



# **МАГНИТОРАЗВЕДКА**

## **Глава 1**

### **«Введение в магниторазведку»**

*Ver 1.5.*

НОВИКОВ К.В. 2011 – 2017 гг.

# Основная литература по курсу «Магниторазведка»

1. Гринкевич Г.И. Магниторазведка. Учебник для техникумов. – М.: Недра, 1987.
2. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. – Л.: Недра, 1979.
3. Инструкция по магниторазведке. М-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1981.

## Дополнительная литература по курсу «Магниторазведка»

1. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – Л.: ЛГУ, 1978.
2. Серкерев С.А. Гравиразведка и магниторазведка. – М.: Недра, 1999
3. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986.
4. Гордин В.М. Очерки по истории геомагнитных измерений. – М.: ИФЗ РАН, 2004. – 162 с.
5. Магниторазведка. Справочник геофизика. – М.: Недра, 1980.
6. Ревякин П.С., Бродовой В.В., Ревякина Э.А.. Высокоточная магниторазведка. – М.: Недра, 1986. – 272 с.
7. Lanza R., Meloni A.. The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists. – Berlin: Springer, 2006.

# Применяемые в презентациях условные обозначения



- напоминания из разных областей науки

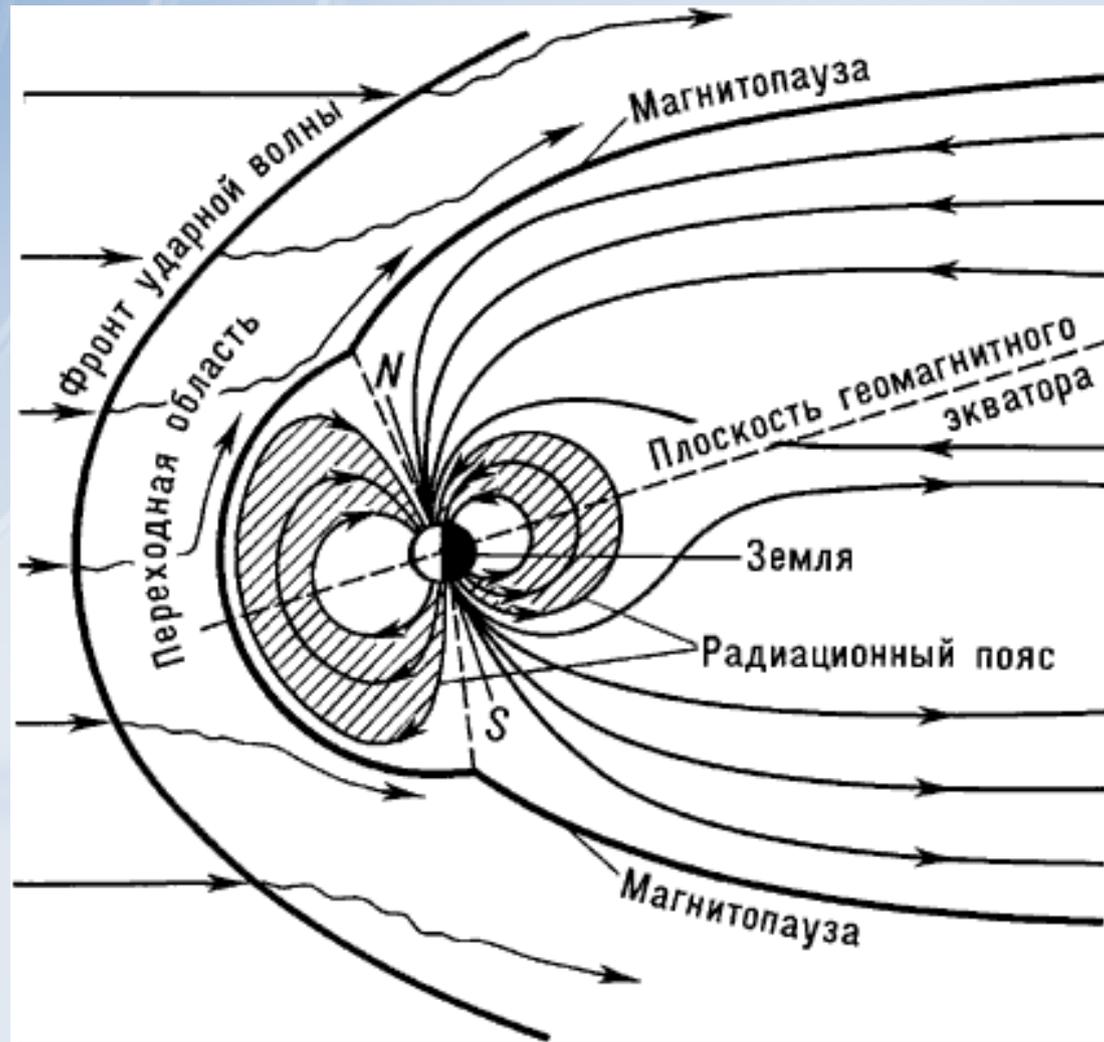


- важные и ключевые моменты



- исторические факты

# 1.1. Основы магниторазведки



## **1.1.1. Что такое магниторазведка?**

---

**Магниторазведка (Магнитометрия)** – раздел геофизики занимающийся изучением естественного магнитного поля Земли.

### **Задачи:**

- Геологическое картирование.
- Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых.
- Инженерно-геологические задачи.
- Археологические задачи.

# Виды магнитной съемки (по месту проведения и носителю)

## 1. Наземные

Пешеходные

Автомобильные

Велосипедные

Обсерваторные

## 2. Воздушные

Самолетные

Вертолетные

Спутниковые

## 3. Морские



## 4. Подземные

Шахтные

Скважинные



## 1.1.2. Магнитное поле и его основные характеристики



Величина	Обозн.	Размерность СИ	Размерность СГС	Связь СГС и СИ
1	2	3	4	5
Индукция	$\vec{B}$	тесла (Тл) = $\text{Гн} \cdot \text{А} \cdot \text{м}^{-2} =$ $= \text{кг} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	гаусс (Гс)	$1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$
Напряженность	$\vec{H}$	ампер/метр (А/м)	эрстед (Э)	$1 \frac{\text{А}}{\text{м}} = 4\pi 10^{-3} \text{ Э}$
Намагниченность	$\vec{j}(\vec{i})$	ампер/метр (А/м)	ед. СГС·см <sup>-3</sup>	$1 \frac{\text{А}}{\text{м}} = 10^{-3} \frac{\text{ед. СГС}}{\text{см}^3}$
Магнитный момент	$\vec{M}$	ампер·метр <sup>2</sup> (А·м <sup>2</sup> )	ед. СГС	$1 \frac{\text{А} \cdot \text{м}^2}{\text{ед. СГС}} = 10^3$
Магнитный поток	$\vec{\Phi}$	вебер (Вб) = $= \text{Гн} \cdot \text{А} =$ $= \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	максвелл (Мкс)	$1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ Мкс}$

$\vec{H}$ 

**Напряженность магнитного поля** – это векторная физическая величина, являющаяся количественной характеристикой магнитного поля, показывающая силу, с которой поле действует на точечную массу, отнесенную к единице этой массы.

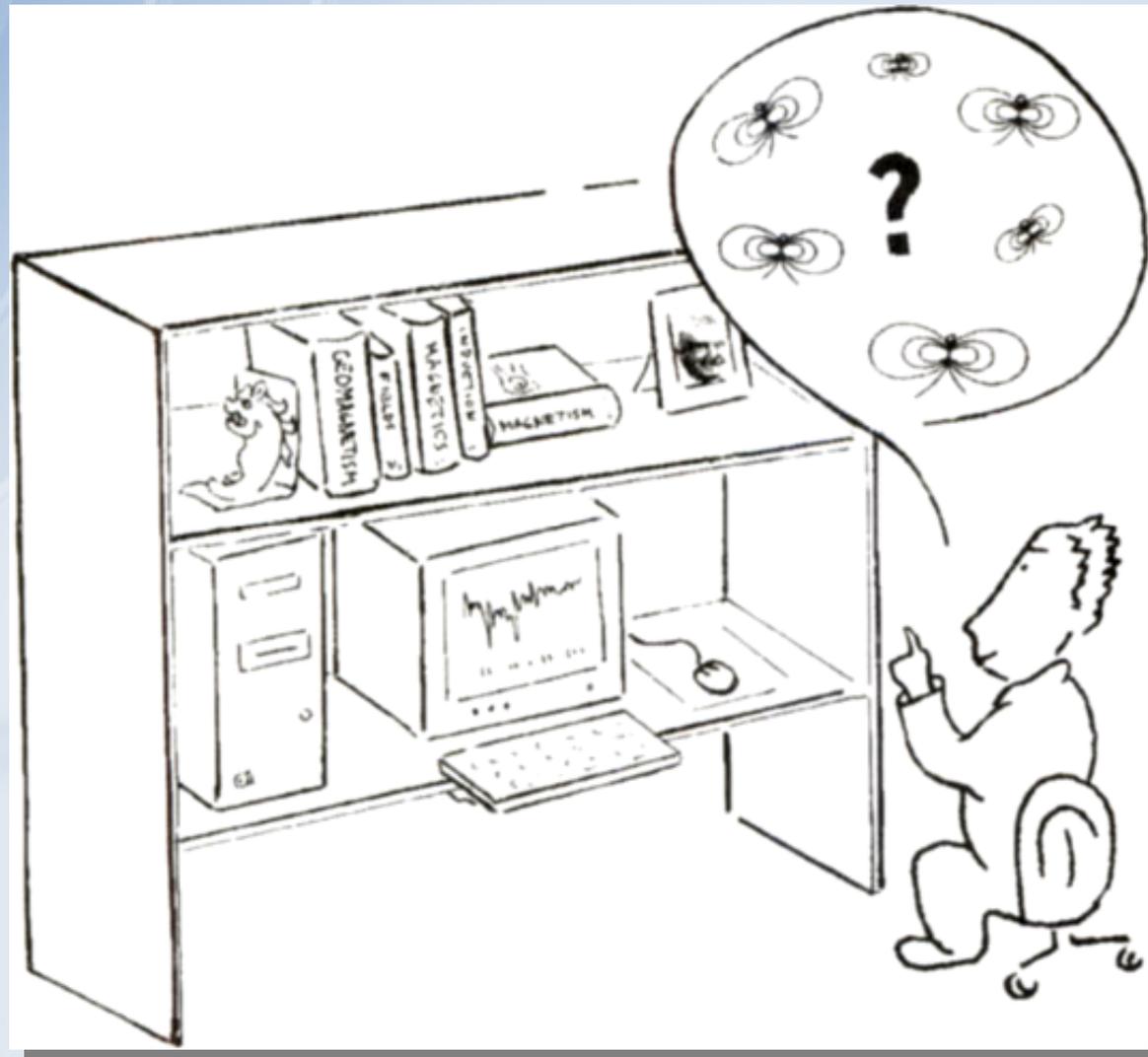
$$\vec{H} = \frac{\mu_0 \cdot m_1 \cdot m_2}{4\pi \cdot m_1} \cdot \frac{\vec{L}_{12}}{L_{12}^3} = \frac{\mu_0 m_2}{4\pi} \cdot \frac{\vec{L}_{12}}{L_{12}^3}$$

 $\vec{B}$ 

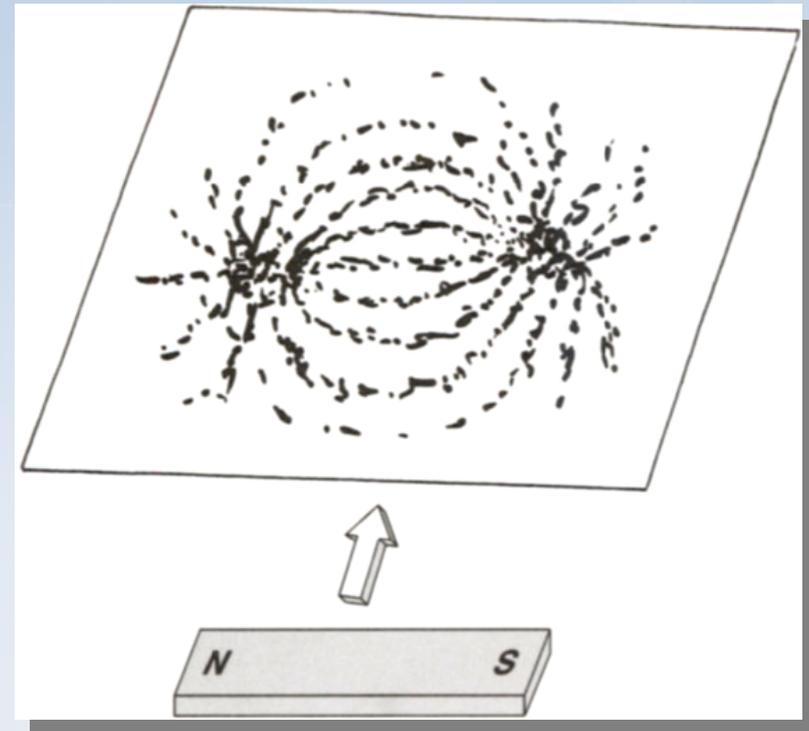
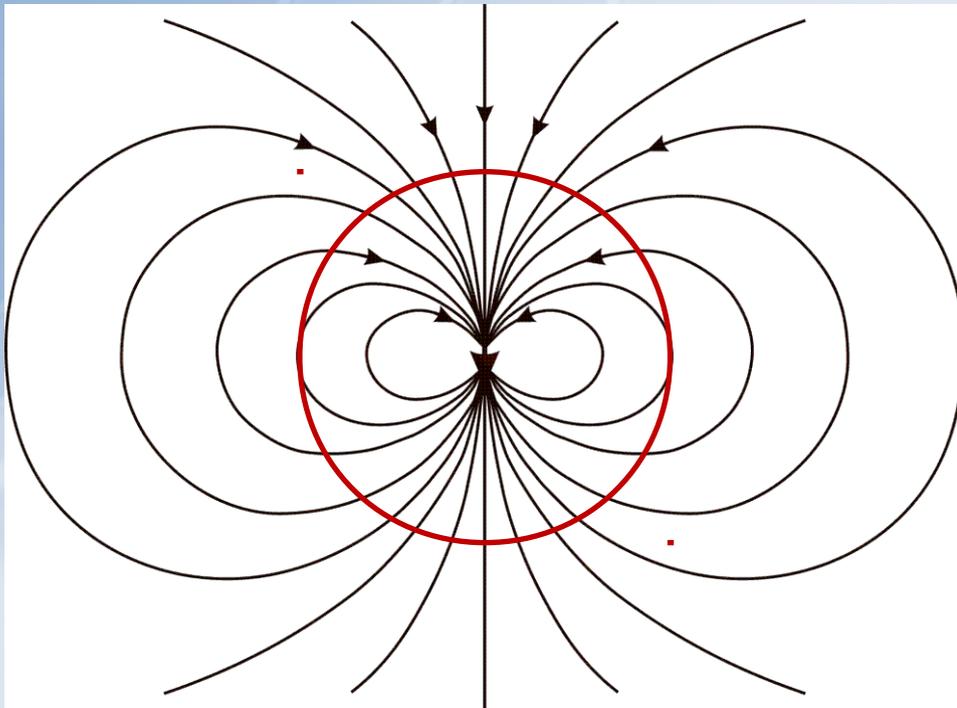
**Магнитная индукция** – векторная физическая величина, которая показывает напряженность суммарного поля, то есть сумму напряженностей намагничивающего и внутреннего поля, возникающего внутри намагниченного тела под действием намагничивающего поля.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} = \mu_a \vec{H}$$

# 1.2. Структура магнитного поля Земли



Магнитное поле Земли, в первом приближении, представляет собой поле диполя. Такую же структуру имеет поле обыкновенного полярного магнита.

