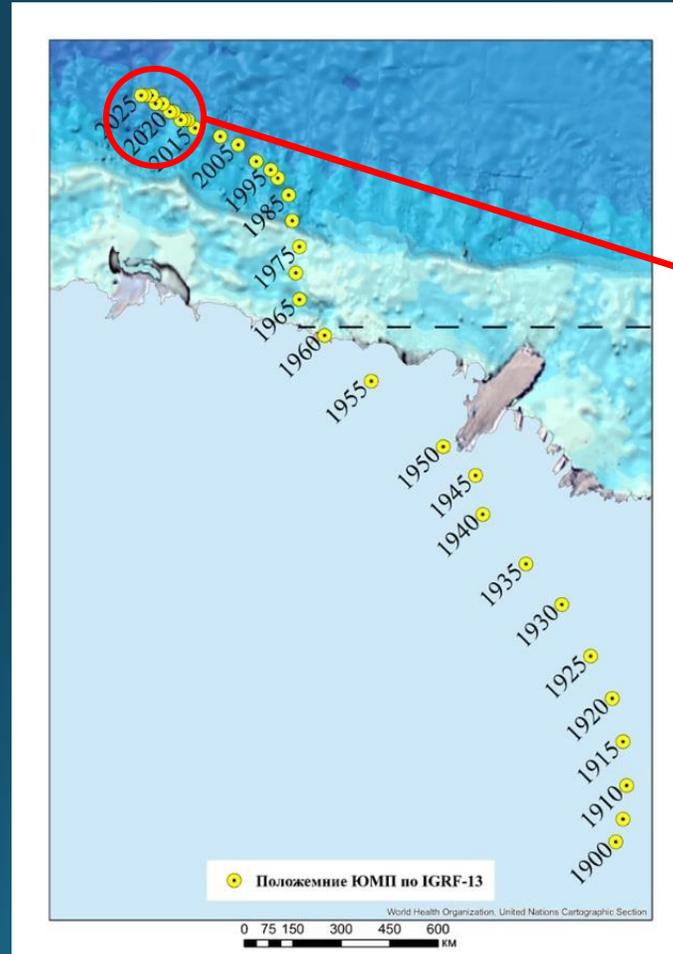


Инструментальное измерение положения ЮМП: 6-7 апреля 2020 г.

ОИС ВМФ РФ «Адмирал Владимирский»
у берегов Антарктиды, 2020 г.



Магистрант кафедры физики Земли
Илья Грушников готовит к спуску
протонный морской магнитометр

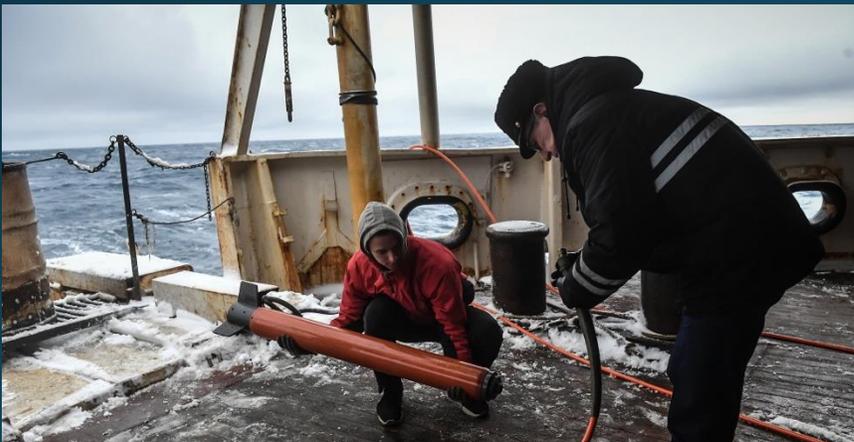


Магнитная съемка в море Дюрвиля
6-7 апреля 2020 г.



Инструментальное измерение положения ЮМП: 6-7 апреля 2020 г.

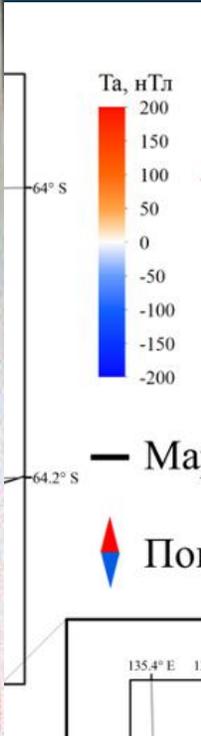
ОИС ВМФ РФ «Адмирал Владимирский»
у берегов Антарктиды, 2020 г.



Магистрант кафедры физики Земли
Илья Грушников готовит к спуску
протонный морской магнитометр



Физика твердой Земли. Геофизика, физфак МГУ, 2024



рвила



Специальная выездная практика кафедры физики Земли 2024

https://vk.com/geophys_ff?w=wall-191971968_844



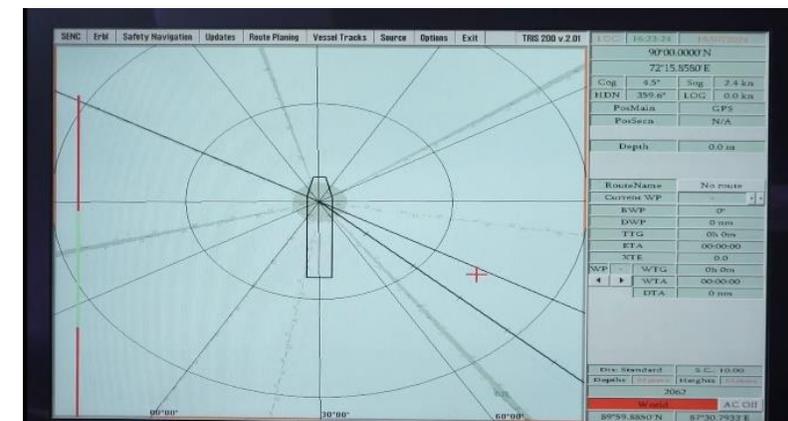
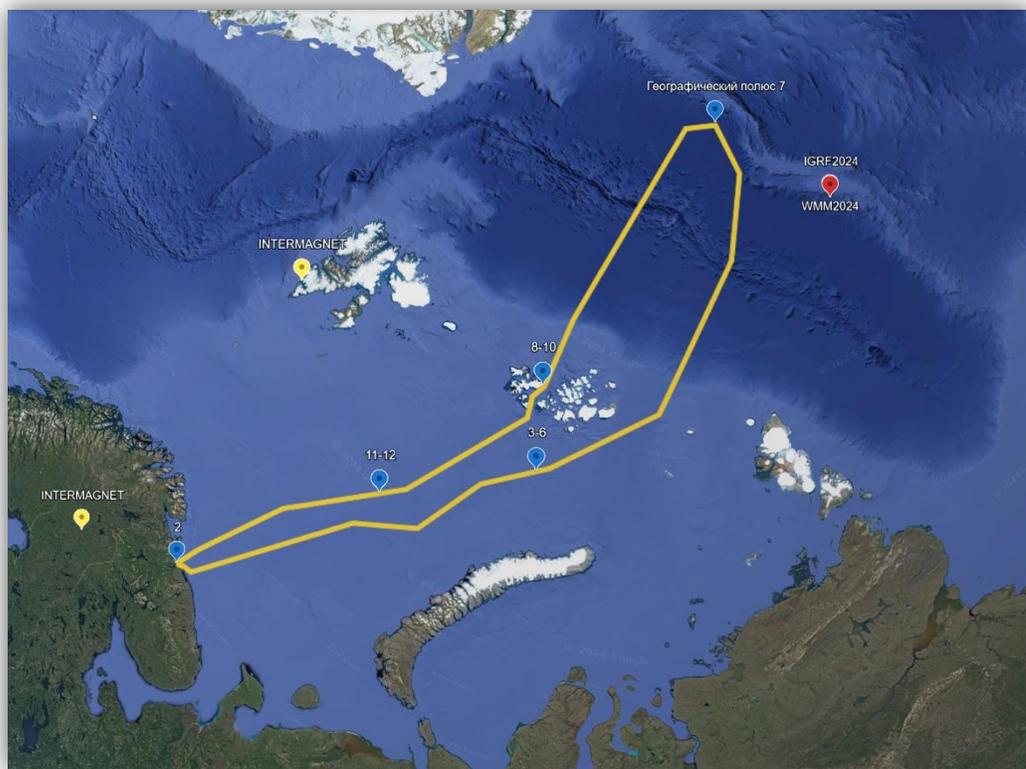
- **Экспедиция на Северный полюс на атомном ледоколе "50 лет Победы" 14-26.07.2024 г.**

