

# 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)

1  
Наземные

2  
Воздушные

3  
Гидромагнитные

4  
Шахтные  
и подземные

*Вертолетные*

*Самолетные*

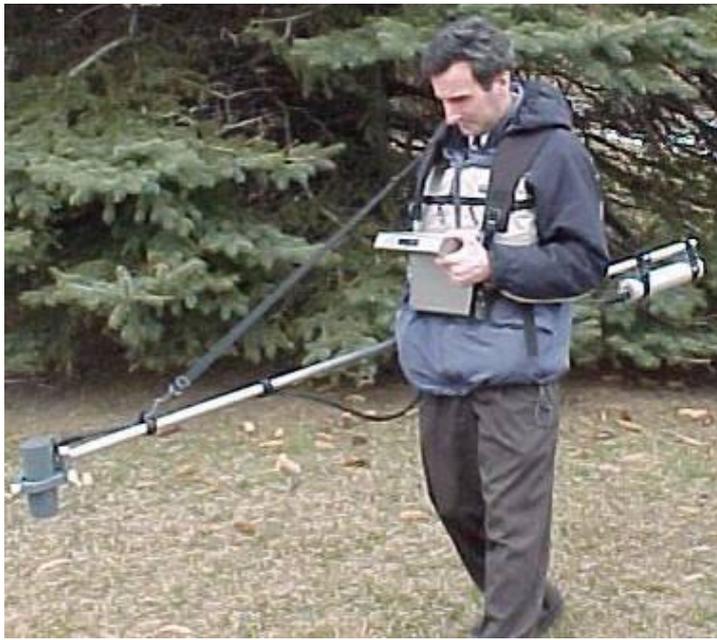
*Пешеходные*

*Велосипедные*

*Автомобильные*

*Обсерваторные*

*Спутниковые*