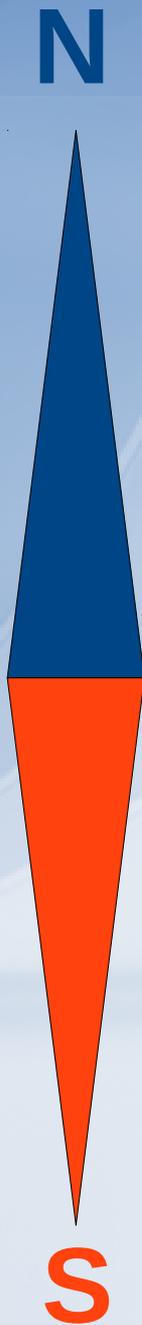


Источник магнитного поля находится внутри Земли, поэтому силовые линии пересекают земную поверхность.

## Традиционная раскраска стрелки компаса

Север — холод — синий цвет

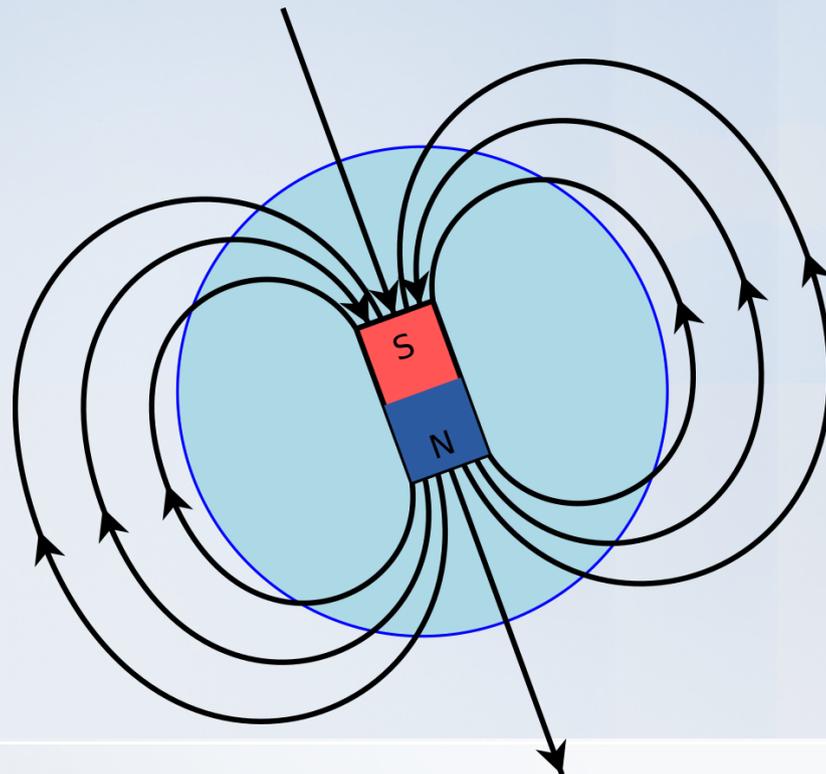
Юг — жара — красный цвет



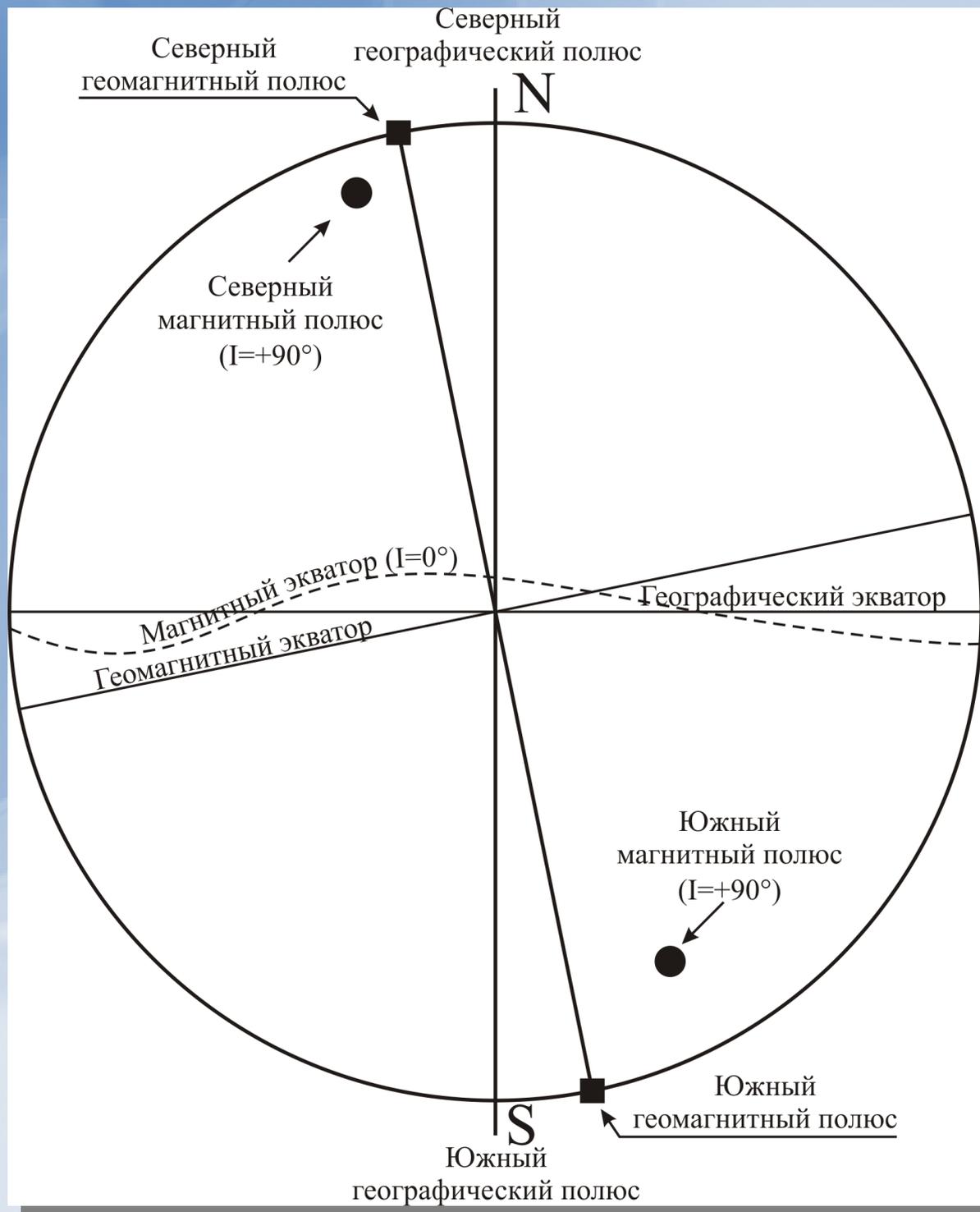
Такие же цвета  
были приняты для  
магнита



Если источник магнитного поля внутри Земли представить в виде магнита, то северный полюс магнита окажется около географического южного.

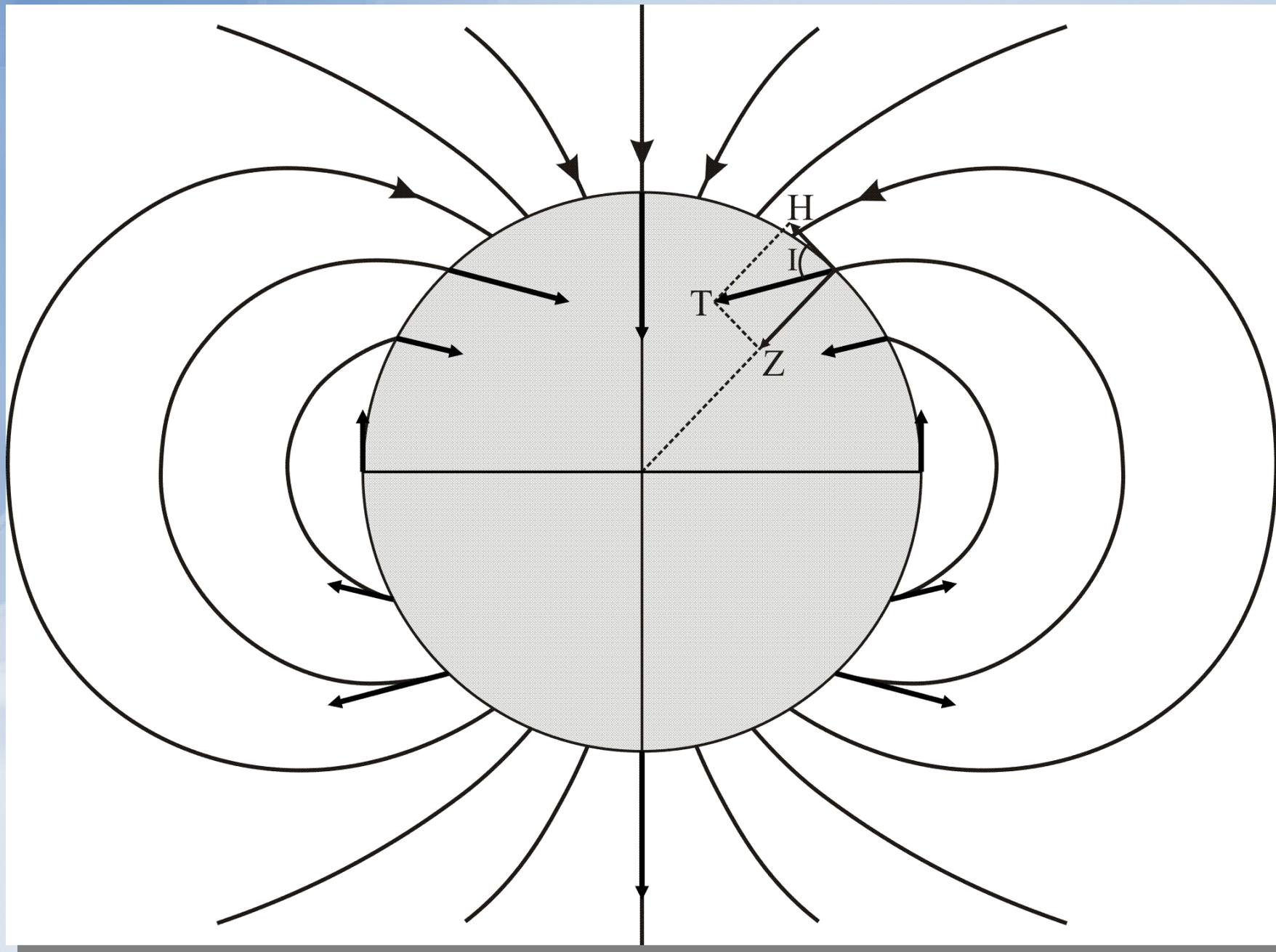


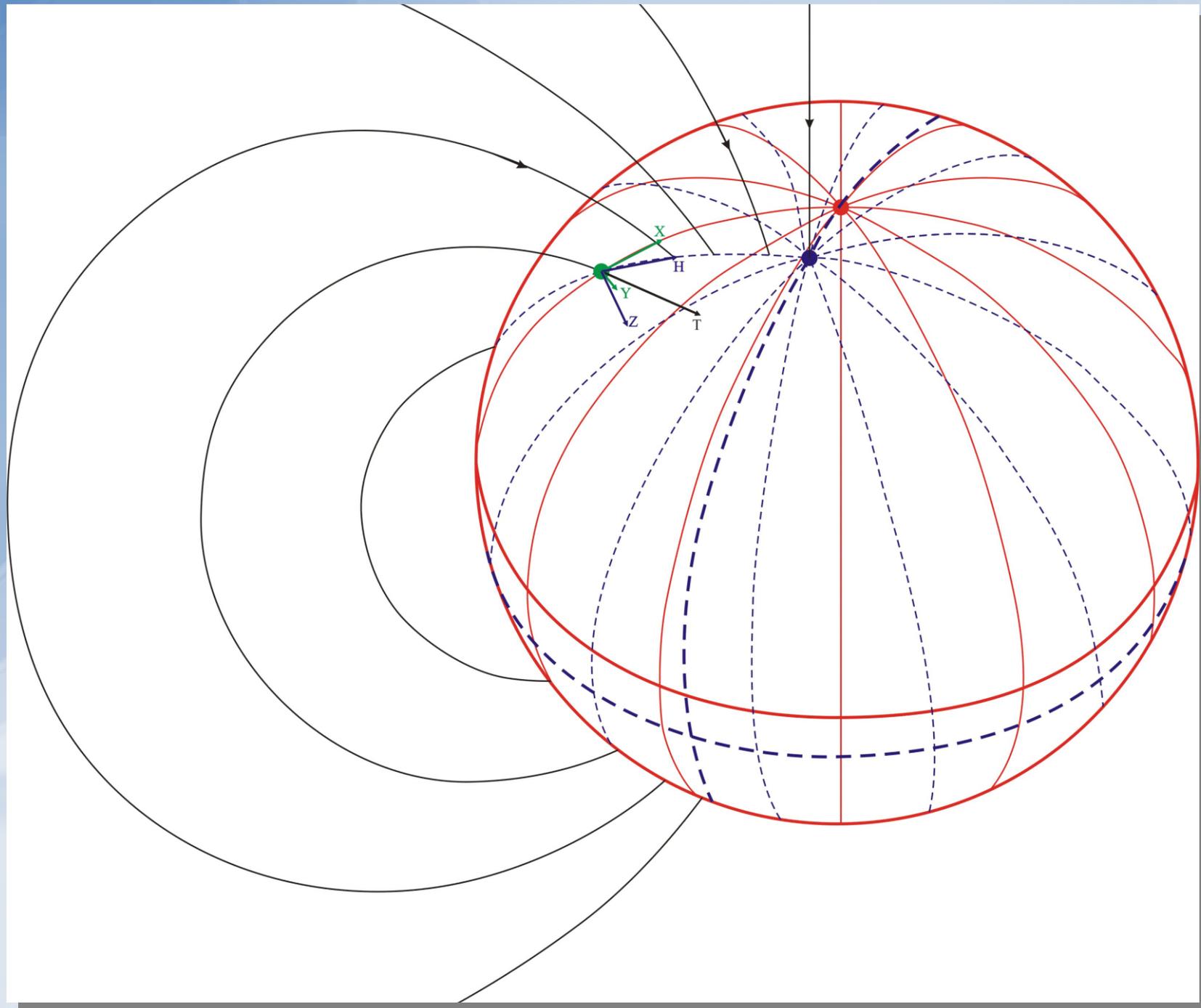
Стрелка компаса будет ориентироваться по вдоль силовых линий, ее северный полюс будет направлен к южному полюсу источника магнитного поля.