- **Студент 4 курса кафедры физики Земли Алимов Николай**

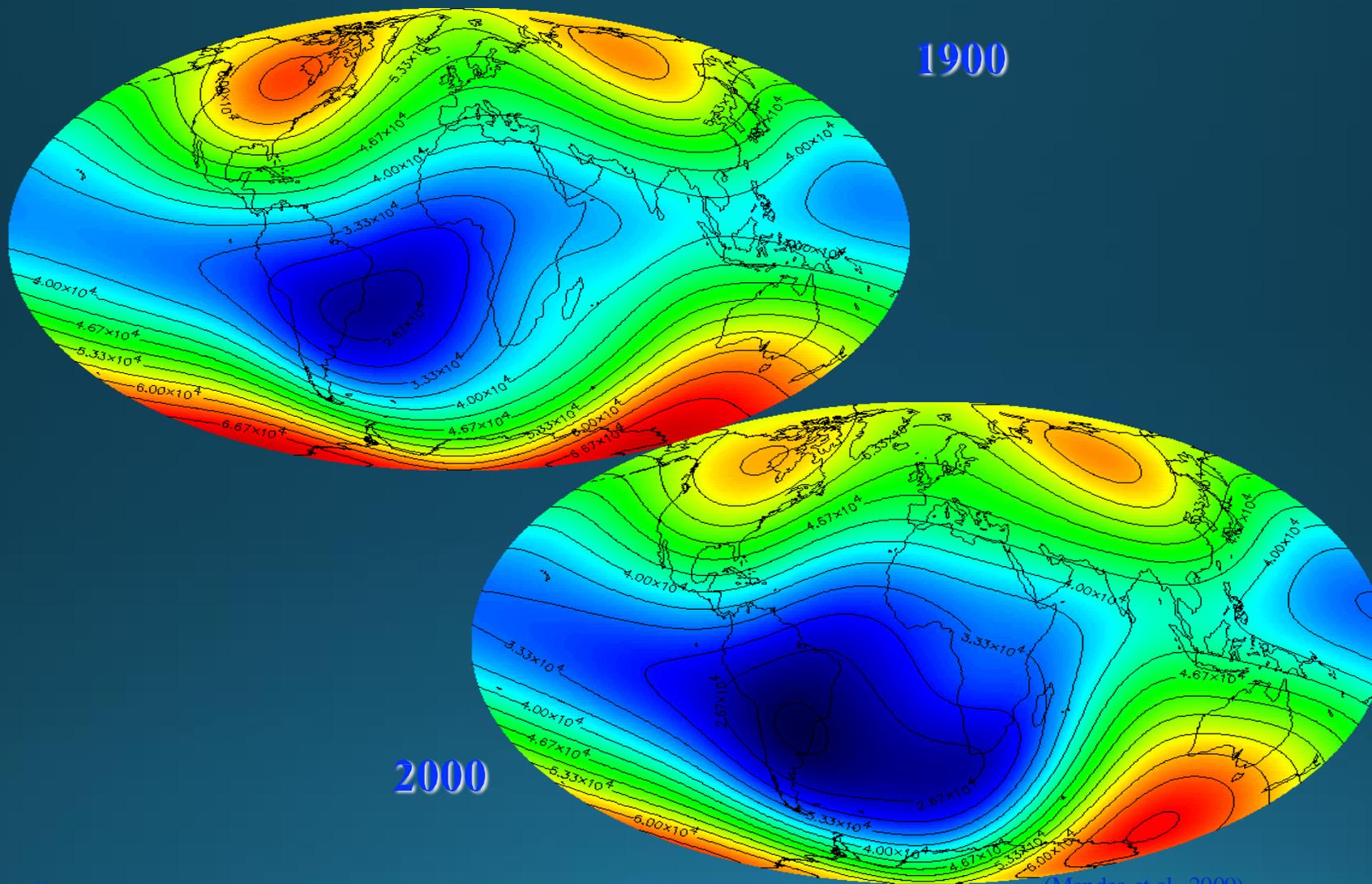
Научный руководитель – профессор кафедры В.Т.Минлигареев, зам. директора ИПГ Росгидромета

- С помощью навигационного оборудования атомного ледокола (компас, гироскоп, аппаратура ГНСС)

от 78° С.Ш. до географического полюса проведены измерения для **уточнения положения СМП** с целью верификации международных моделей МПЗ IGRF и WMM .



Изменение поля за 100 лет

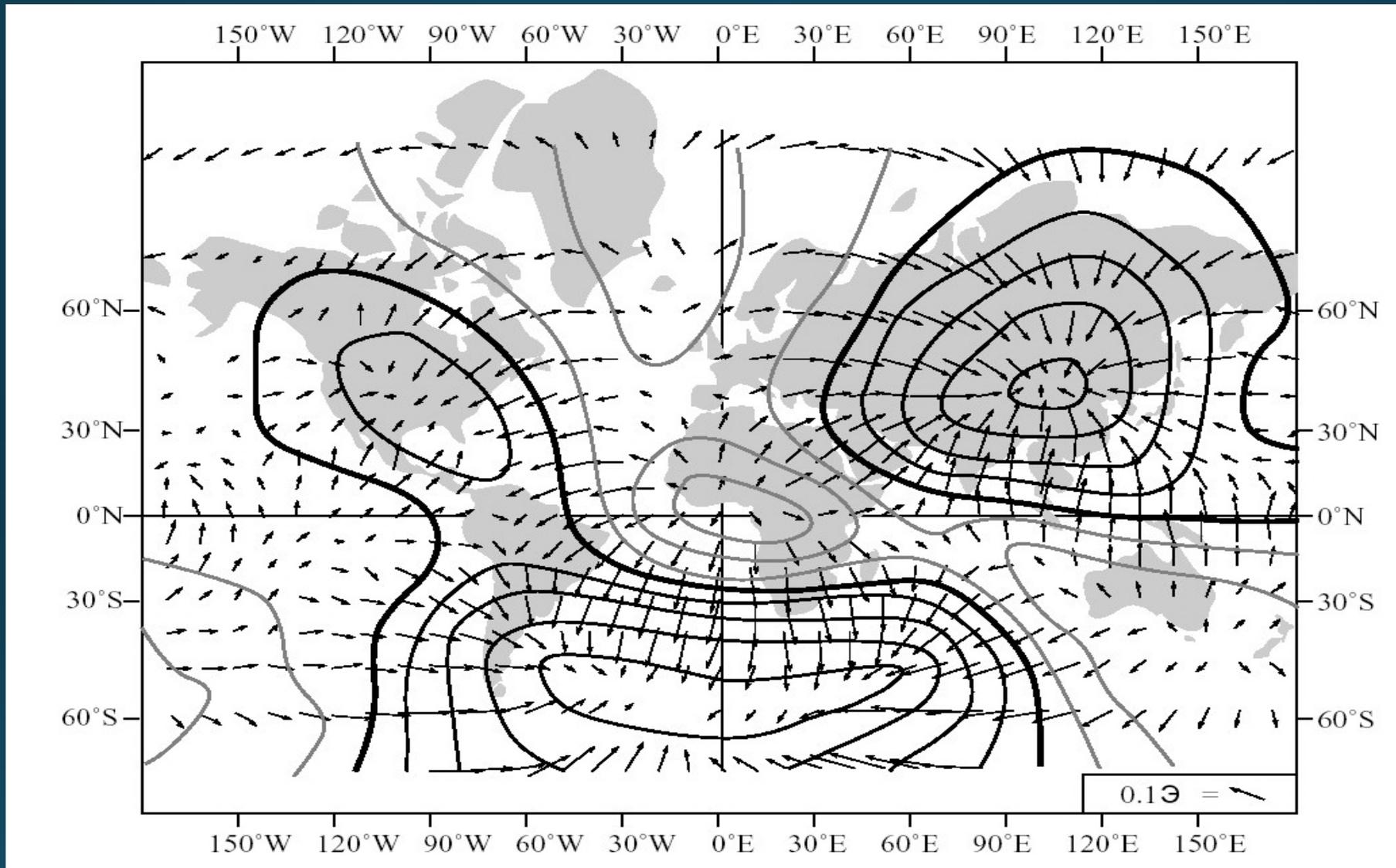


(Mandea et al., 2009)

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 наблюдаённого геомагнитного. Недипольное геомагнитное поле для эпохи 1945 г. представлено на следующем слайде.