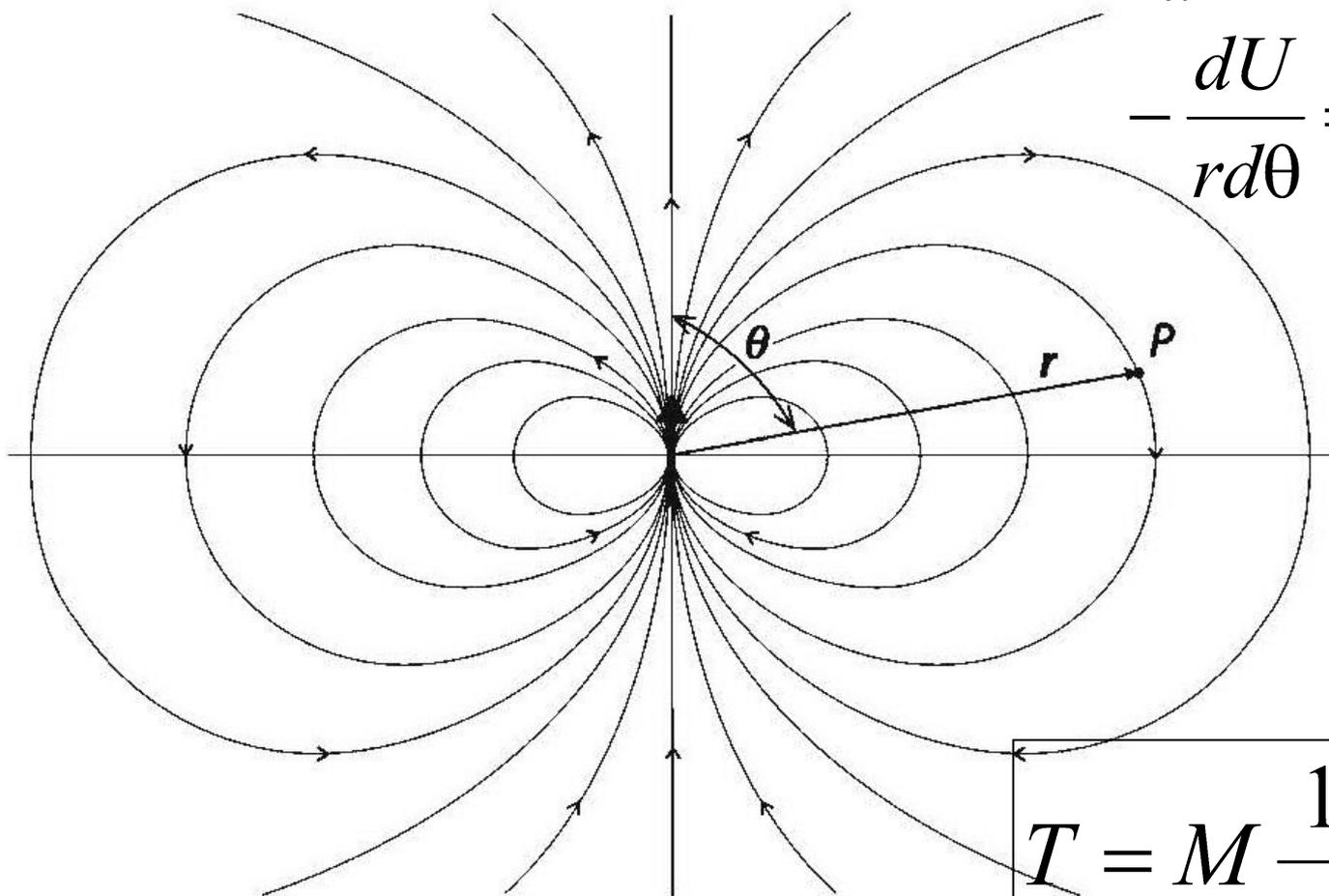
# Поле диполя в сферических координатах

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

Компоненты

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

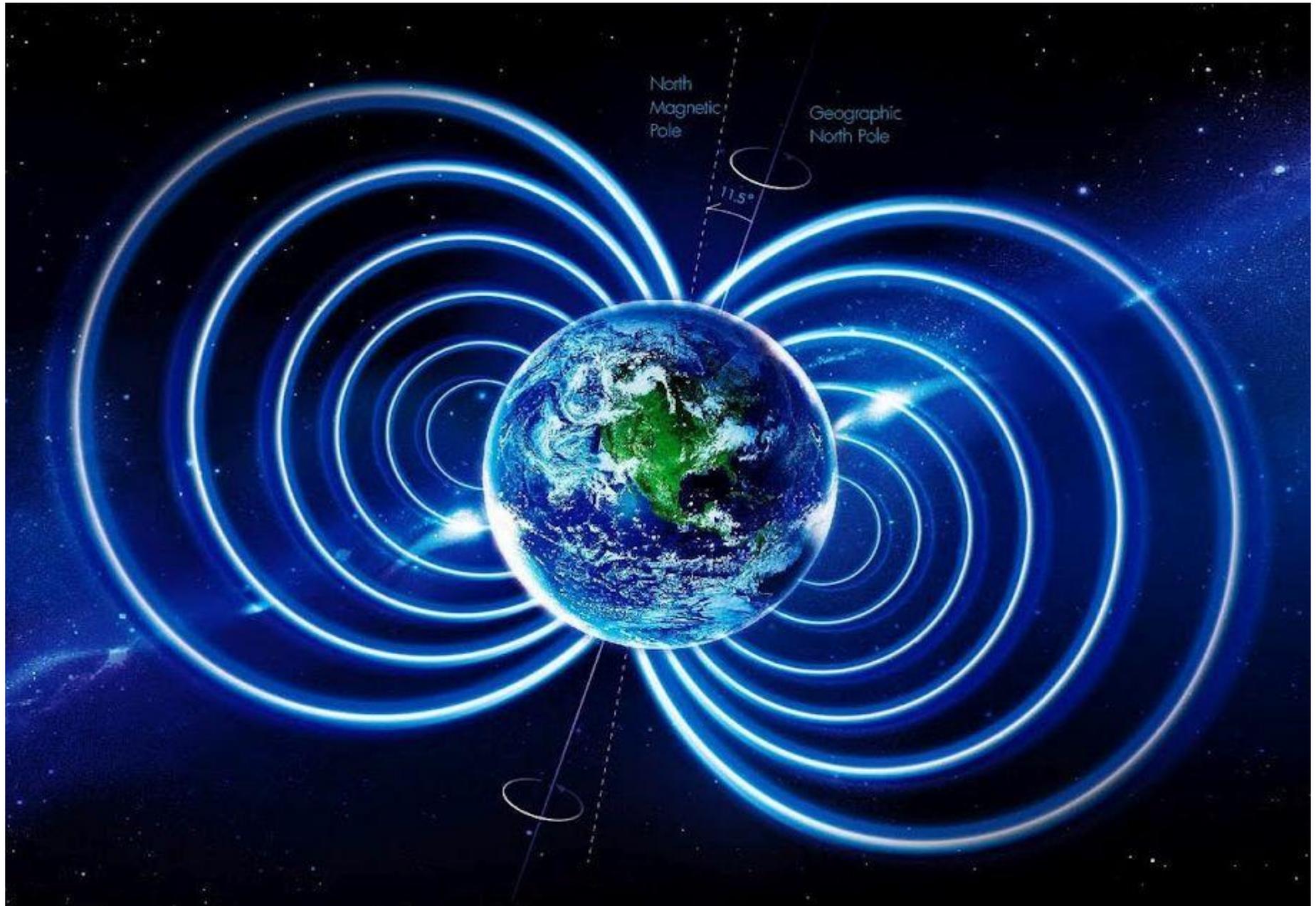
$$-\frac{dU}{rd\theta} = H = M \frac{1}{r^3} \sin \theta$$