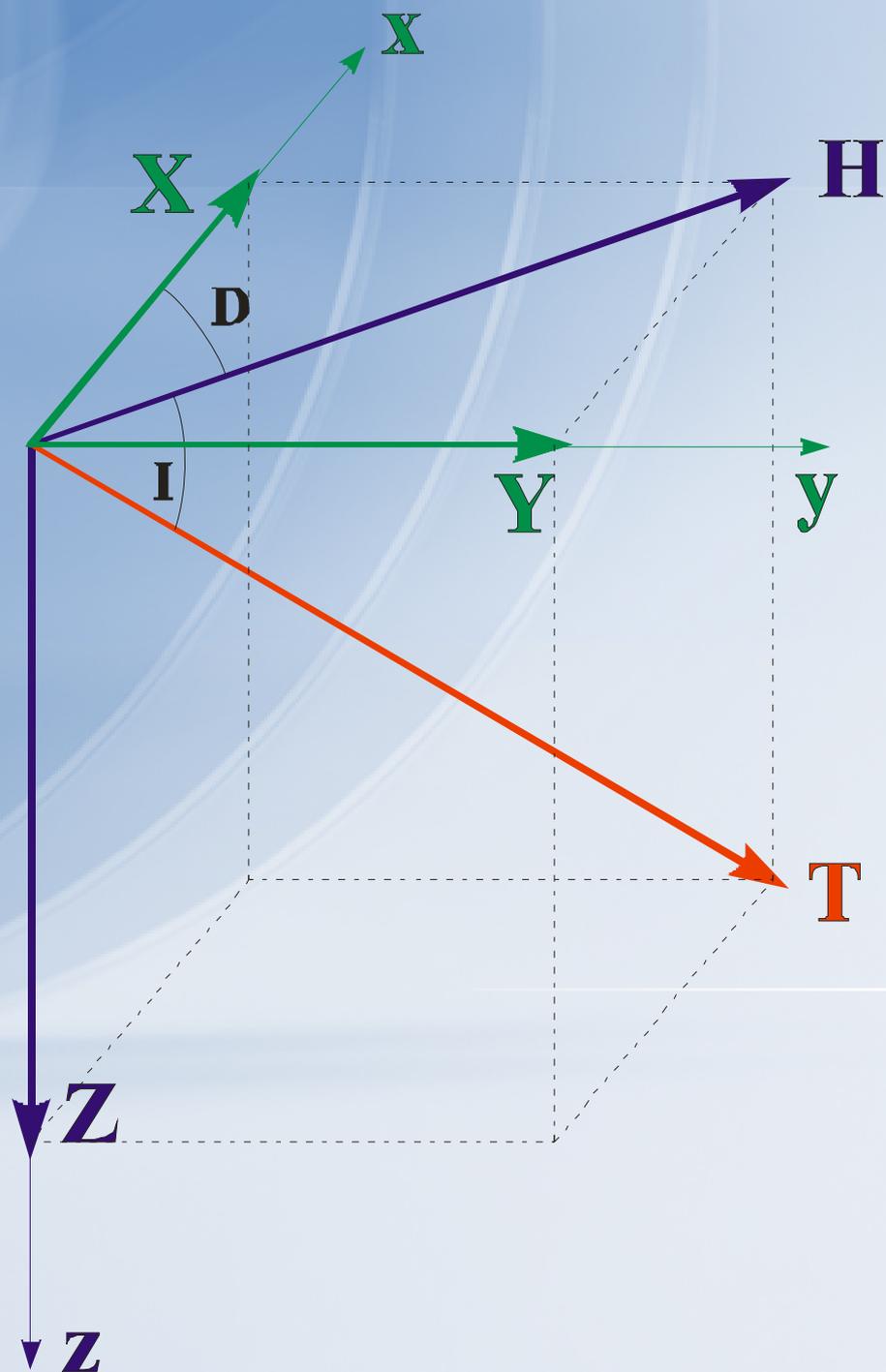
Истинное магнитное поле Земли отличается от поля диполя, которым его часто описывают. Поэтому ввели еще одно понятие – геомагнитные полюса. Геомагнитными полюсами называются (Нг.п., Сг.п.) точки пересечения земной поверхности и оси диполя, который наиболее близко описывает магнитное поле Земли.

В каждой точке магнитное поля можно представить в виде вектора, который направлен по касательной к силовой линии в данной точке.





# Компоненты магнитного поля Земли



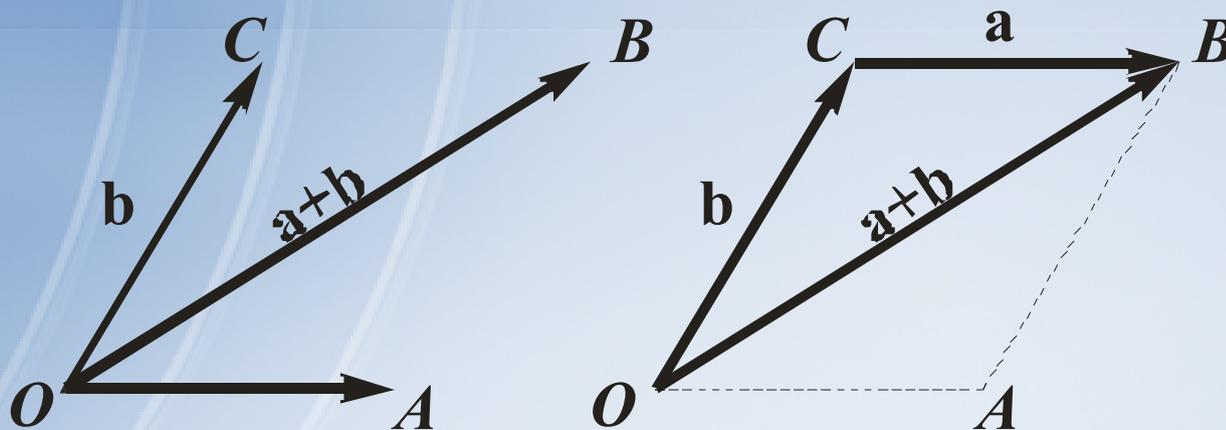
$T$  — полный вектор МПЗ;  
 $H$  — горизонтальная компонента  $T$ ;  
 $Z$  — вертикальная компонента  $T$ ;  
 $X$  — северная компонента  $T$ ;  
 $Y$  — восточная компонента  $T$ ;  
 $D$  — магнитное склонение;  
 $I$  — магнитное наклонение.

$$T = \sqrt{Z^2 + H^2}$$
$$= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

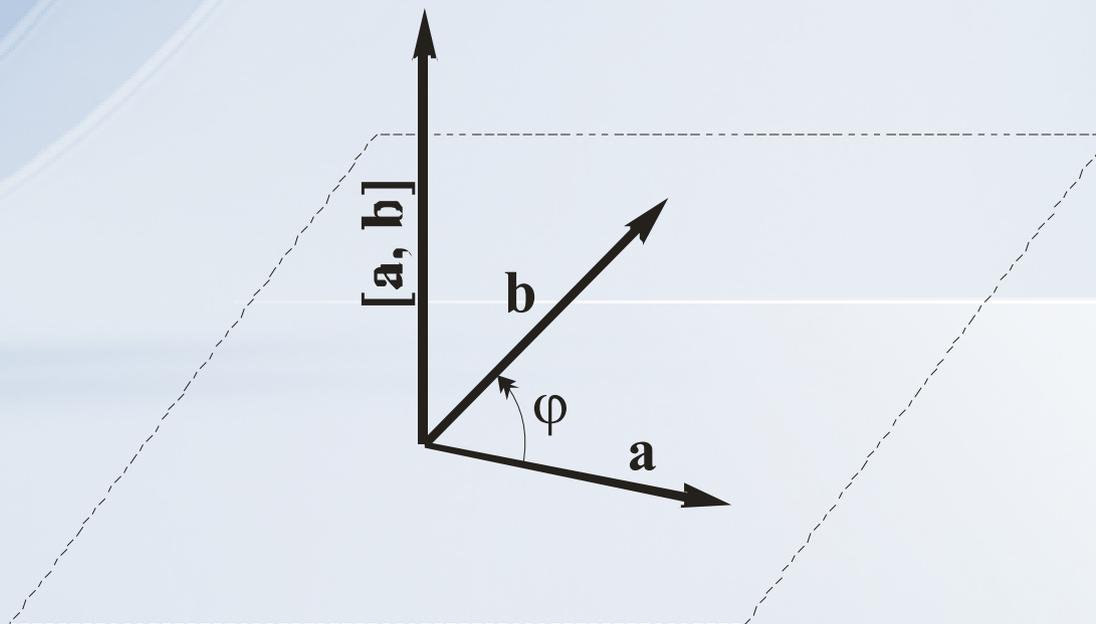
# Математика: векторы.