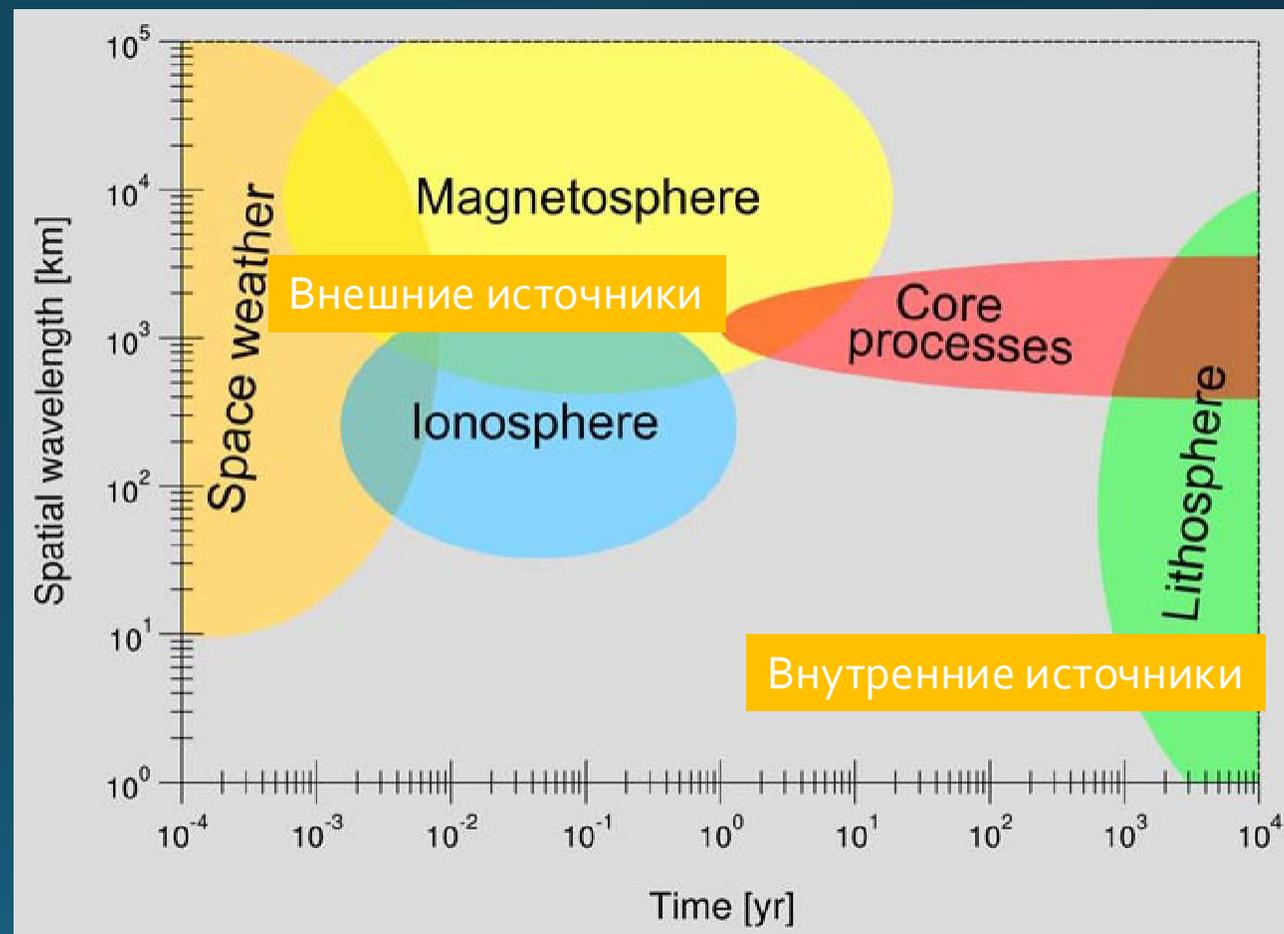
Недипольное геомагнитное поле для эпохи 1945 г. (т.н. «лицо клоуна»). Стрелки — горизонтальная компонента недипольного поля. Контуры соединяют точки с одинаковой величиной вертикальной компоненты недипольного поля, жирные линии — 0, тонкие черные линии — положительные значения (направление вниз), серые — 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 $0.2^\circ/\text{год}$.

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

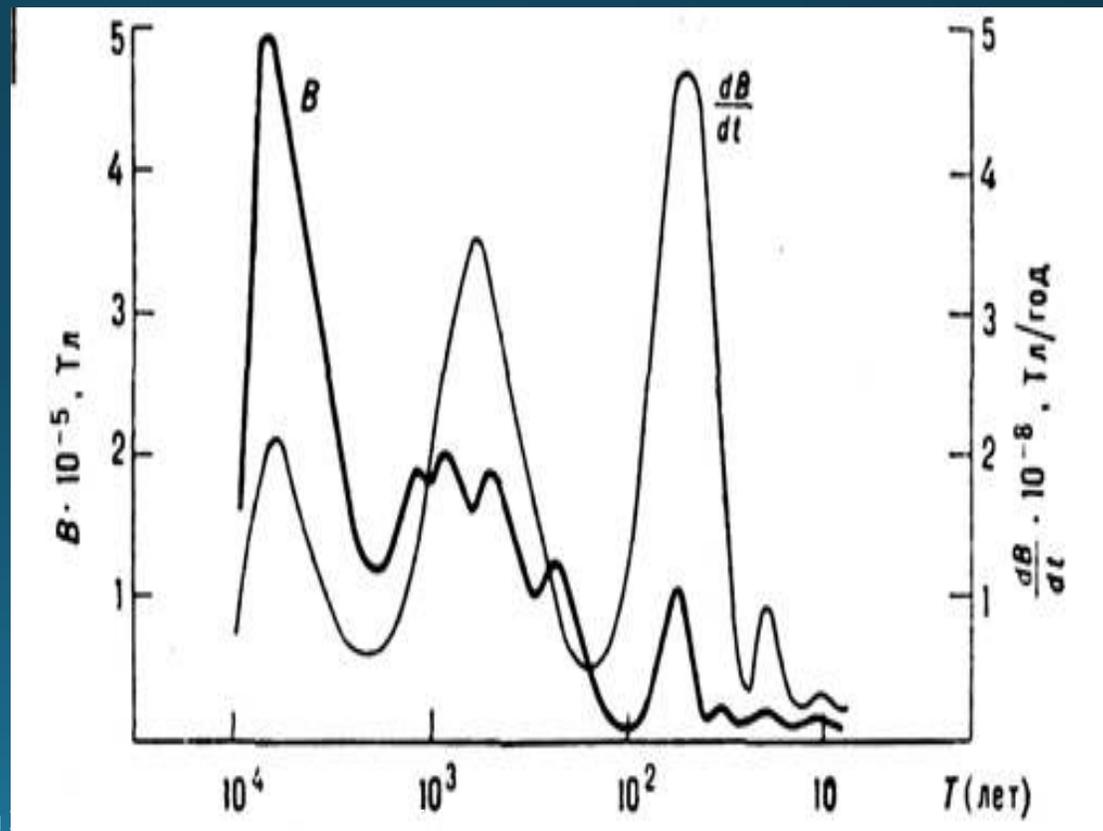
Периоды от 10 до 10 000 лет.