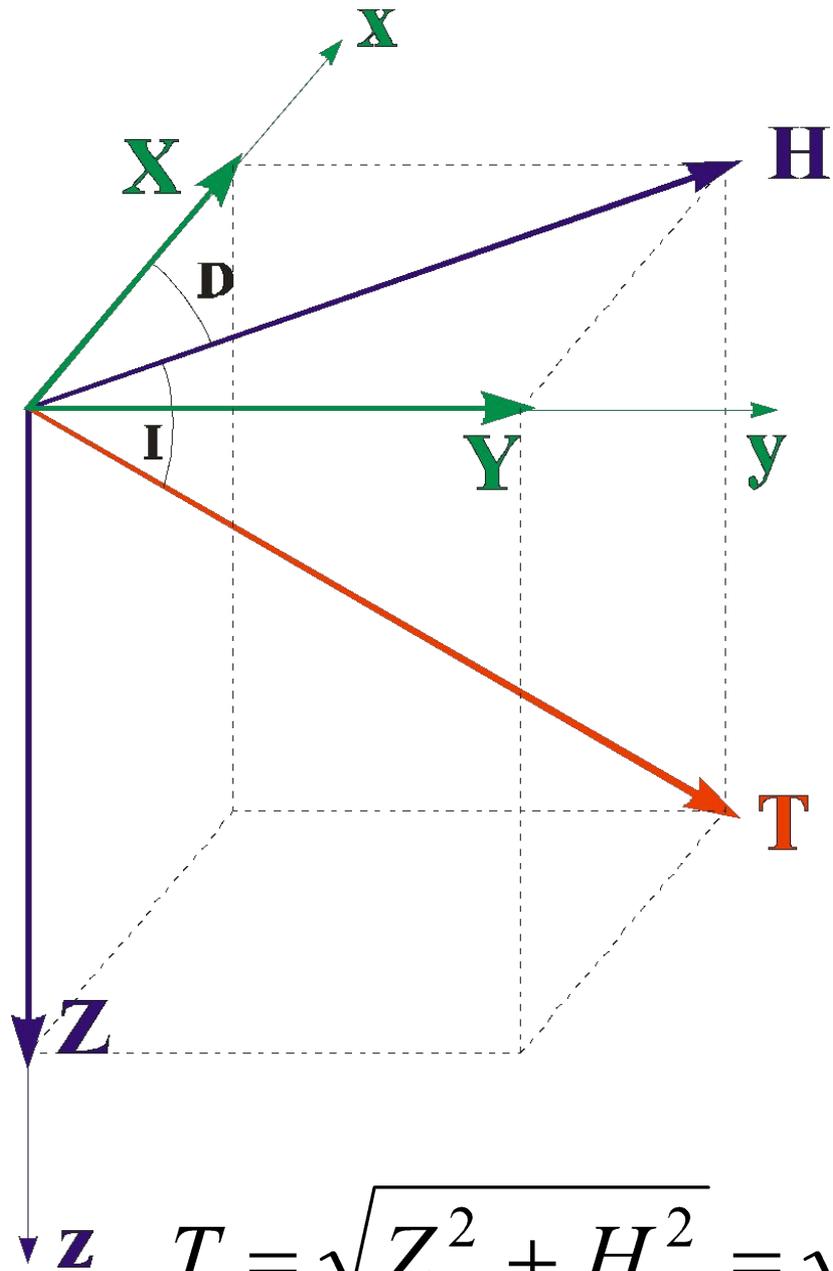
Полный вектор

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

# магнитное поле Земли

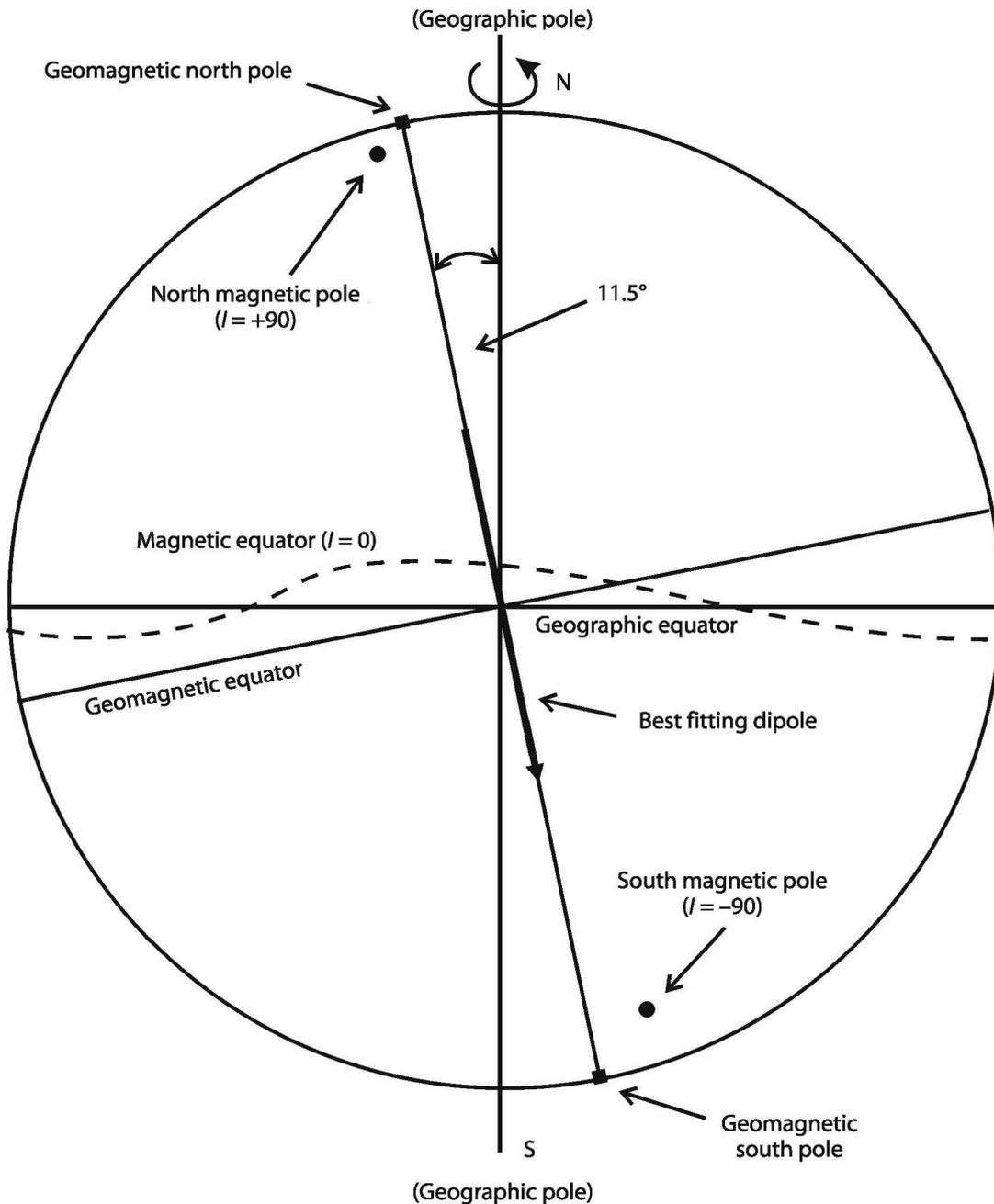