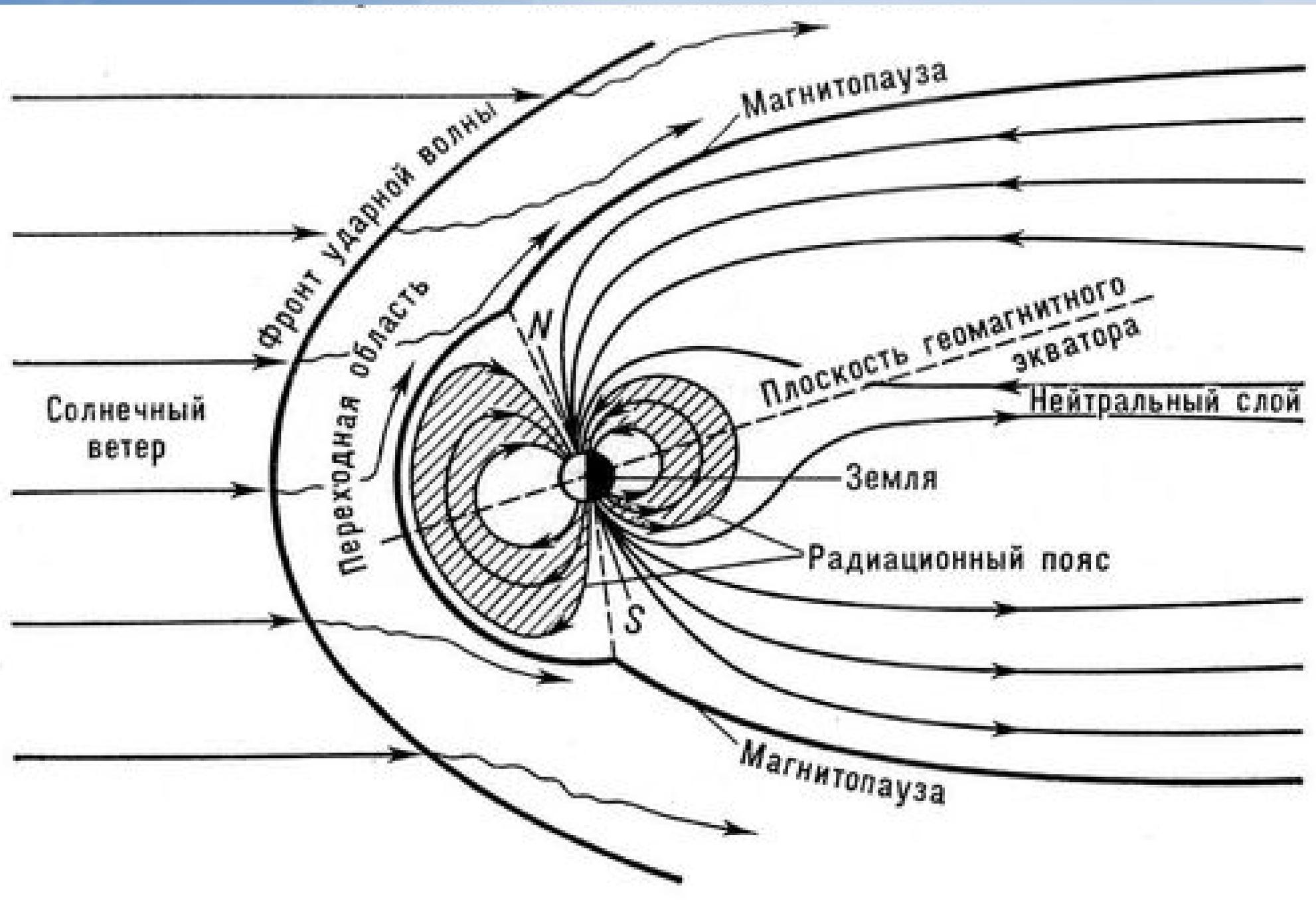
Сложение векторов



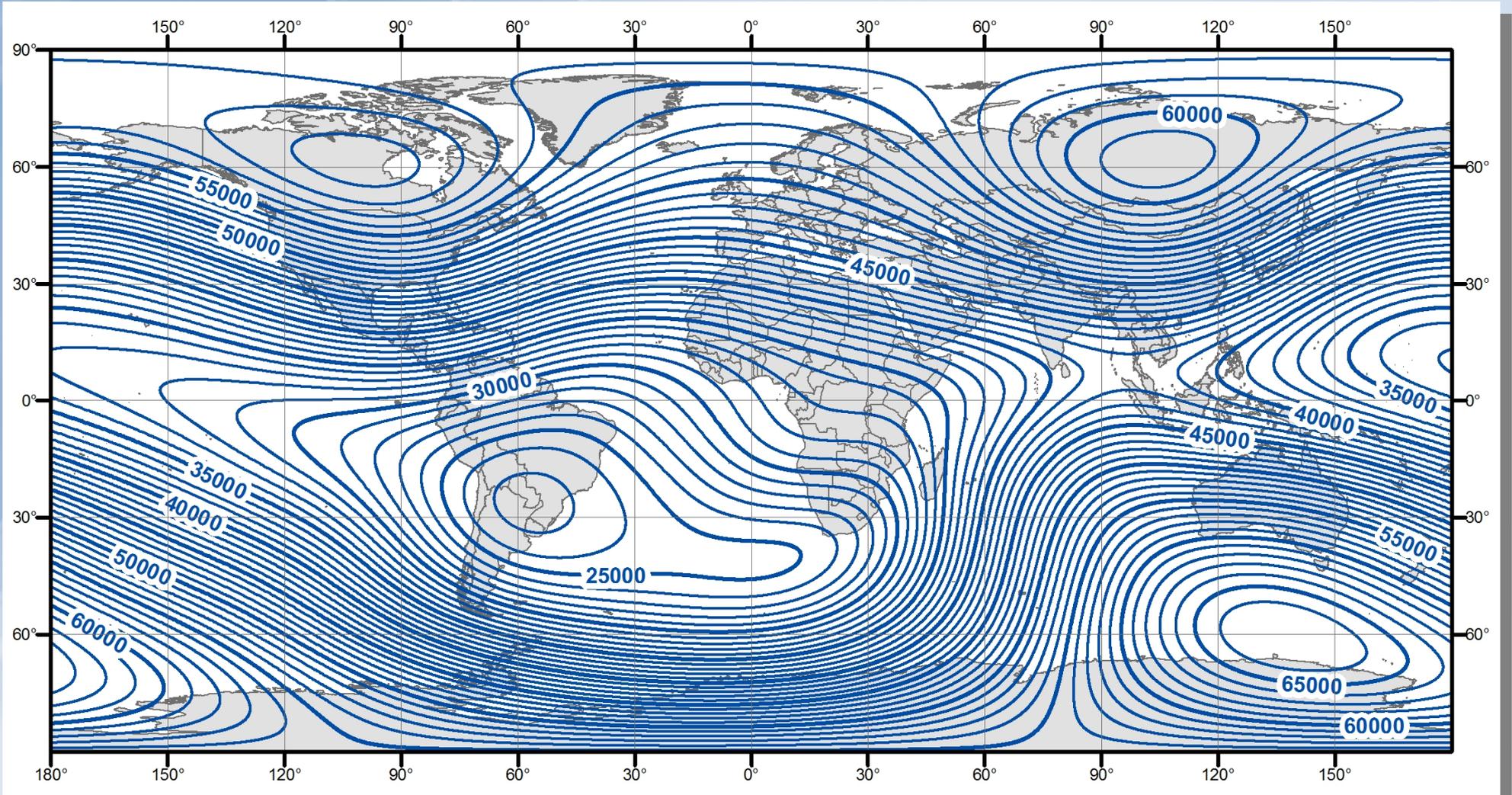
Векторное произведение векторов



# Строение магнитосферы Земли



# 1.3. Нормальное и аномального магнитное поле



# Составляющие магнитного поля Земли



$$\vec{T} = \vec{T}_0 + \vec{T}_m + \vec{T}_a + \vec{T}_e + \delta \vec{T}$$

$$\vec{T} = \vec{T}_0 + \vec{T}_m$$

– главное магнитное поле Земли

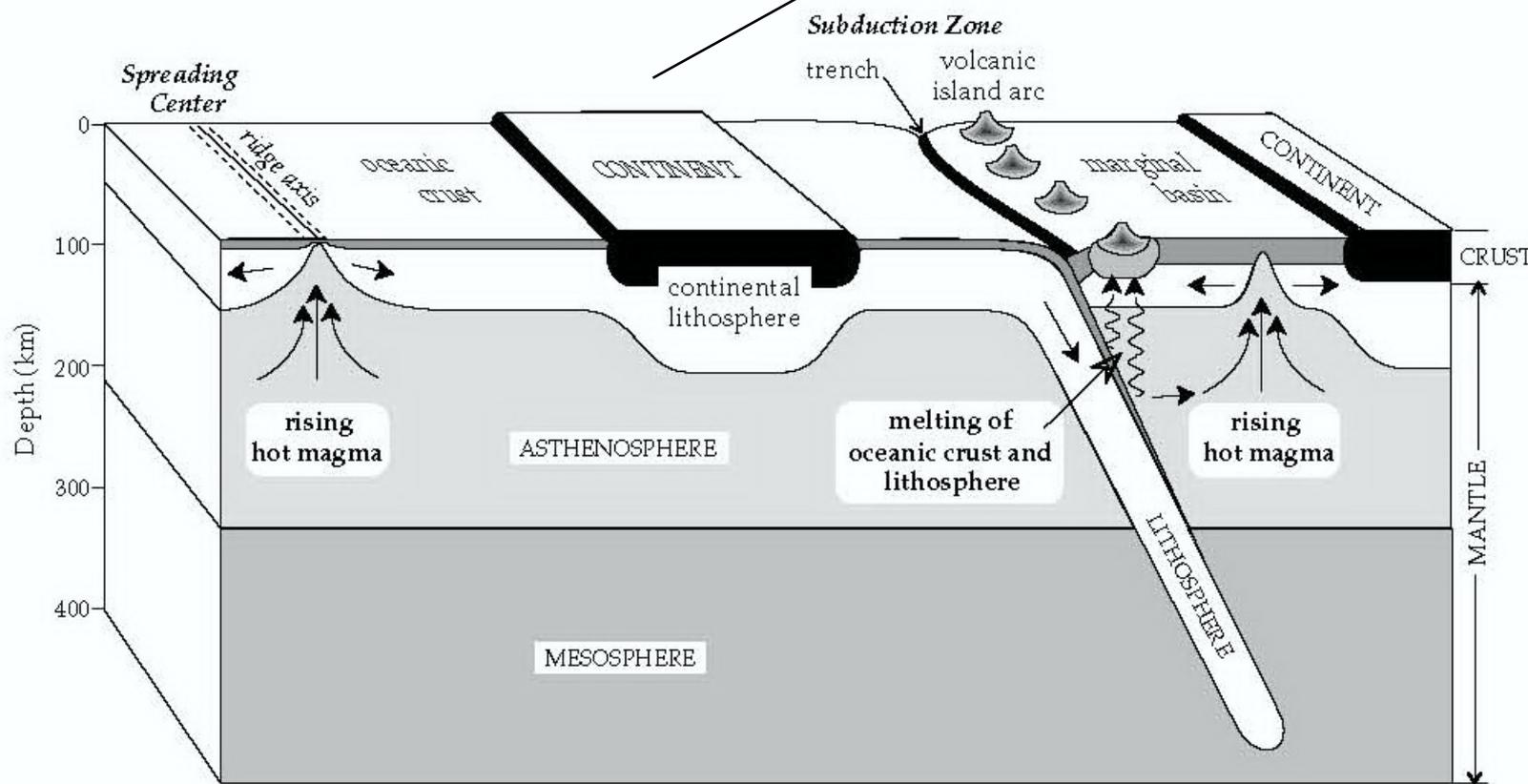
$$\vec{T}_a = \vec{T}_a^{\text{лок}} + \vec{T}_a^{\text{рег}}$$