Максимумы: 7000 лет, 600лет, 60 лет

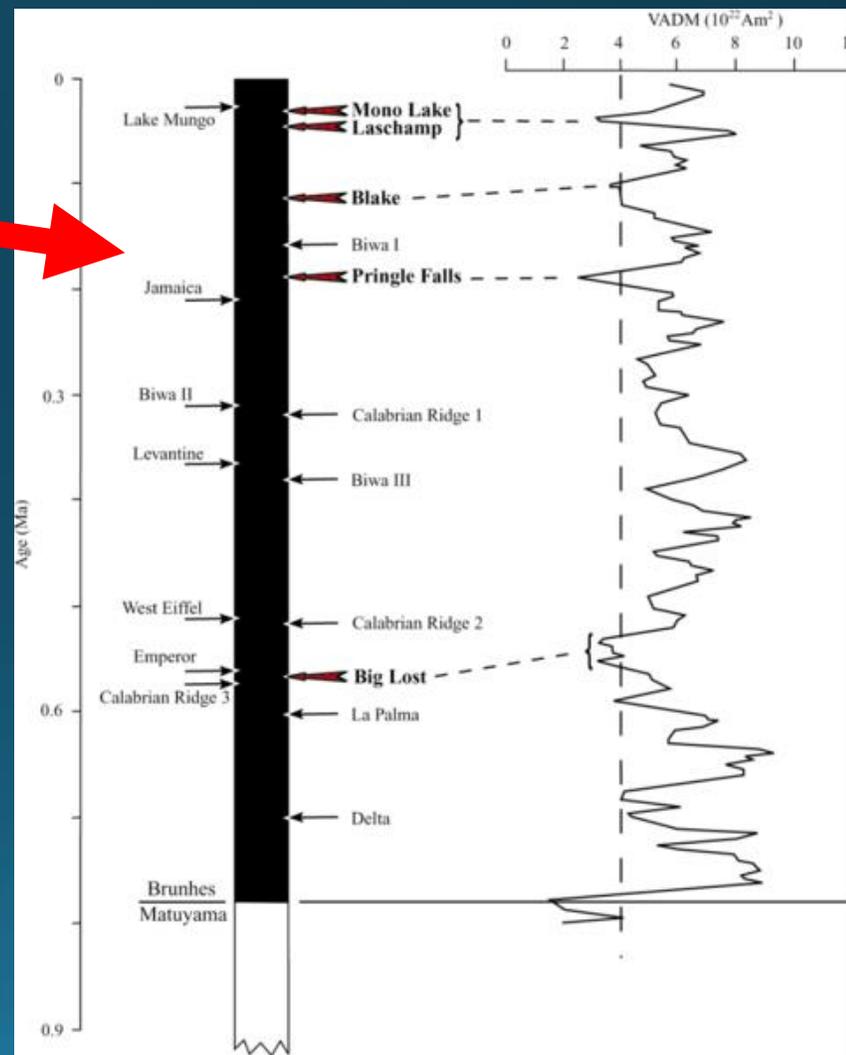
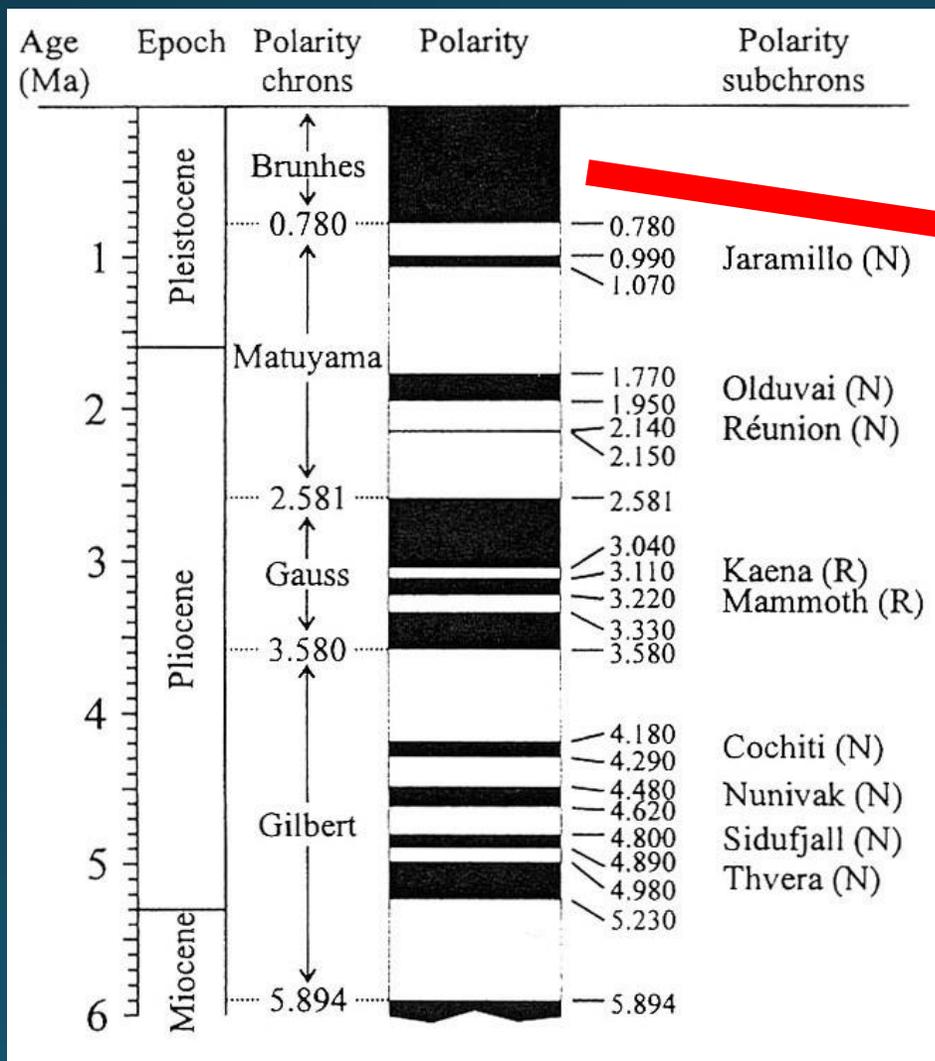
Временные вариации МП