# Компоненты магнитного поля Земли

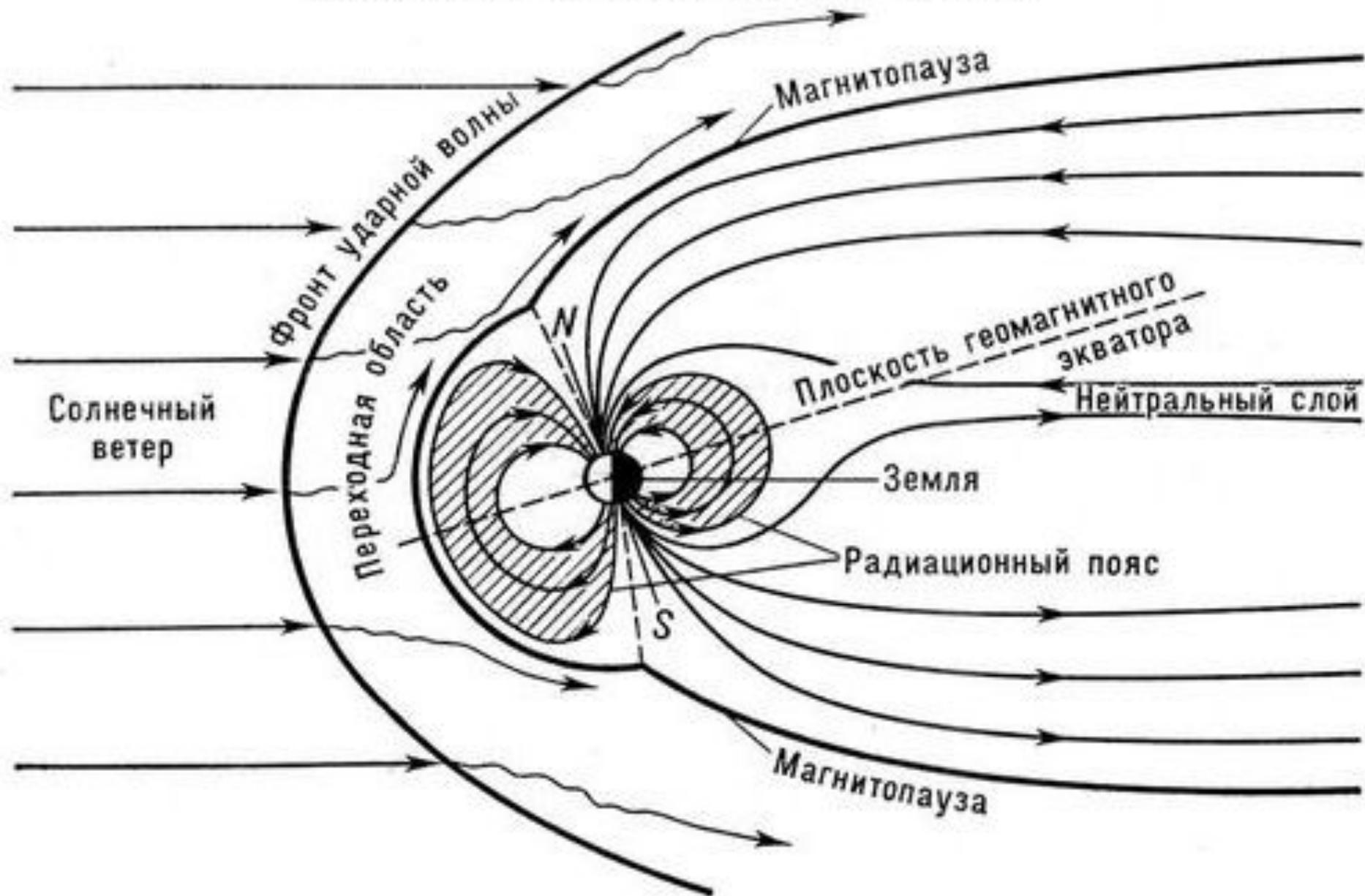


$$T = \sqrt{Z^2 + H^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