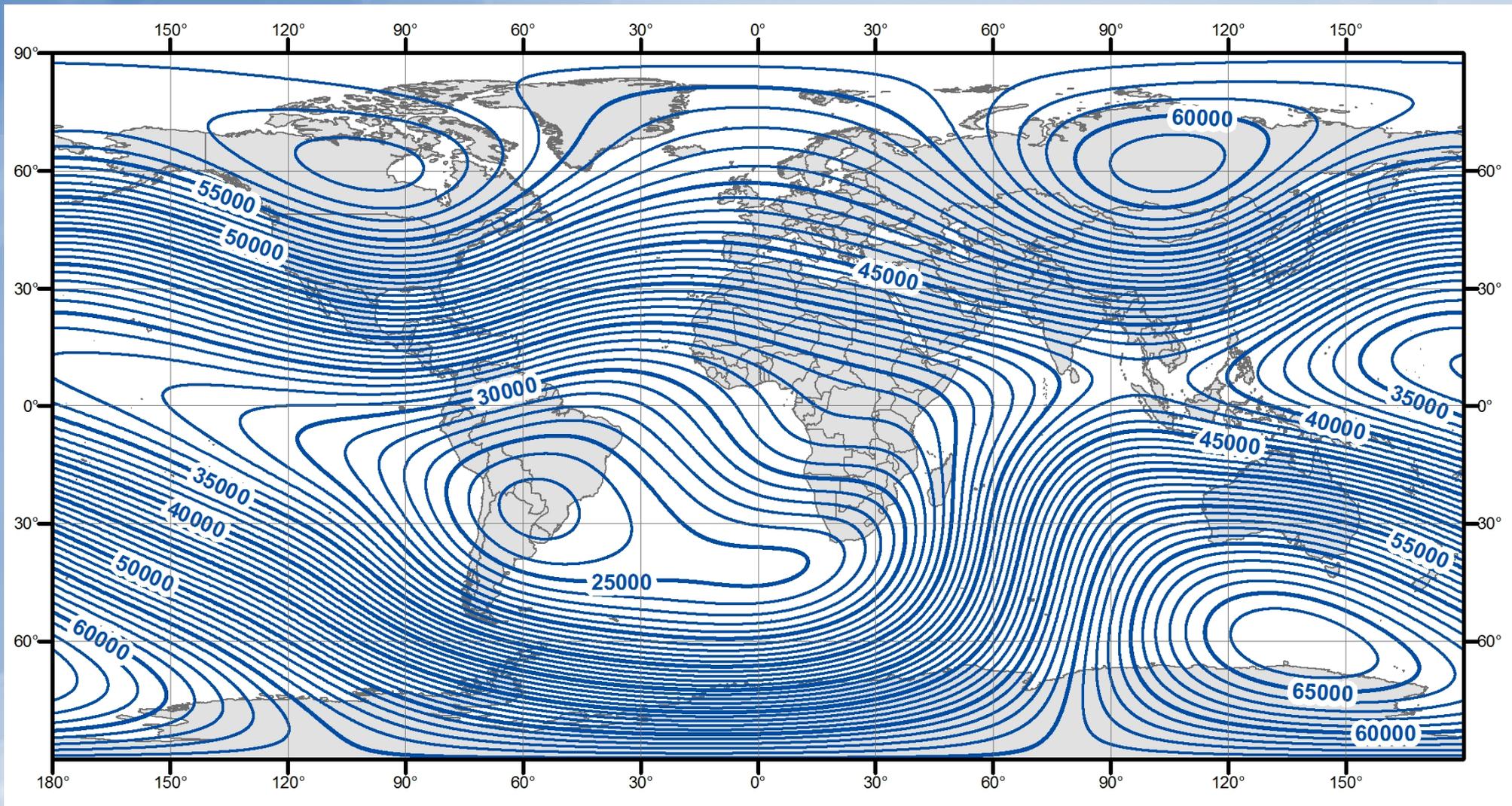
– аномальное поле

$$\vec{T}_n = \vec{T}_0 + \vec{T}_m + \vec{T}_e$$

– нормальное поле Земли

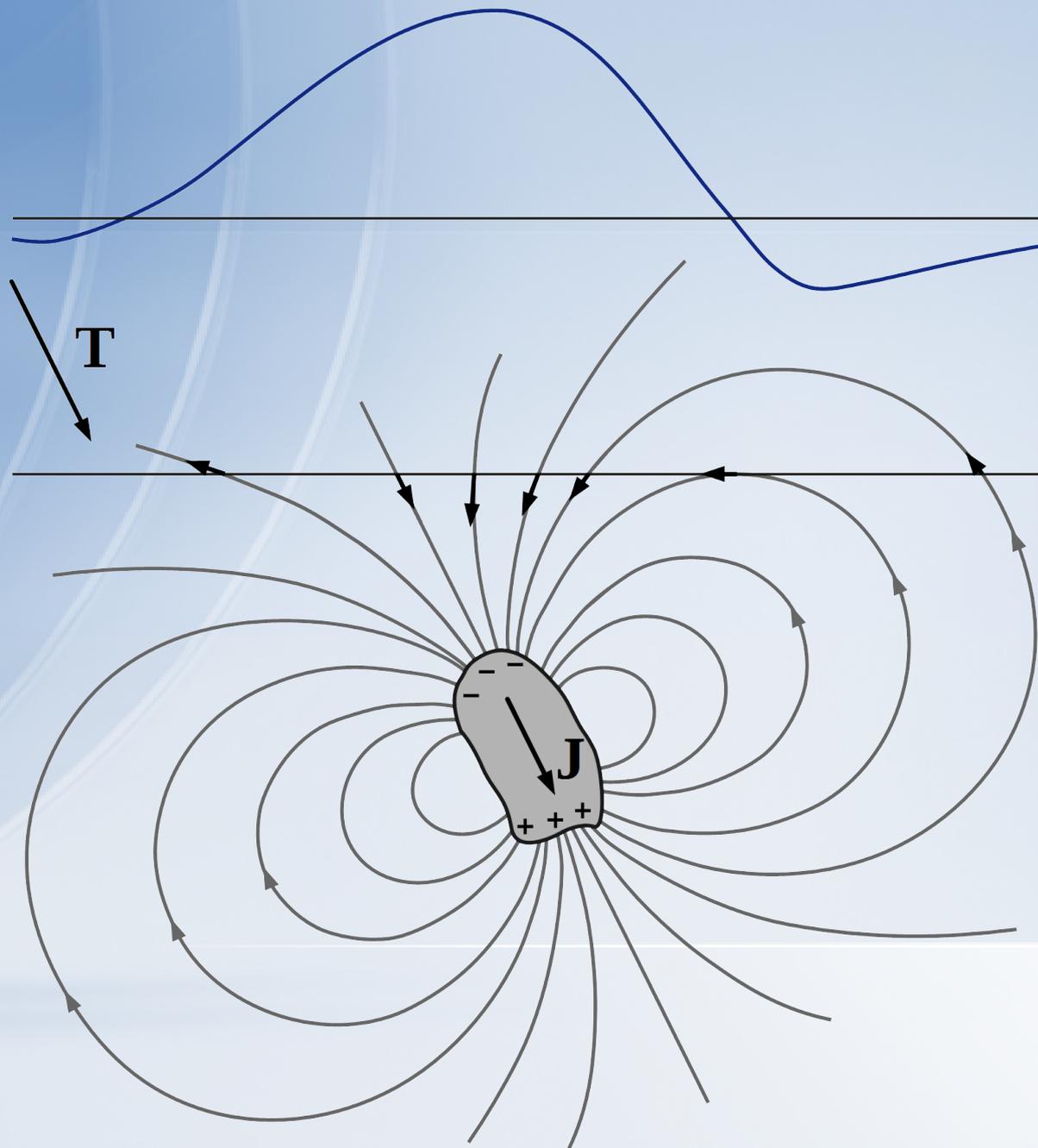
$H_m$



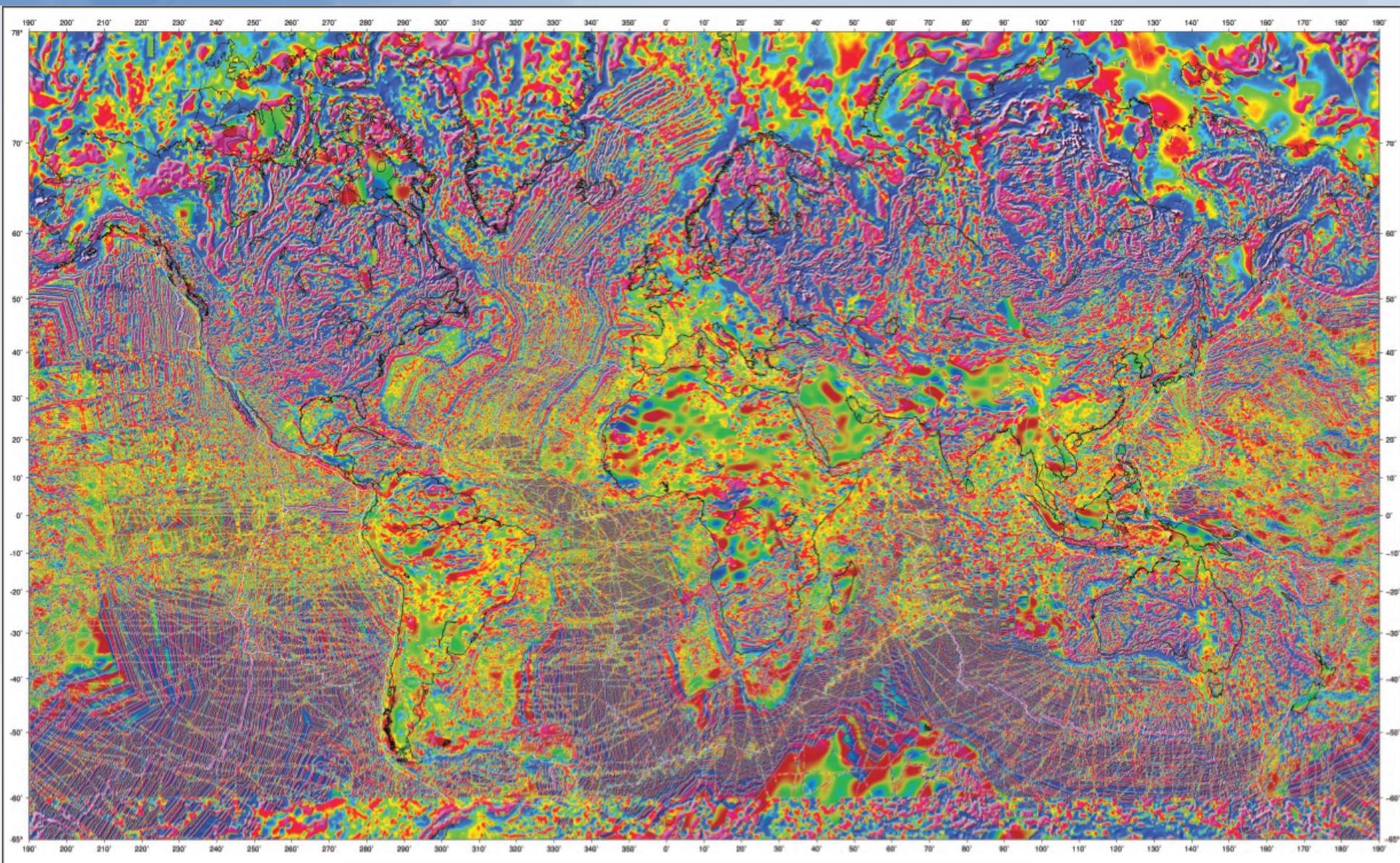


В структуре магнитного поля Земли хороши видны аномалии над материками.

$\overline{H}_a$

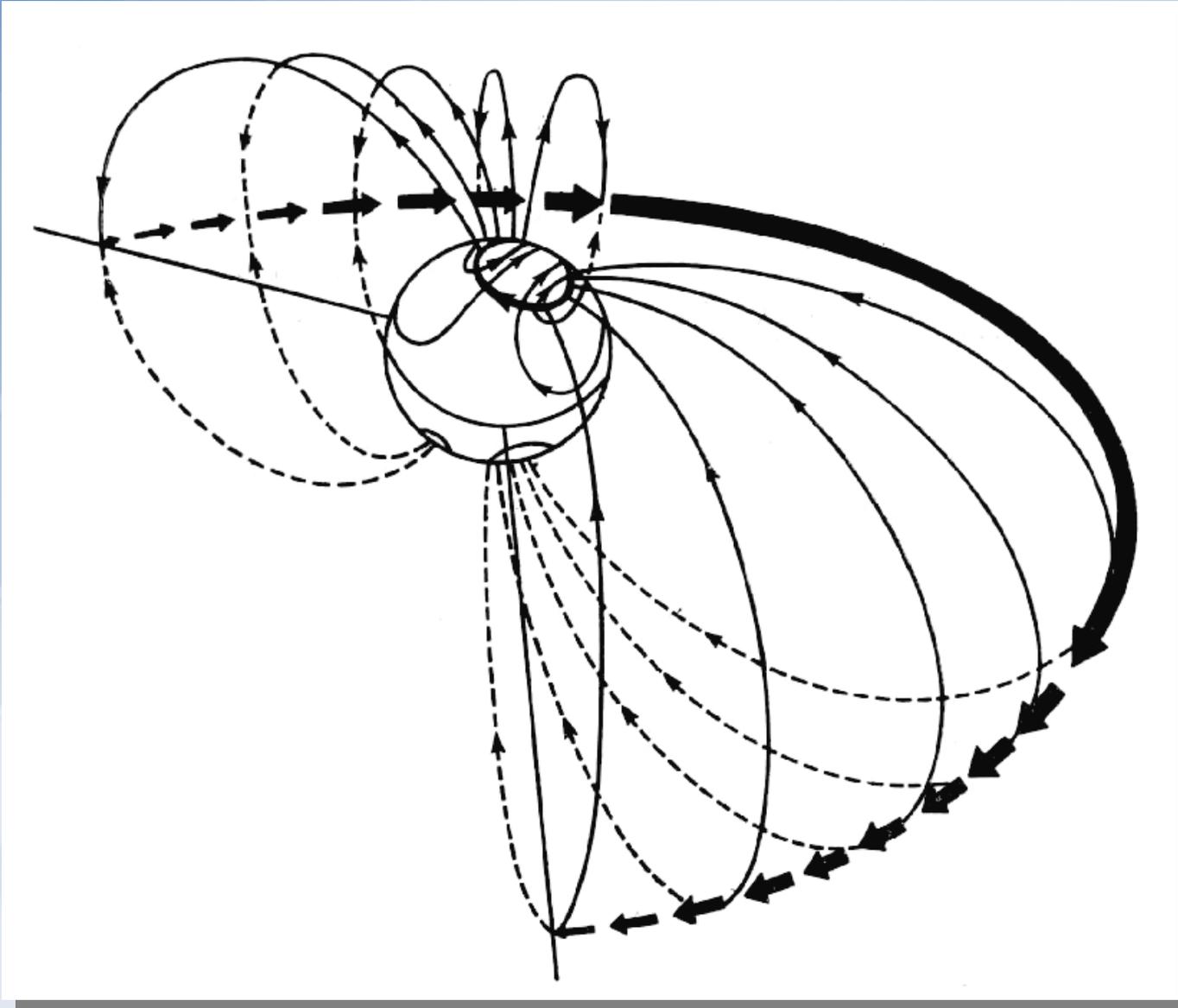


Магнитная аномалия от индуктивно намагниченного тела

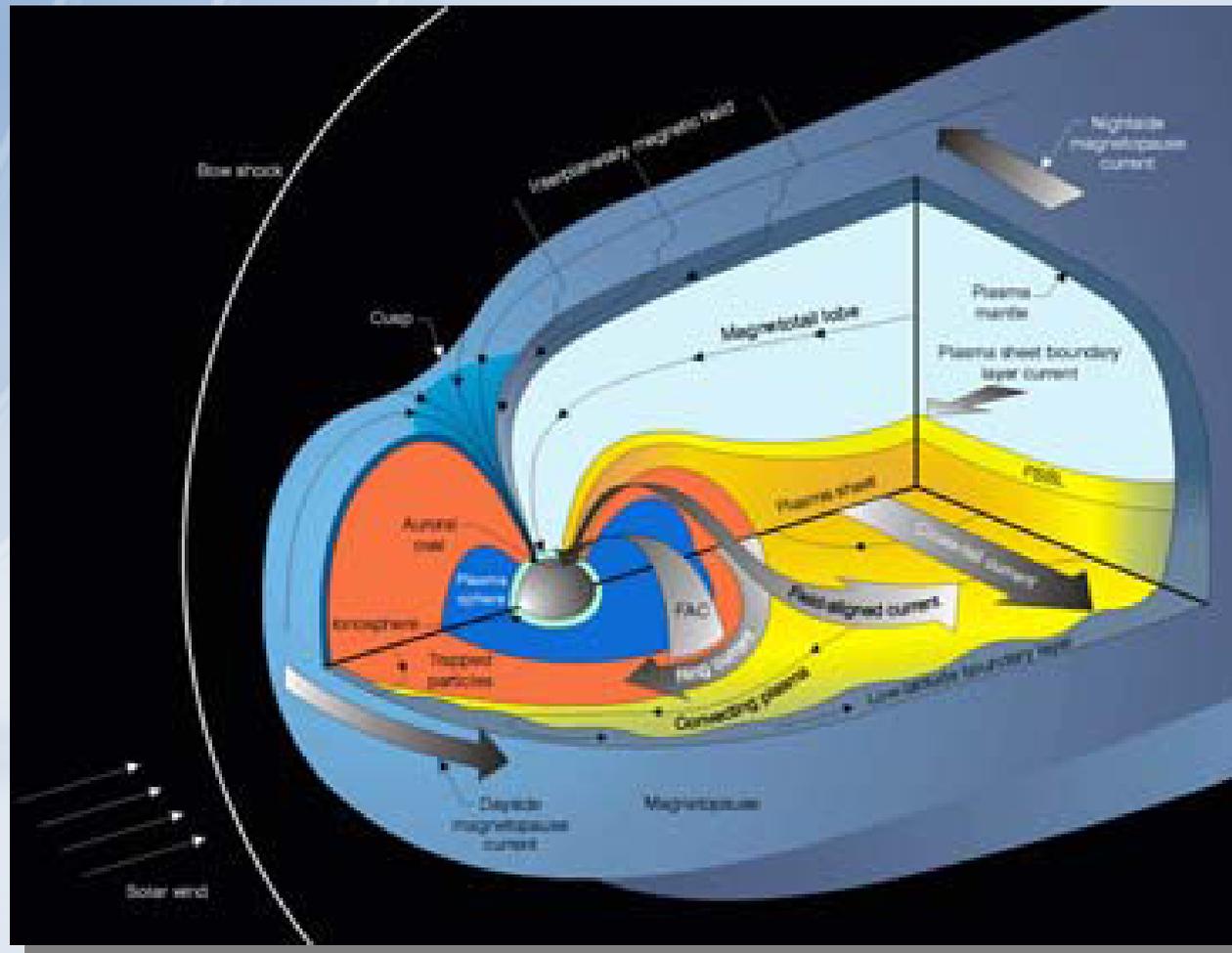


Карта аномального магнитного поля Земли

$\vec{H}_e$



# 1.4. Происхождение магнитного поля Земли



## Постоянная намагниченность (модель Гильберта, 1600 г.)

Намагниченность, необходимую для создания поля, напряженность которого равна напряженности главного магнитного поля Земли, можно определить из формулы

$$M = JV,$$

если  $M = 8,2 \cdot 10^{22}$  А/м, а  $V \approx \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} 3,14 \cdot (6,37^6)^3 = 1 \cdot 10^{21}$  м<sup>3</sup>

$$J = \frac{M}{V} \approx 80 \text{ А/м}$$

Магнитная восприимчивость пород, имеющих такую намагниченность должна быть слишком велика, поэтому гипотеза не может соответствовать действительности.

# Гипотеза ферромагнитного гироскопа

Высказана Альбертом Эйнштейном.

**Суть:** каждый атом ферромагнитного тела представляет из себя ферромагнитный гироскоп, который обладает кроме механического момента еще и магнитным моментом, совпадающим по направлению с механическим. Поэтому, при вращении какого-либо ферромагнитного тела, например стрежня, атомы-гироскопы будут обладать механическим моментом, который будет стремиться сориентировать свою ось по направлению оси вращения тела и последнее намагничивается. Возникающее магнитное поле можно оценить по формуле

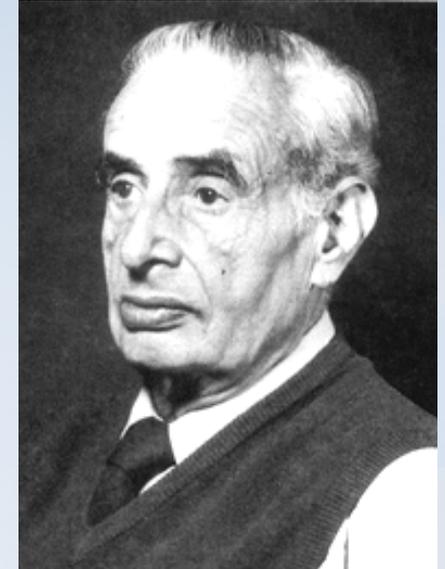
$$H = ct_e n / e$$

Где  $e$  – заряд электрона,  $t_e$  – масса электрона,  $n$  – число оборотов стрежня в секунду,  $c$  – скорость света.