-Вековые вариации
десятки - сотни — тысячи
лет

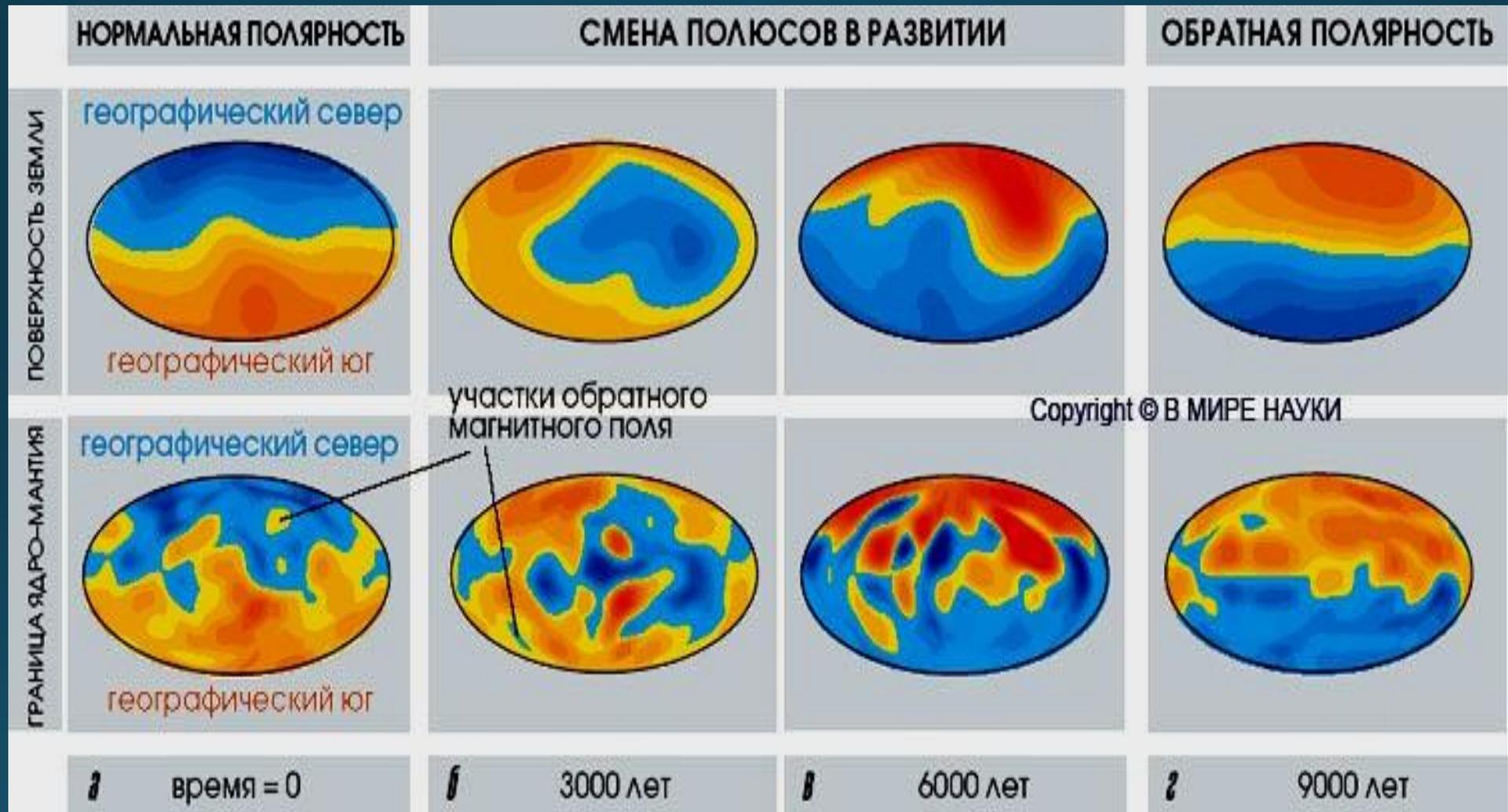
- Быстрые вариации
год и меньше



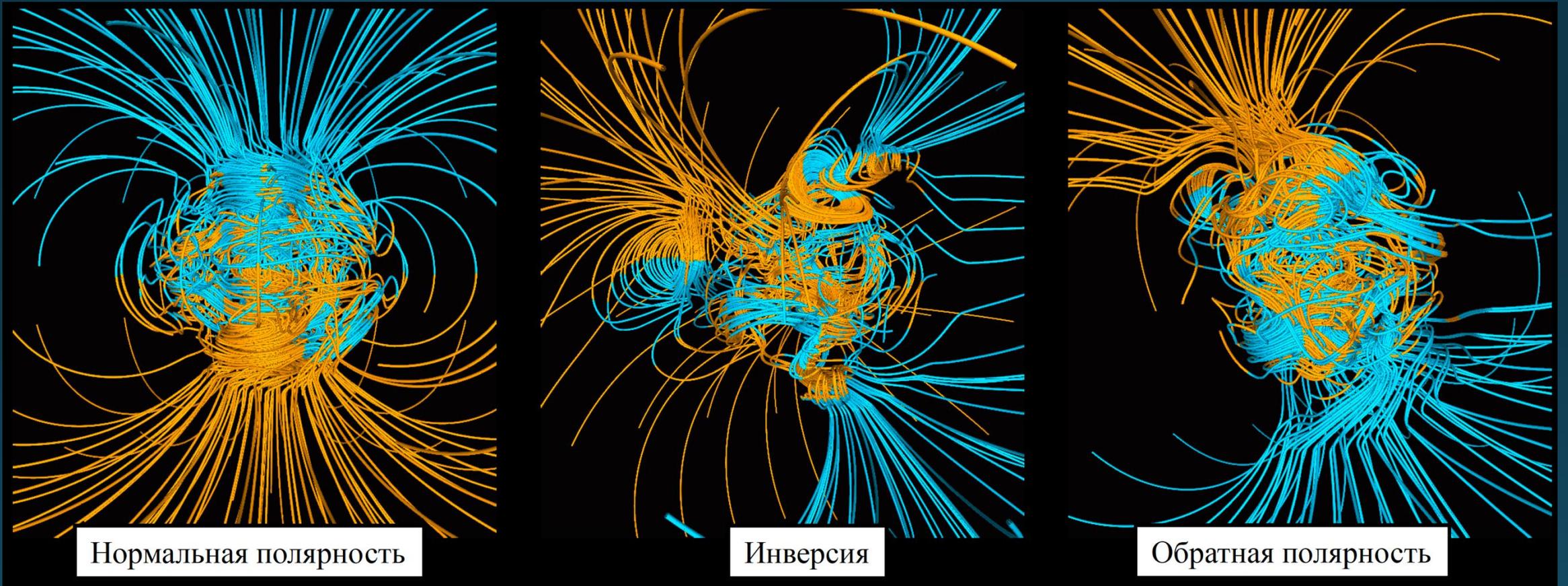
Инверсии магнитного поля Земли



Теоретическая модель инверсии МПЗ



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



Палеомагнетизм

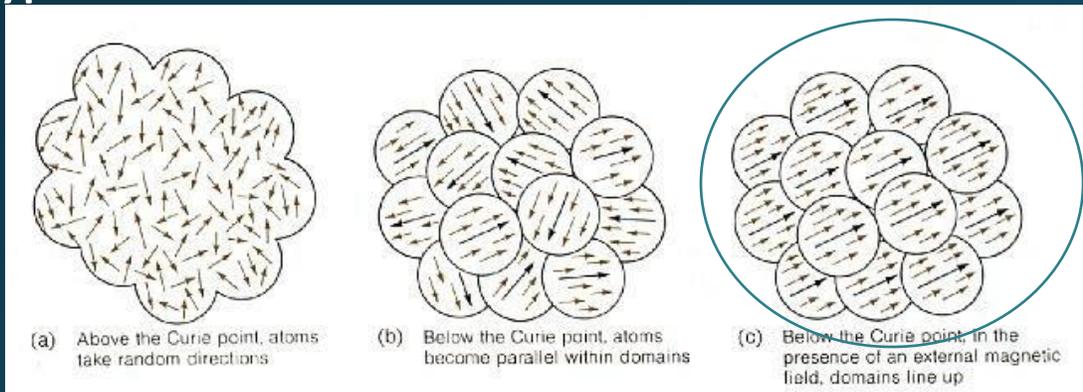
- Литосферный или коровый магнетизм – магнитное поле от изверженных горных пород (напр., базальты), содержащих ферромагнитные минералы, охлажденных ниже точки Кюри
- Нагрев материалов выше точки Кюри приводит к потере намагниченности

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} - $2 \cdot 10^{-3}$
маггемит	Fe_2O_3	560-640	435	4-25
пирротин	Fe_7O_8	300-325	17-70	10^{-2} - 10^{-1}

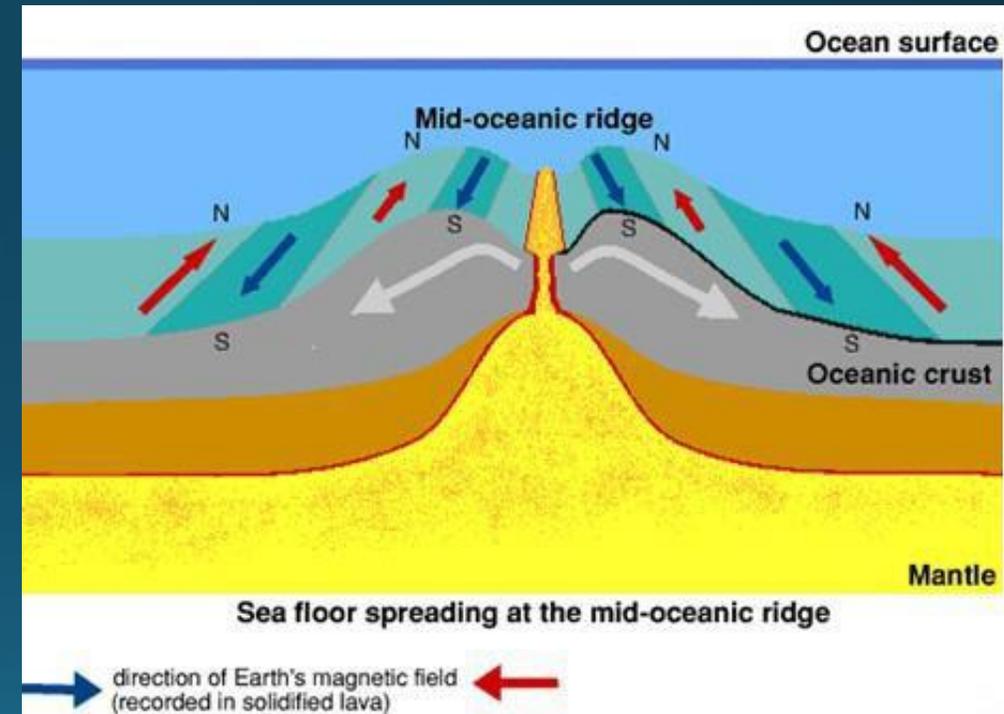
- Глубины образования: ~ 30 км в континентальных зонах, 6-7 км от дна океана
- Магнитная восприимчивость χ – способность породы намагничиваться под действием внешнего магнитного поля