Опыты показали, что намагниченность получается близкой к теоретической. Тогда, принимая для Земли  $n = (1/8,6) \cdot 10^{-4}$  1/с, получим величину намагниченности  $J \approx 2 \cdot 10^{-8}$  А/м, что существенно меньше намагниченности Земли. Поэтому данная теория себя не оправдала.

# Гипотеза Вальтера Эльзассера

Эльзассер предположил, что внутри ядра вследствие разности температур возникает вихревое движение, первоначально направленное вертикально, то есть по нормали к поверхности Земли. Под влиянием силы Кориолиса, которая перпендикулярна скорости движения жидкости, вихревые кольца располагаются в среднем в плоскостях, перпендикулярных оси вращения.



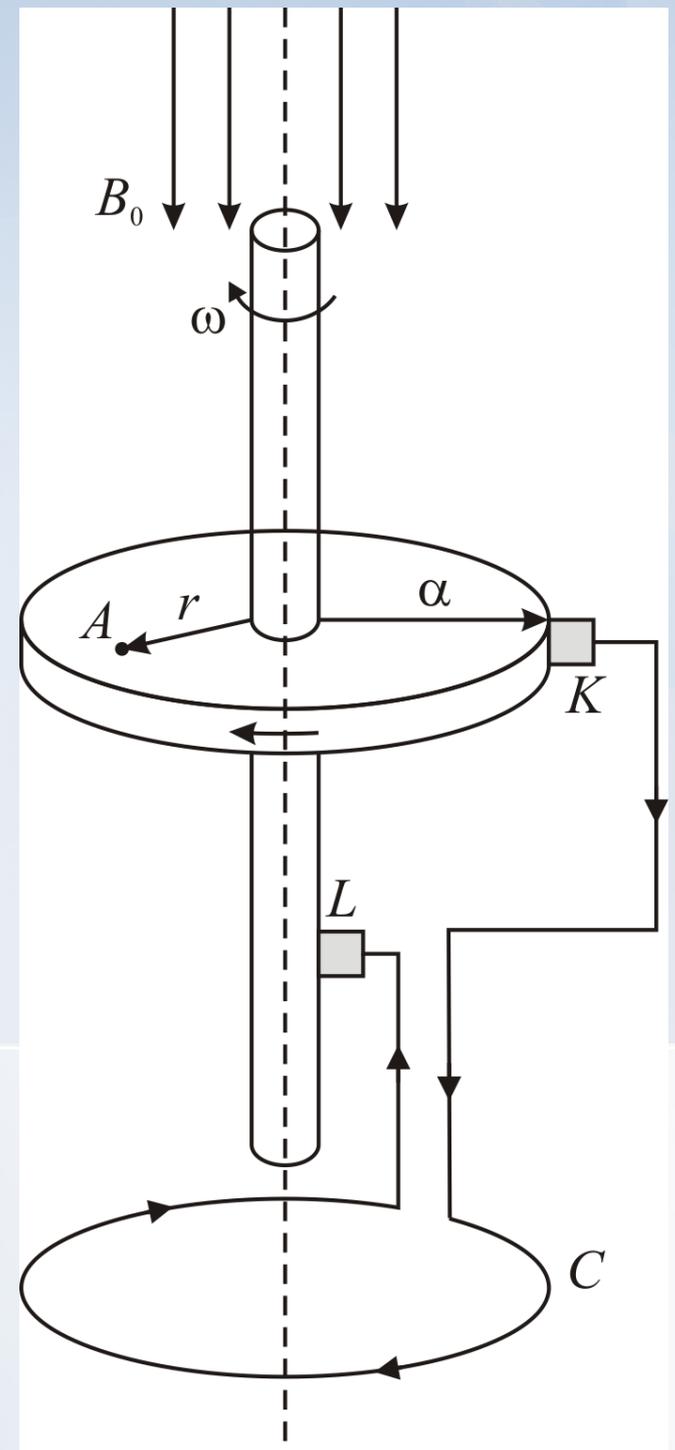
Вальтер Мориц  
Эльзассер

# Теория магнитного гидродинамо

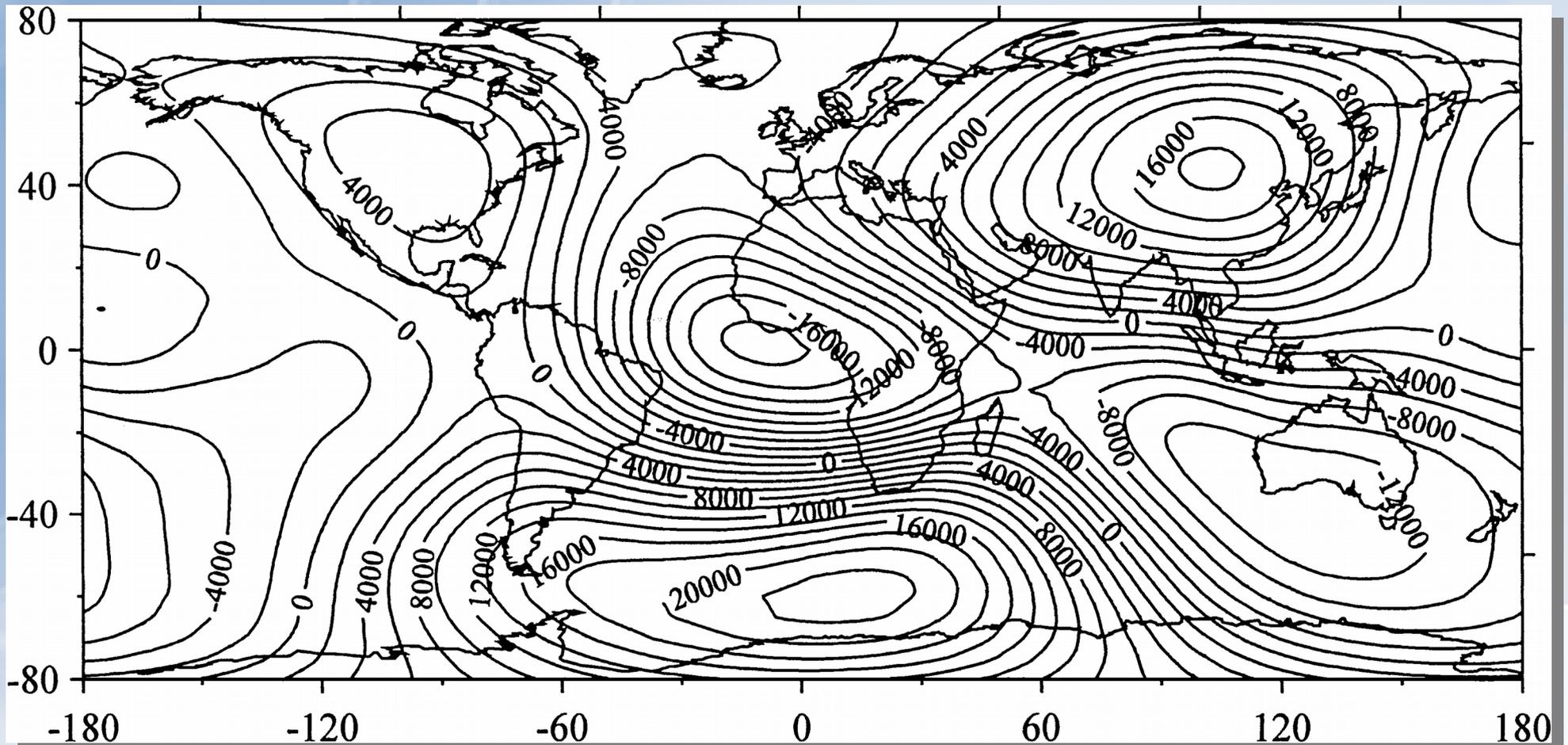
Гипотеза была высказана советским физиком Яковом Френкелем, который предположил, что образование токов в ядре должно происходить путем индукции при вихревом движении металлических масс ядра в магнитном поле, которое создается самими токами и непрерывно ими регенерируется. Подобный процесс происходит в динамо-машинах, поэтому сама теория получила название *динамо-эффекта*.



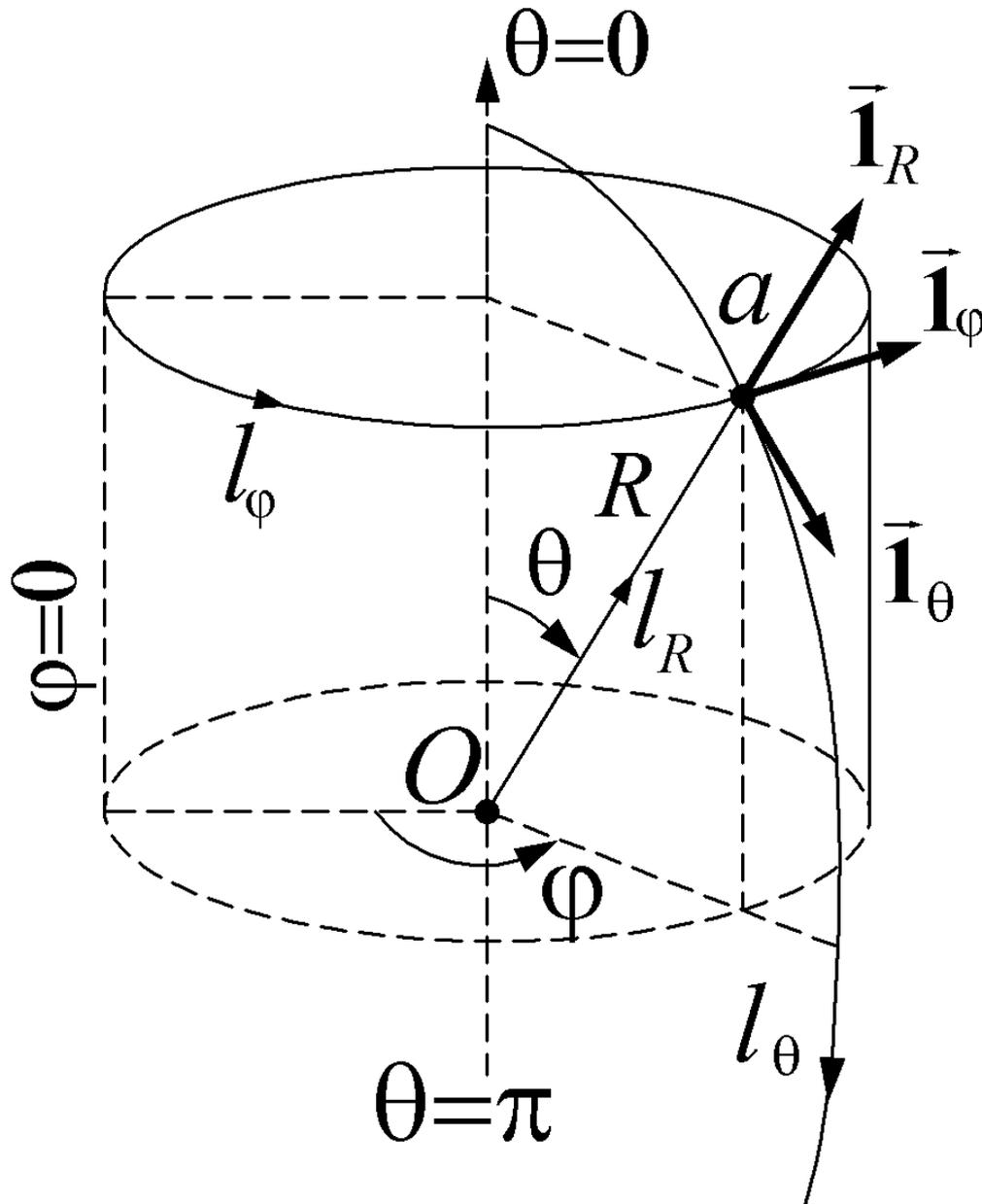
Яков Ильич  
Френкель



# 1.5. Аналитическое представление и модели МПЗ



# Сферическая система координат



Из декартовой системы  $x, y, z$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\theta = \arctg(\sqrt{x^2 + y^2} / z)$$

$$\varphi = \arctg(y/x)$$

Из цилиндрической системы  $r, \varphi, z$

$$R = \sqrt{r^2 + z^2}$$

$$\theta = \arctg(r/z)$$

$$\varphi = \varphi$$

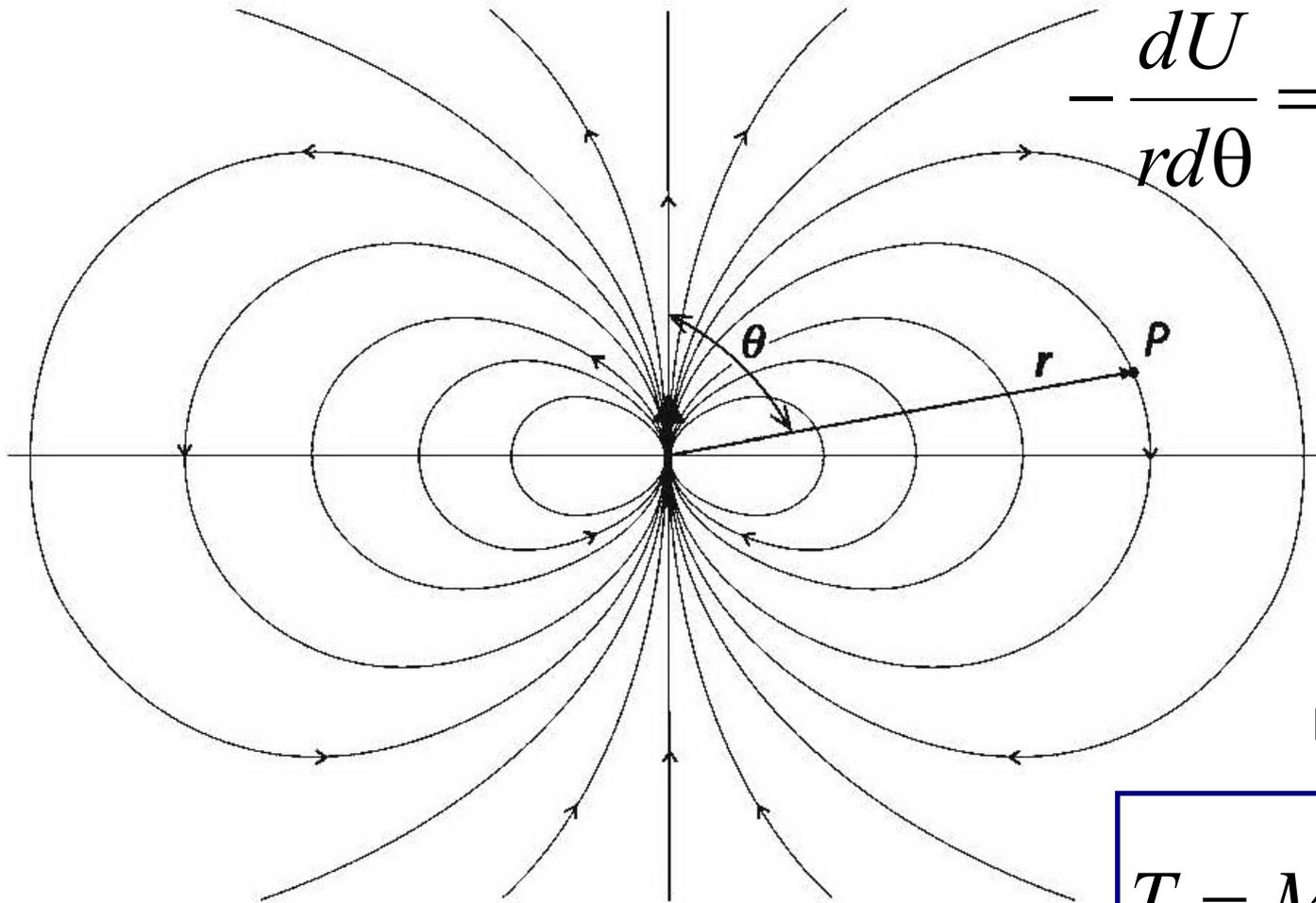
# Поле диполя в сферических координатах

$$U = M \frac{1}{r^2} \cos \theta$$

Компоненты

$$-\frac{dU}{dr} = Z = 2M \frac{1}{r^3} \cos \theta$$

$$-\frac{dU}{rd\theta} = H = M \frac{1}{r^3} \sin \theta$$



Полный вектор

$$T = M \frac{1}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}$$

# Модели нормального магнитного поля Земли

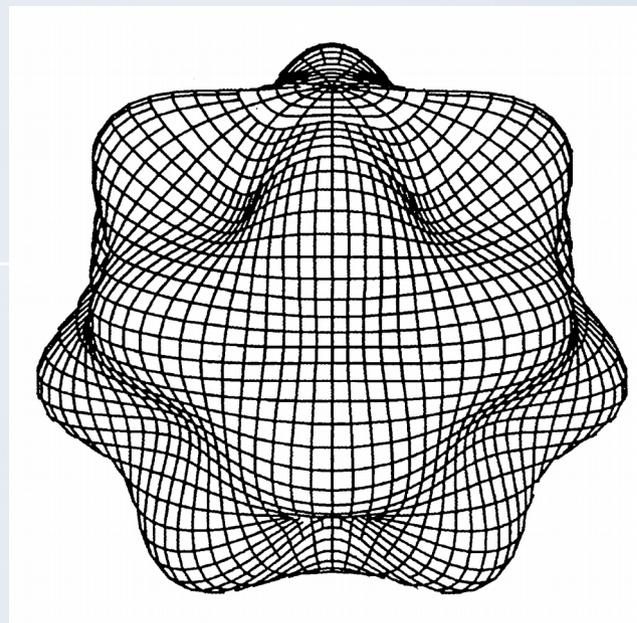
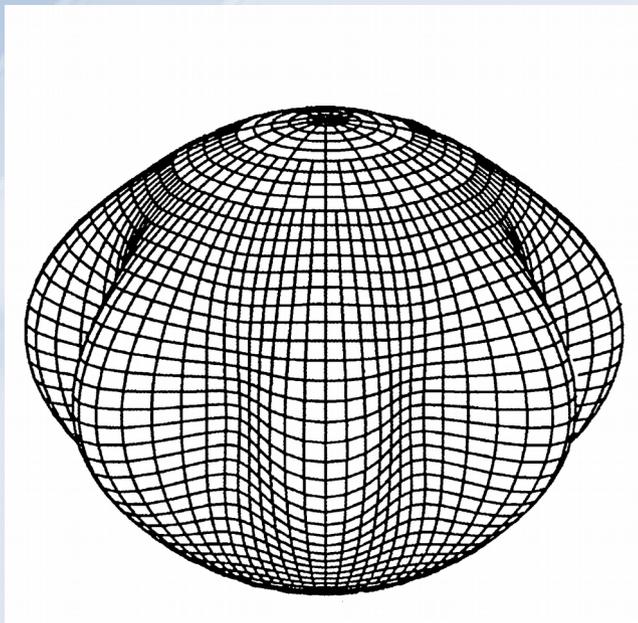
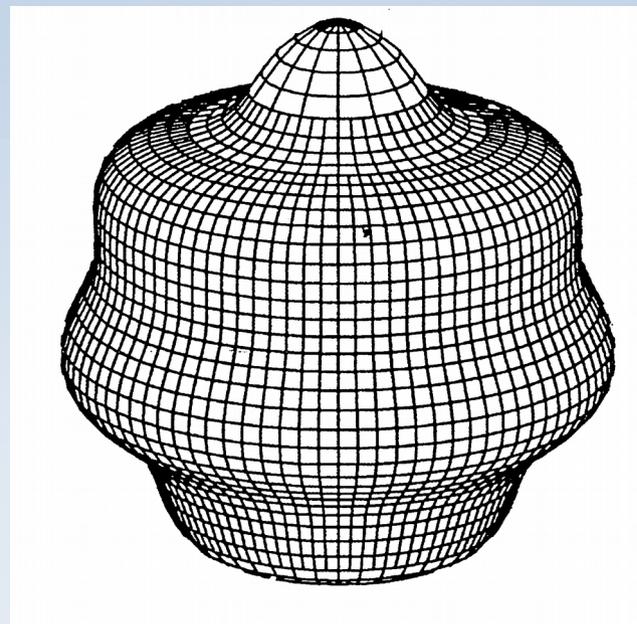
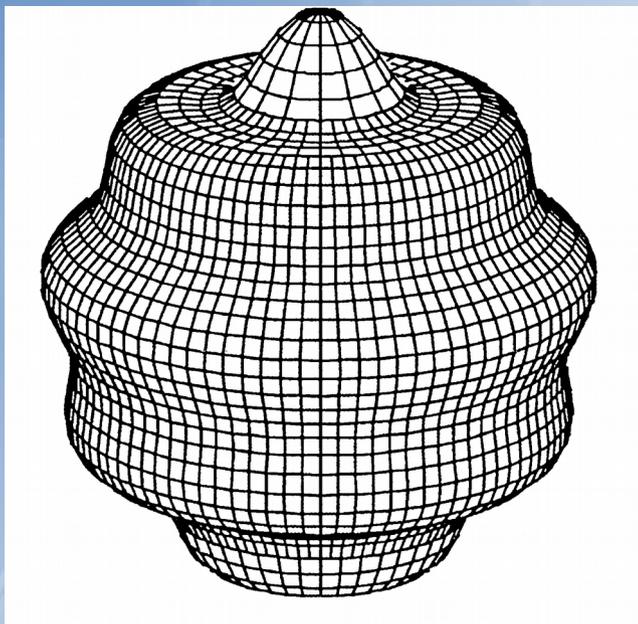
Эмпирические  
(IGRF)

Полуэмпирические  
(TMFM)

Для расчетов в IGRF используется ряд Гаусса:

$$U(r, \theta, \lambda, t) = \sum_{n=1}^N \left( \frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n \left( g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda \right) P_n^m \cos \theta$$

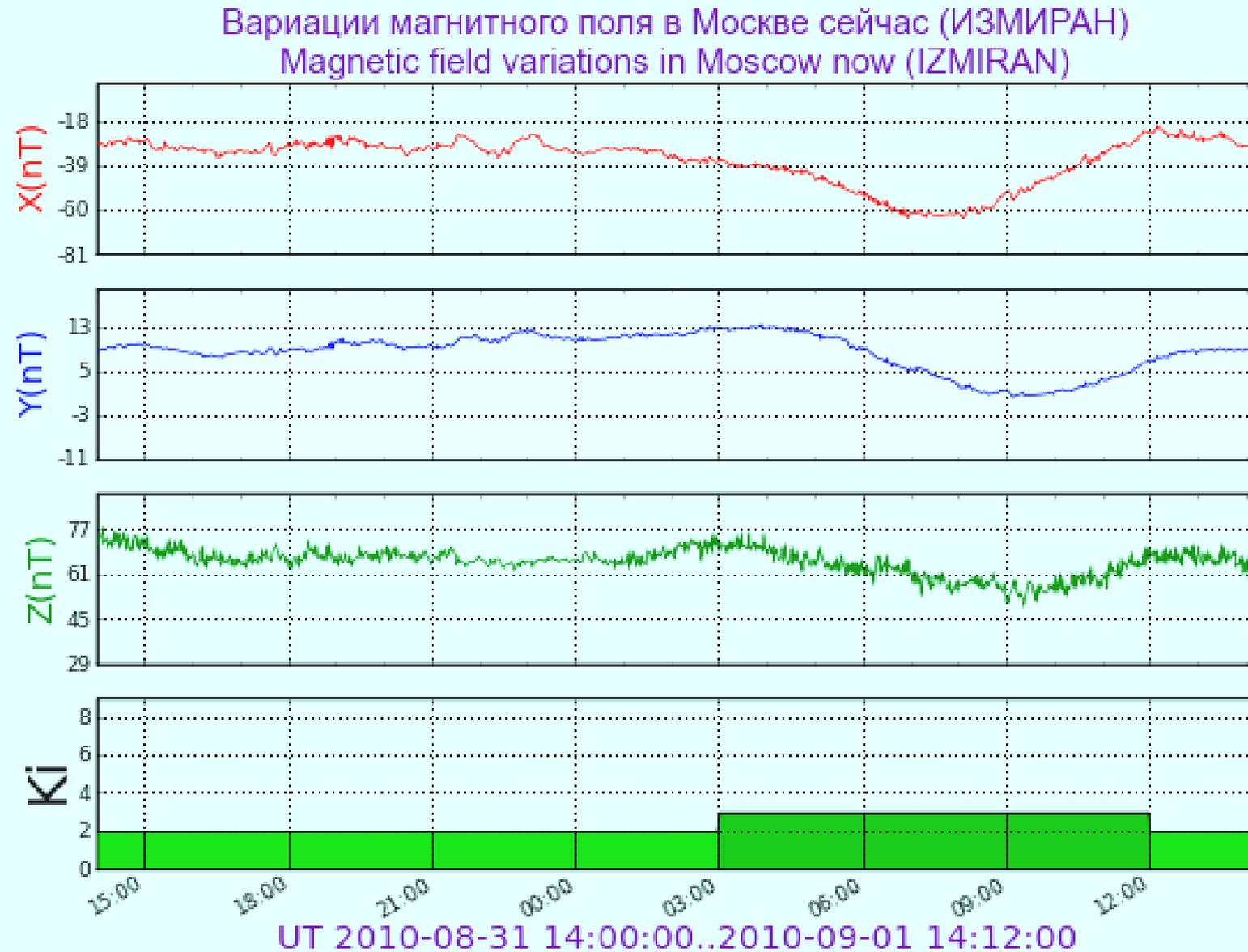
# Некоторые сферические гармоники дипольного магнитного поля



# Поколения модели IGRF

Поколение модели	Год принятия	Предел расчетов	По данным
1	2	3	4
IGRF-12	2015	1900-2020	1945-2015
IGRF-11	2010	1900-2015	1945-2010
IGRF-10	2005	1900-2010	1945-2000
IGRF-9	2003	1900-2005	1945-2000
IGRF-8	1999	1900-2005	1945-1990
IGRF-7	1995	1900-2000	1945-1990
IGRF-6	1991	1945-1995	1945-1985
IGRF-5	1987	1945-1990	1945-1980
IGRF-4	1985	1945-1990	1965-1980
IGRF-3	1981	1965-1985	1965-1975
IGRF-2	1975	1955-1980	-
IGRF-1	1969	1955-1975	-