Механизм формирования литосферных аномалий

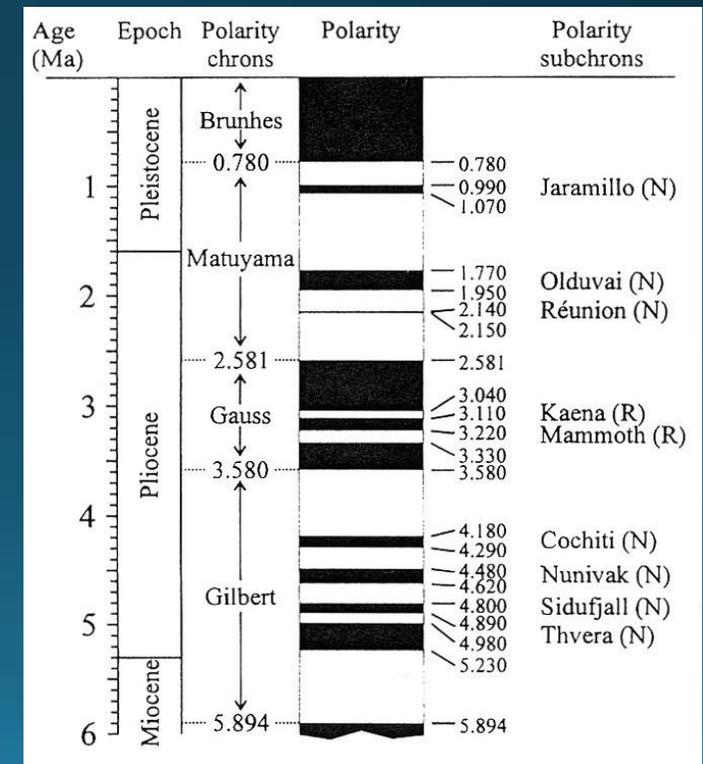
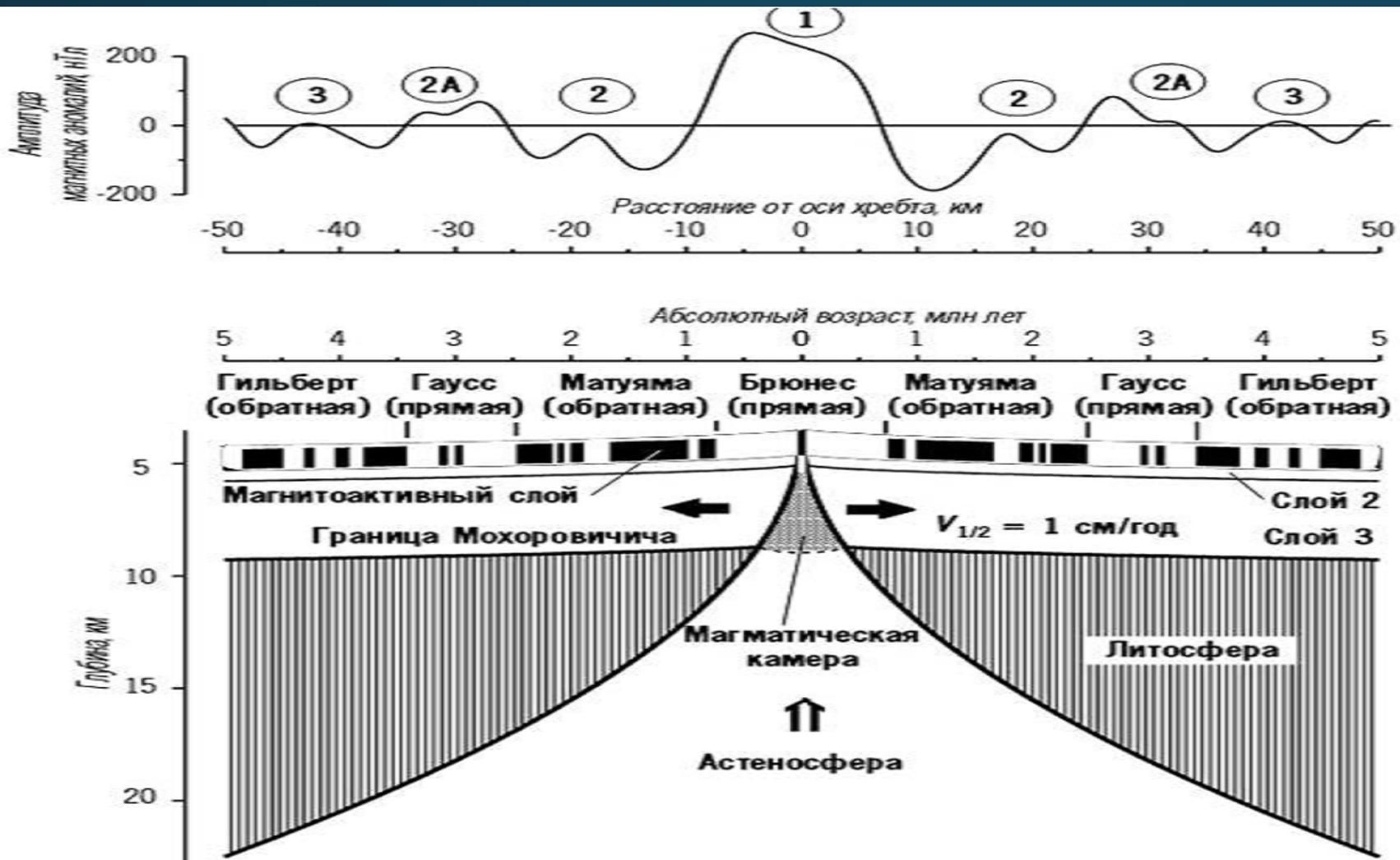
- При охлаждении под воздействием внешнего поля атомные моменты ферромагнитных веществ выстраиваются по направлению поля



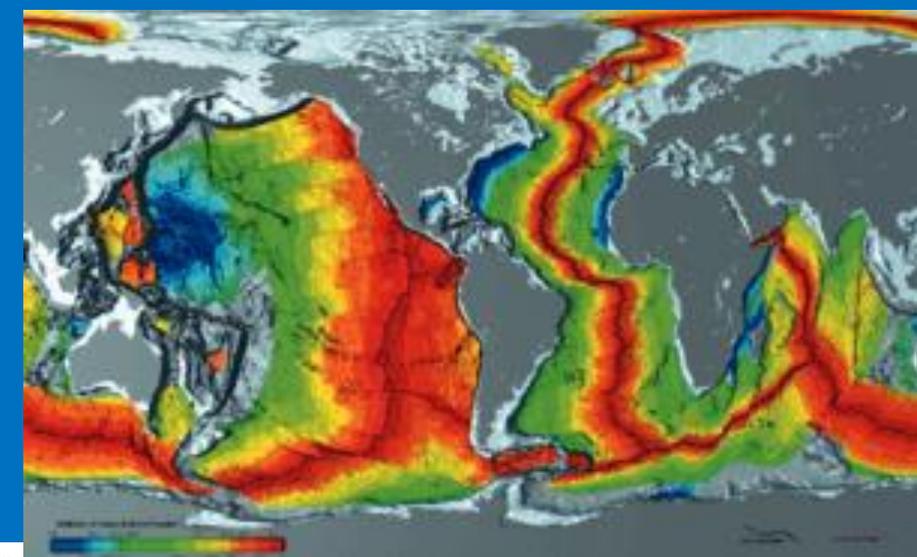
- Древнее поле оказывается "запомненным" в куске породы на тот момент, когда температура материала опустилась ниже точки Кюри



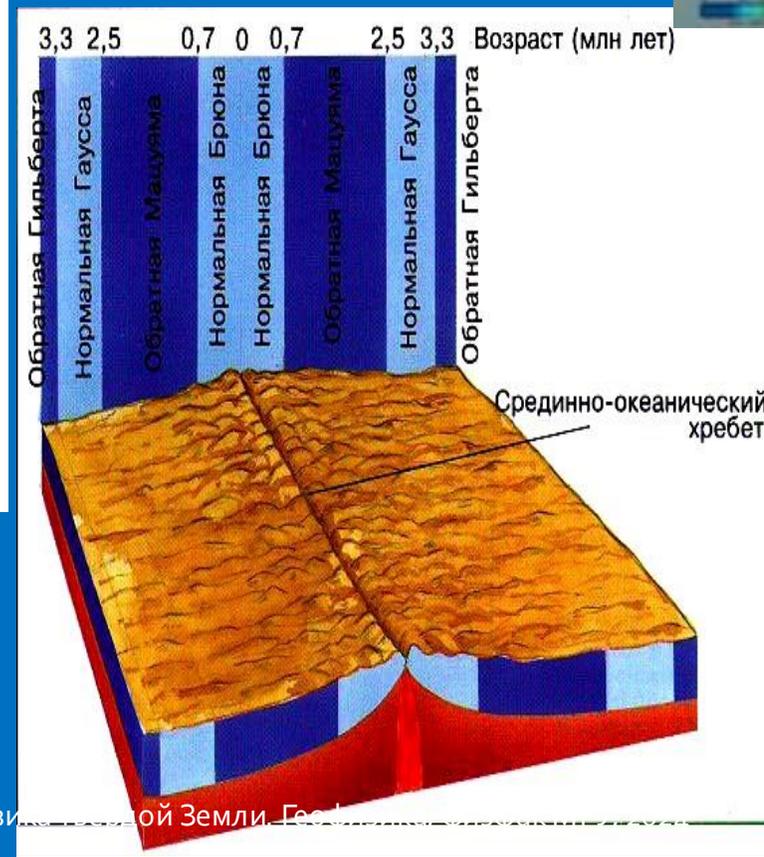
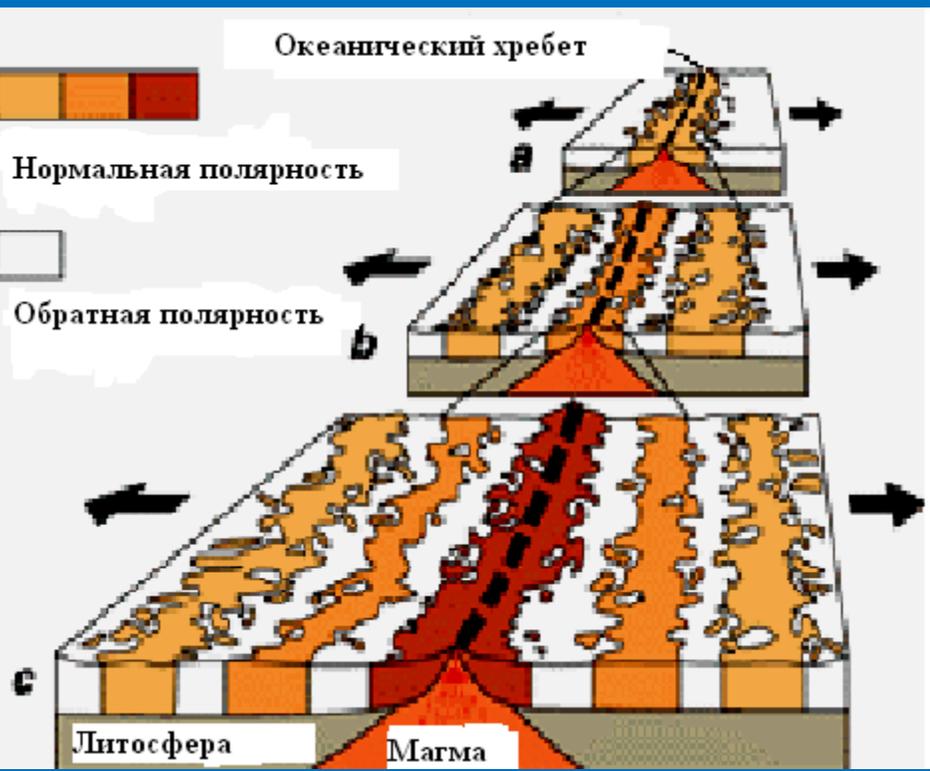
Симметрия магнитных аномалий относительно оси срединно-океанического хребта



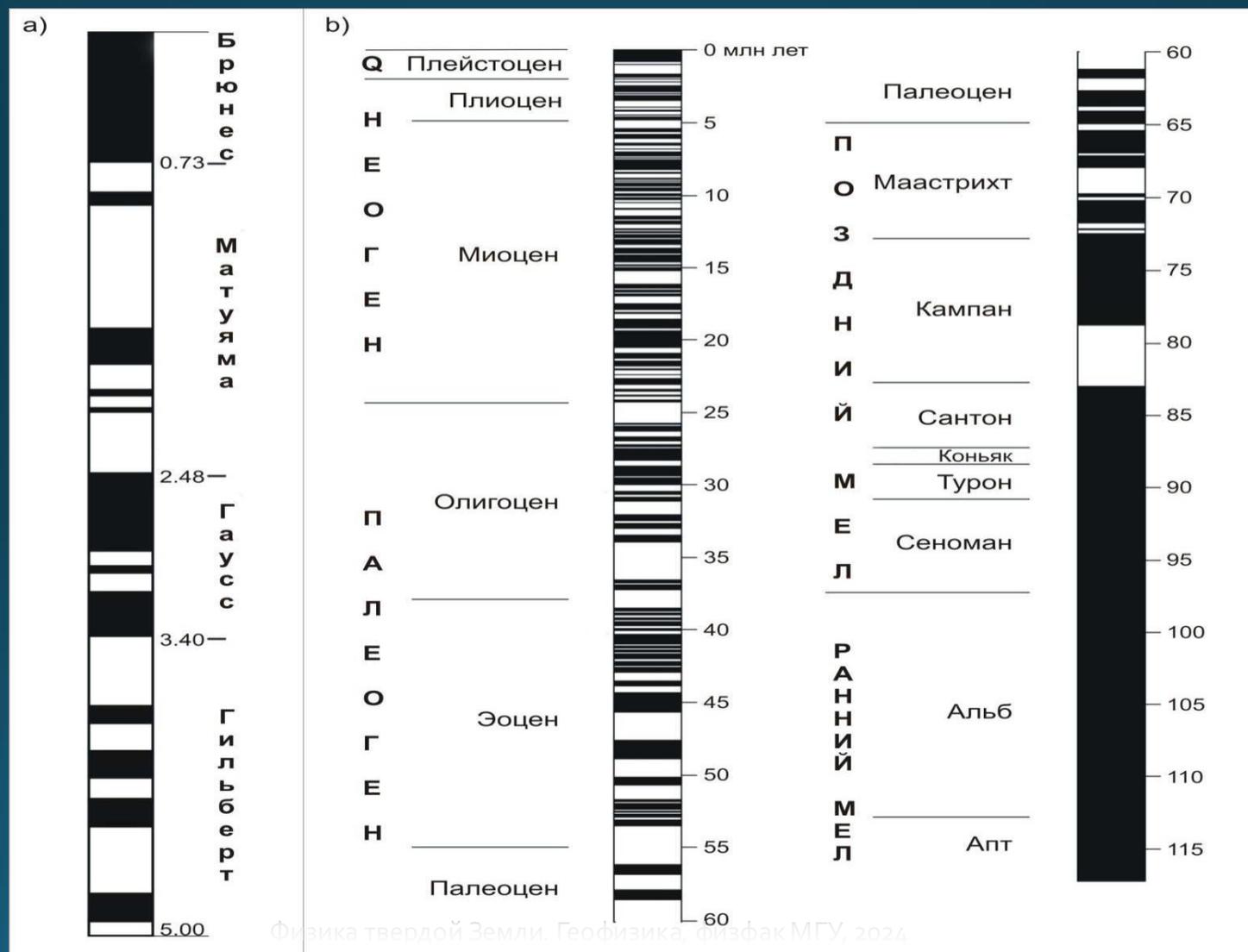
Линейчатые магнитные аномалии срединно-океанических хребтов.



Возраст океанической коры
(красный цвет – молодая кора)



Магнитохронологическая шкала на период 115 млн.лет



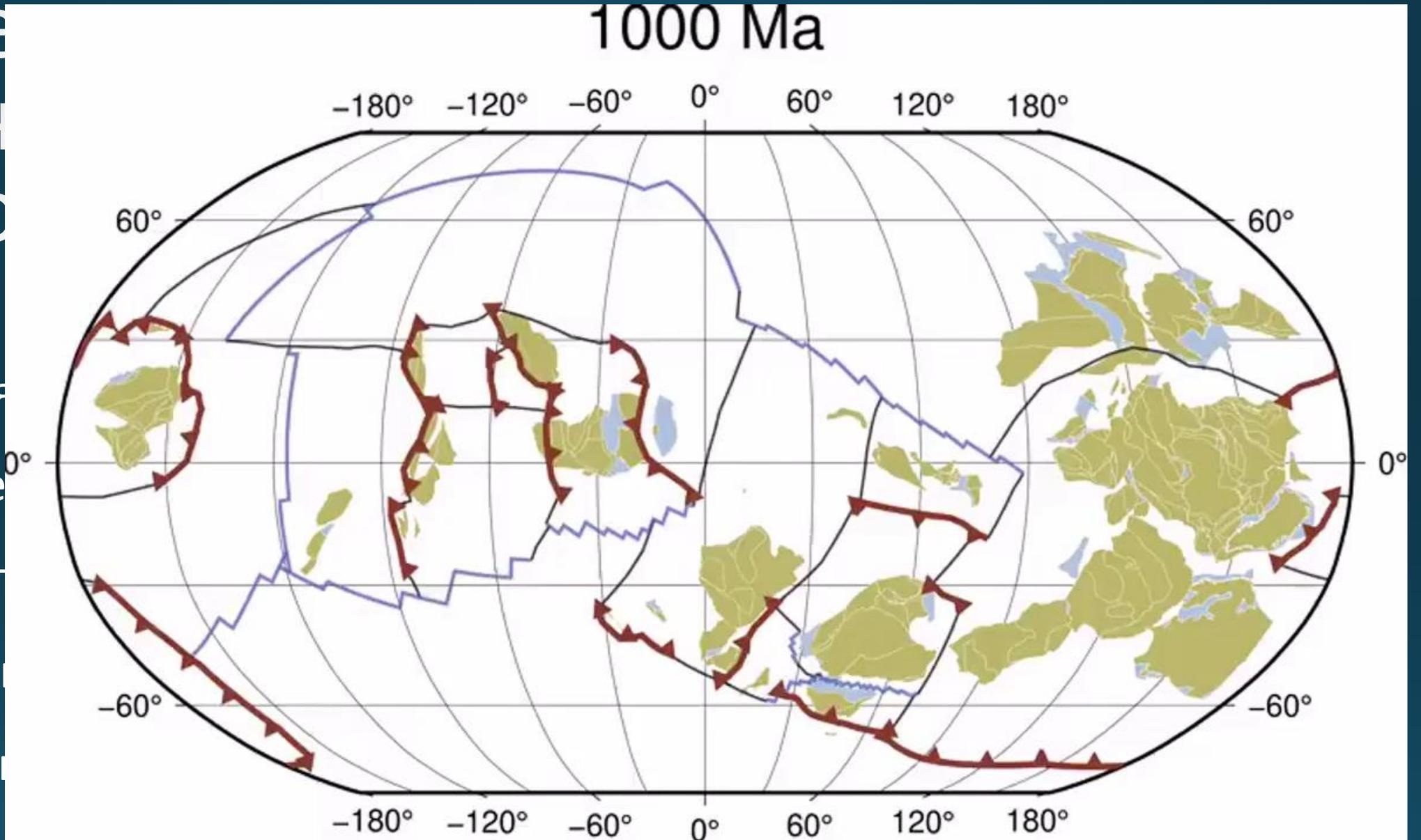
Палеомагнетизм: научные области применения