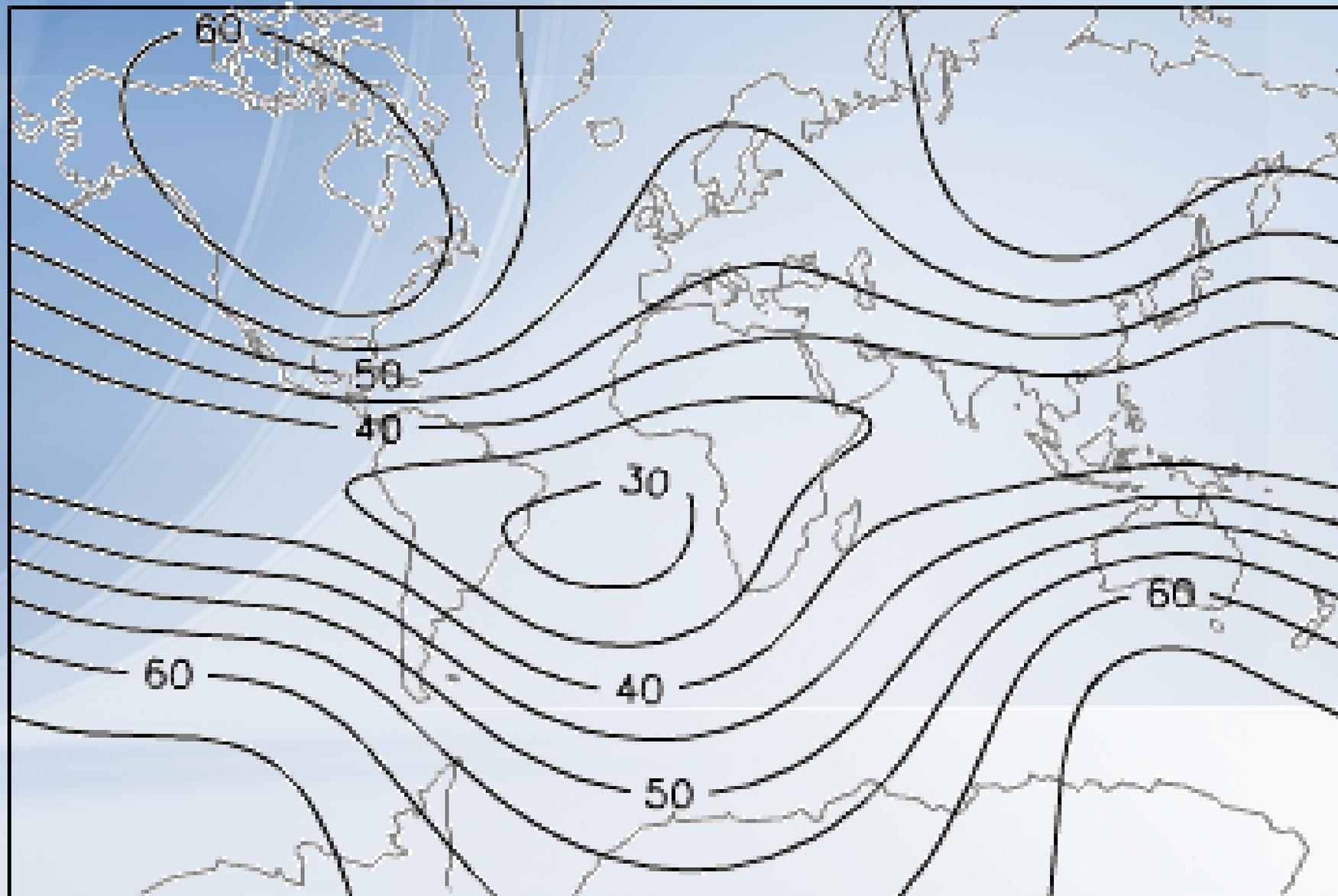
# 1.6. Вариации магнитного поля Земли



		Вариация	Период	нТл
Магнитные бури	Возмущенные	Периодические: возмущенные солнечносуточные и короткопериодические колебания (КПК)	24 ч 0,01 с – 100	1 - 100
		Непериодические: аperiодическая возмущенная вариация.	0,3 – 150 сек	0,1 – 300
		Бухтообразные	15 мин – 3 ч	До 1000
		Неправильные флюктуации – это следующие друг за другом изменения элементов земного магнетизма с различным периодом и амплитудой.	0,1 – 5000 сек	0,1 – 100
Быстрые	Спокойные	Солнечносуточные	24 ч	70
		Лунносуточные	25 ч	5
		Годовые	1 год	30
Медленные		Вековые вариации	100 лет	100

# 1840

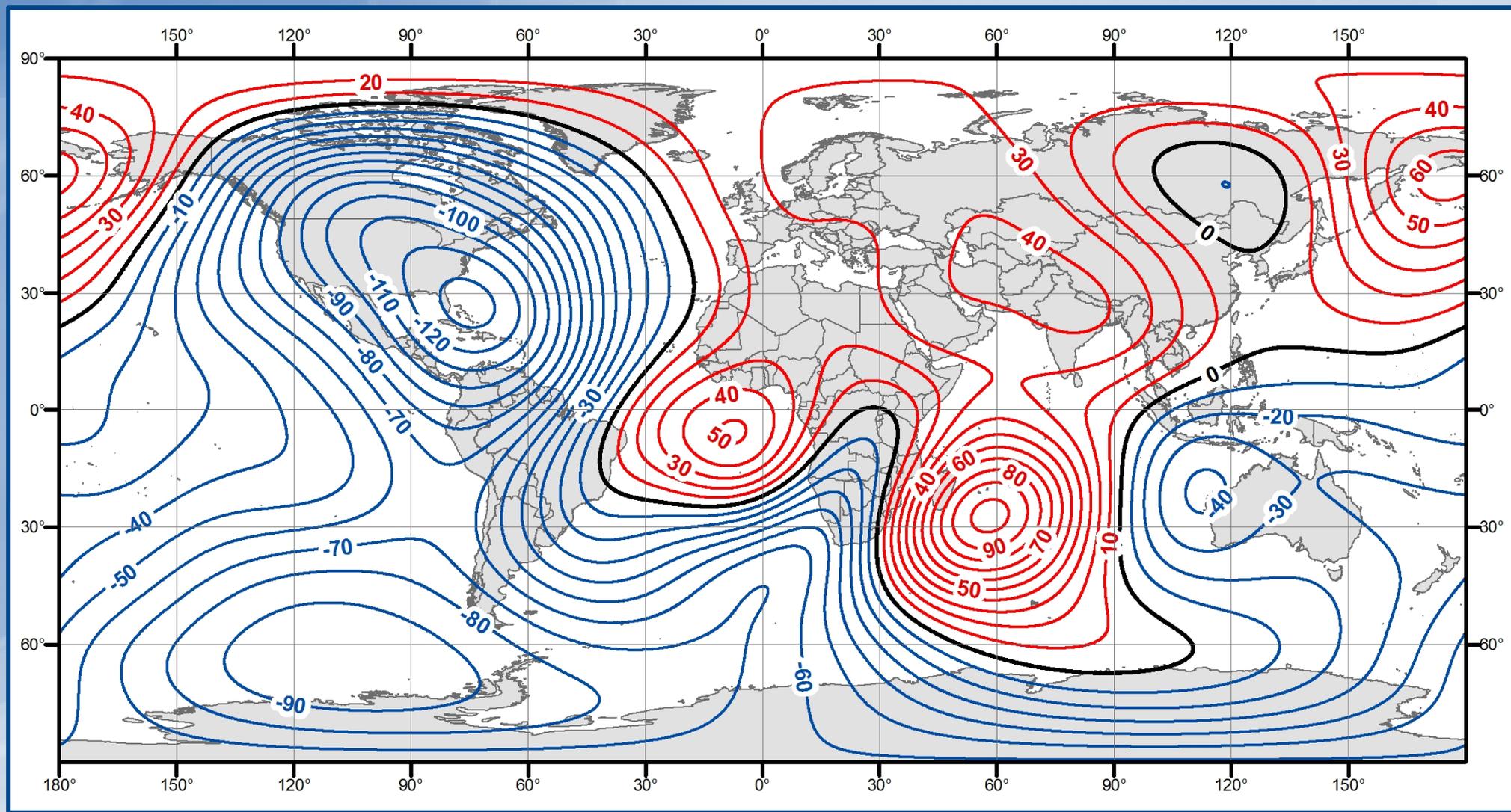
## Total Intensity (microTesla)



<http://geomag.usgs.gov>

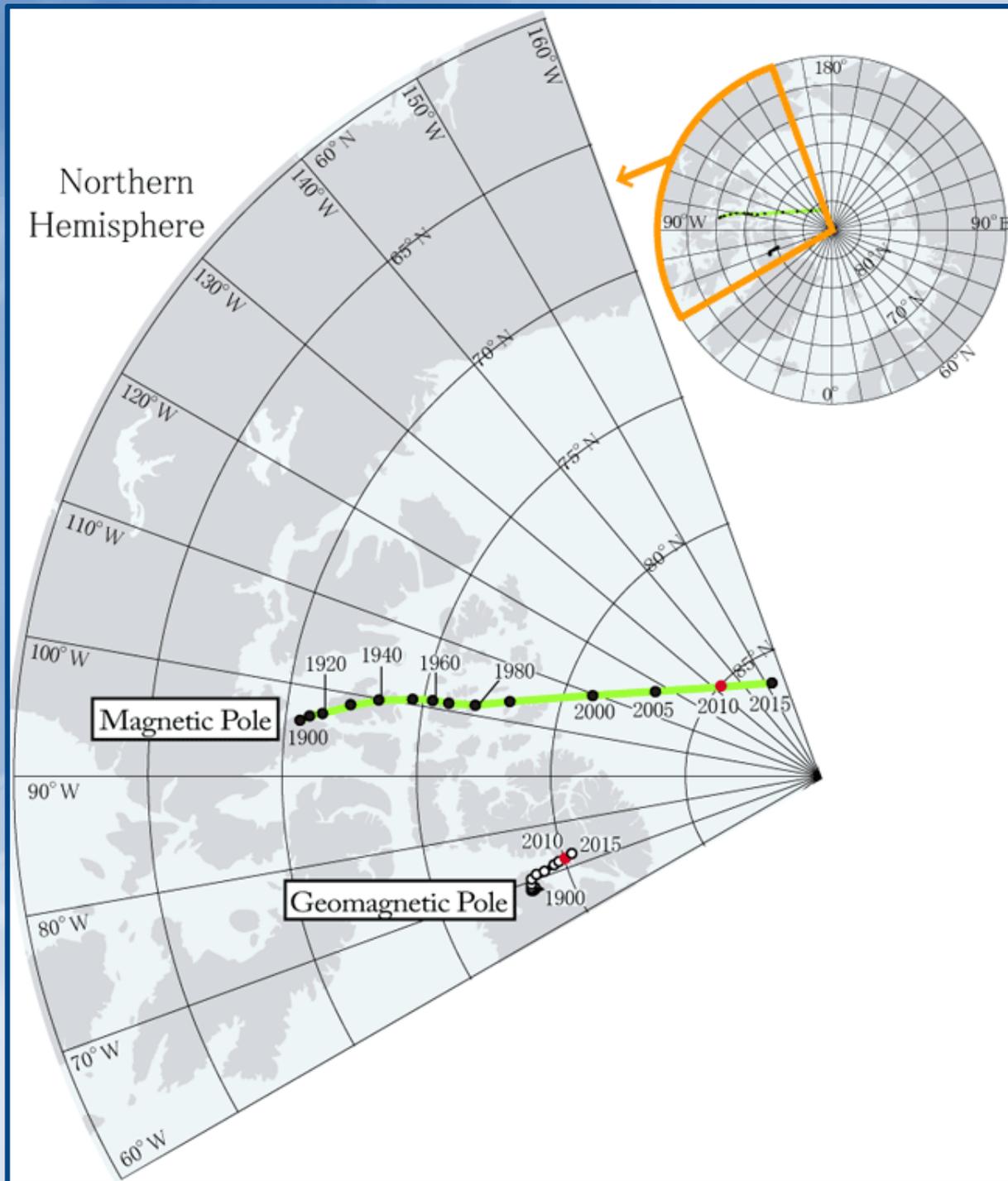
Model by A. Jackson, A. R. T. Jonkers, M. R. Walker,  
Phil. Trans. R. Soc. London A (2000), 358, 957–990.

# Карта изопор $T$ для эпохи 2010–2015 гг. по модели WMM2010 [по данным NOAA].



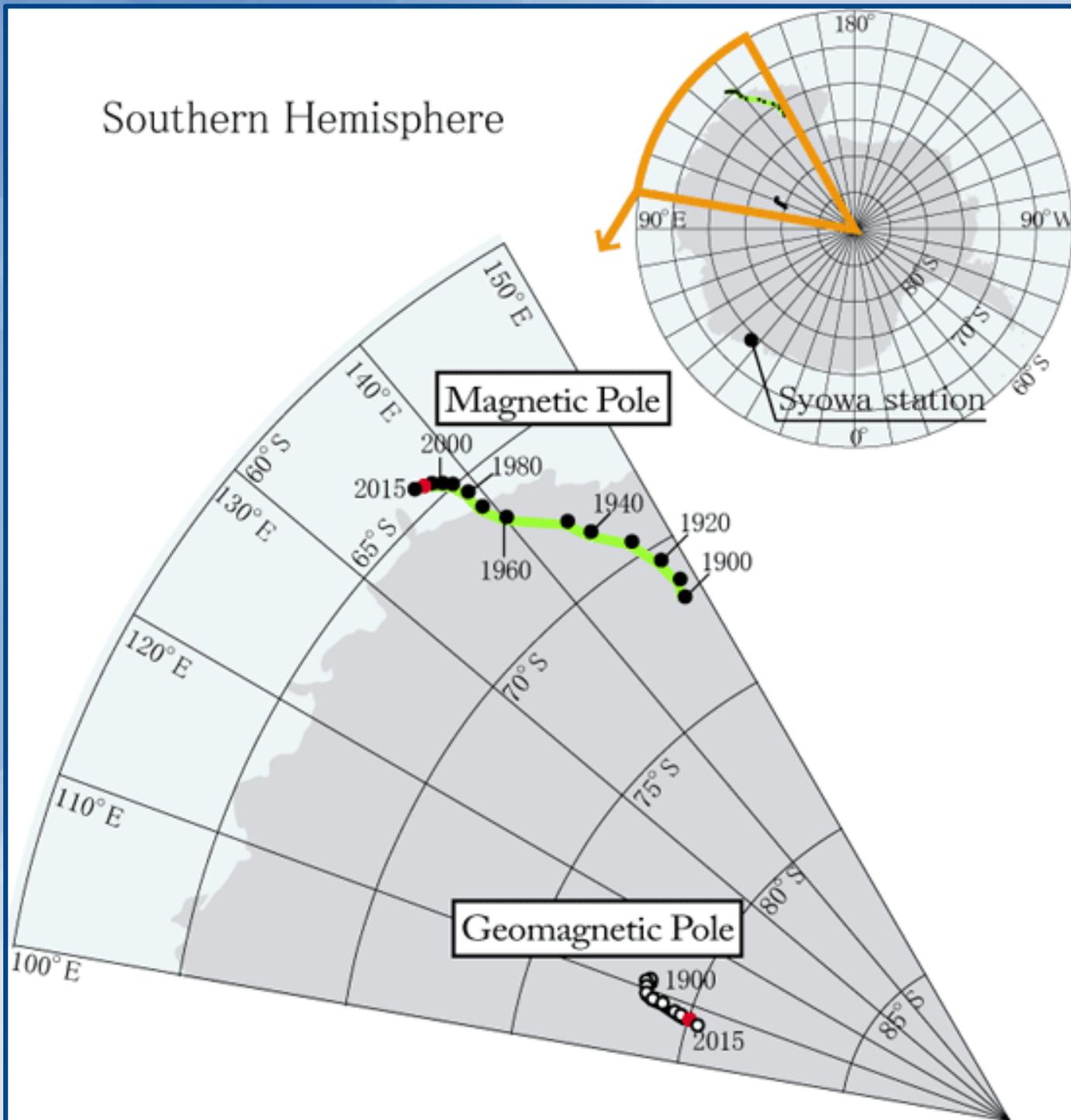
**Изопора** – линия равных скоростей изменения полного вектора магнитного поля.

**Центрами** или **фокусами векового** хода называют точки, где величина векового хода достигает максимального значения.



Миграция южного (условно северного) магнитного и геомагнитного полюса в северном полушарии (по модели IGRF-11).

## Southern Hemisphere



Миграция северного (условно южного) магнитного и геомагнитного полюса в северном полушарии (по модели IGRF-11).



**Конец главы 1**