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

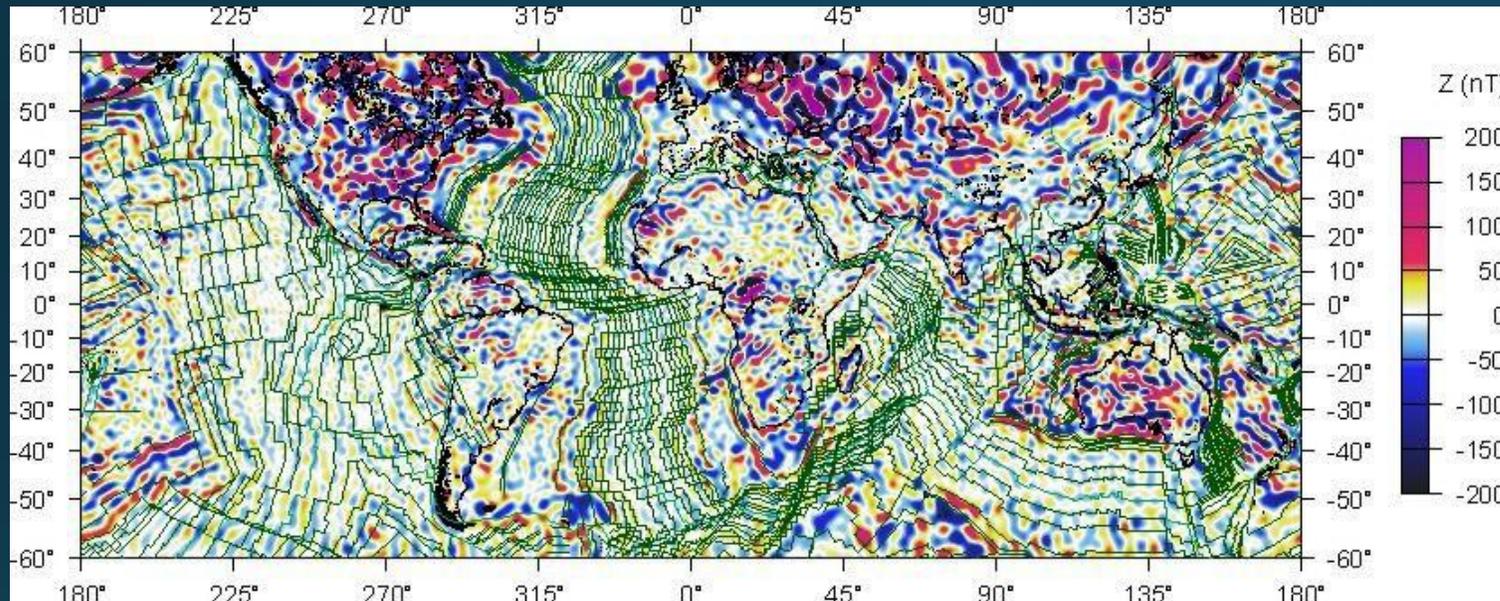


Палеогеография

- Эволюция
- Геологическая
- Геохронология
- Геотектоника
- Палеогеография



Аномальное (литосферное) магнитное поле



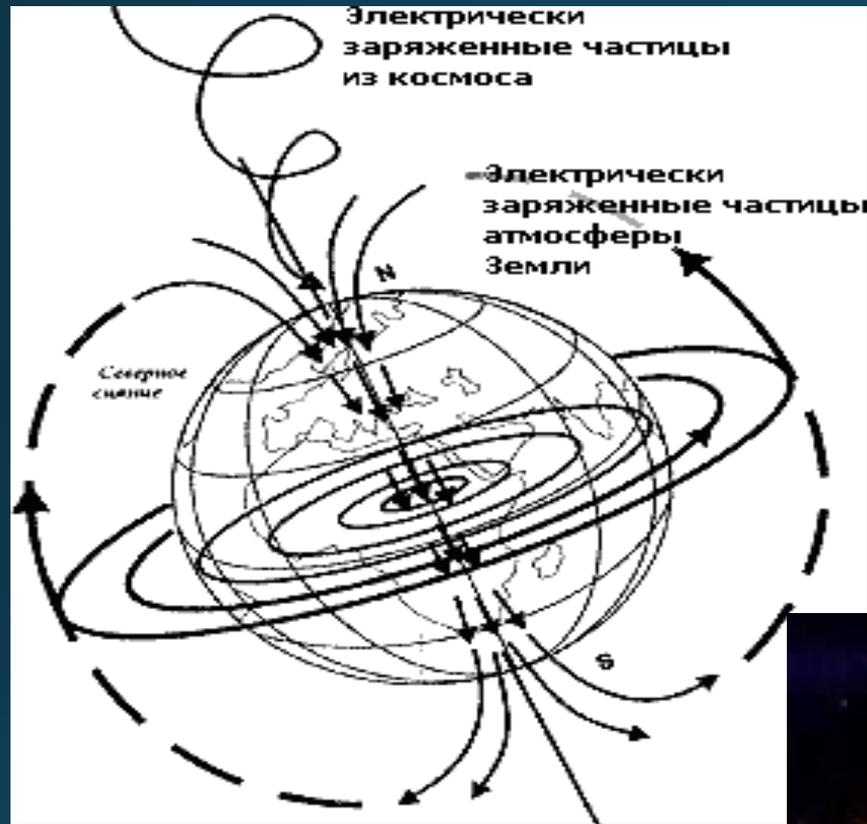
- **Степень разложения:** 133
- **Диапазон волн:** до 300 км
- **Разрешение:** ~1.35 градуса
- **Источники:** спутниковые данные CHAMP (2007-2010)
- **Данные:** коэффициенты разложения; сеточные данные Z и F, 6 угловых минут на высоте эллипсоида WGS84

Полярные сияния

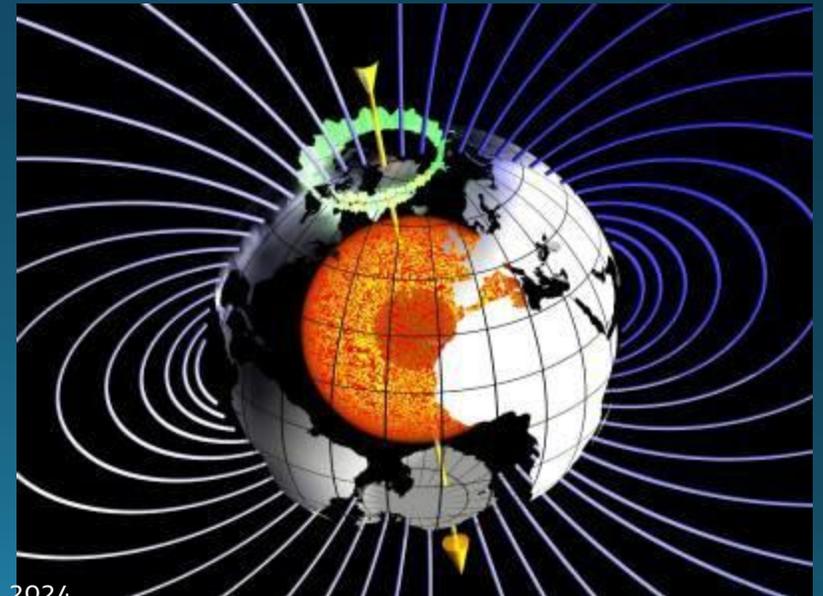


Физика твердой Земли. Геофизика, физфак МГУ, 2024

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**.