# Элементы магнитного поля Земли

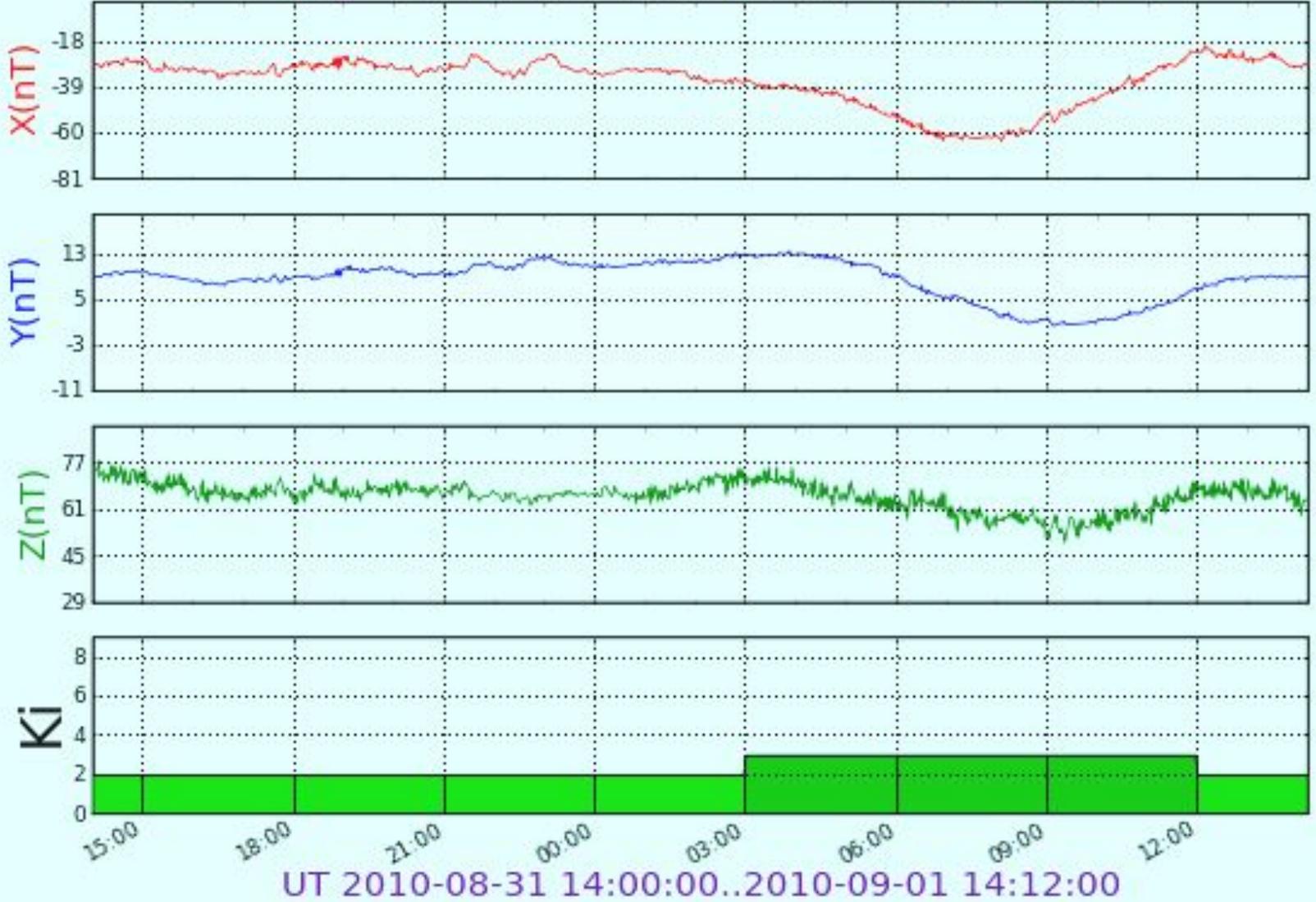


# Строение магнитосферы Земли.



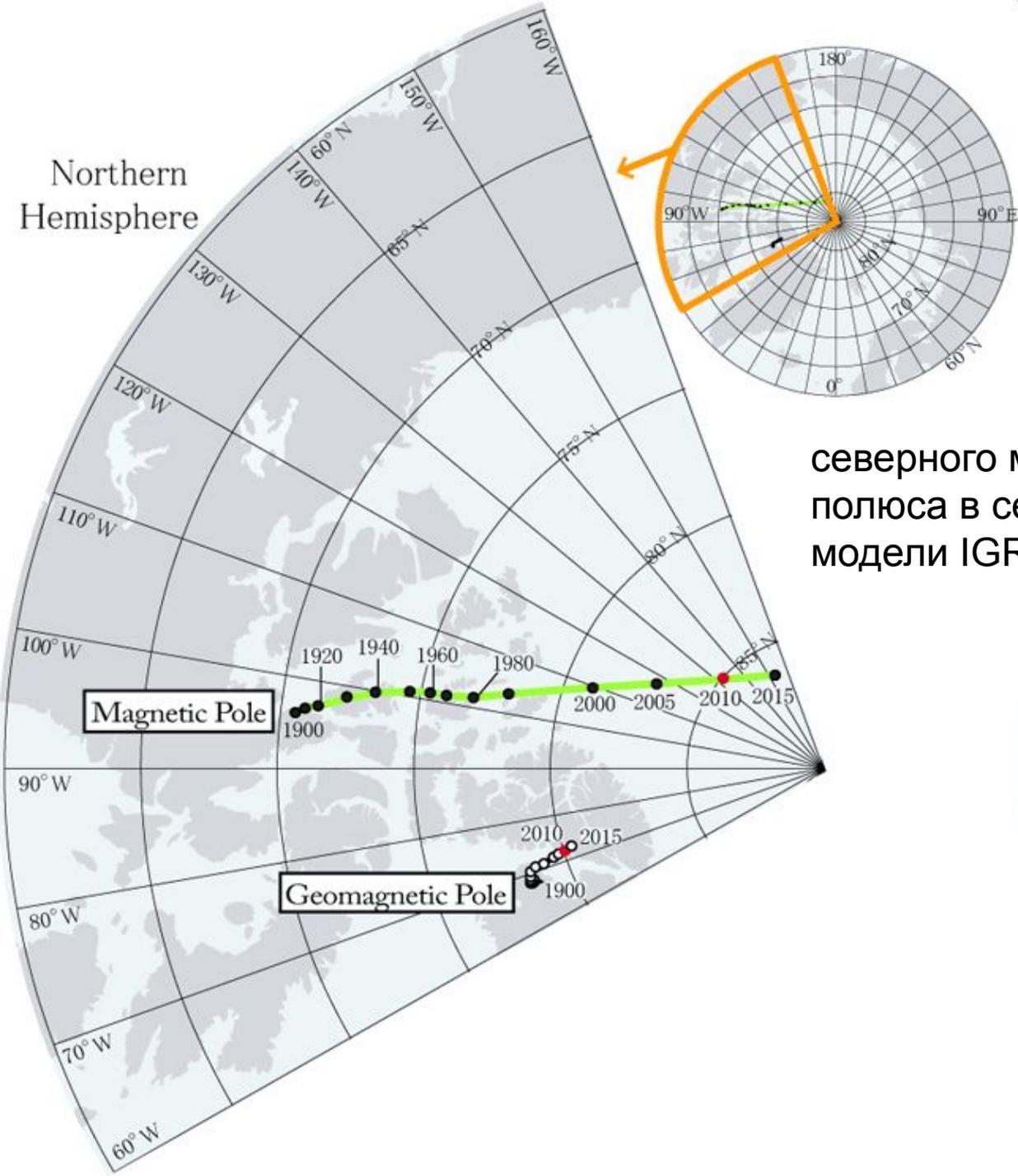
# Вариации магнитного поля Земли

Вариации магнитного поля в Москве сейчас (ИЗМИРАН)  
Magnetic field variations in Moscow now (IZMIRAN)



# Классификация вариаций 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



северного магнитного и геомагнитного полюса в северном полушарии (по модели IGRF-11)

# Нормальное и аномальное магнитное поле

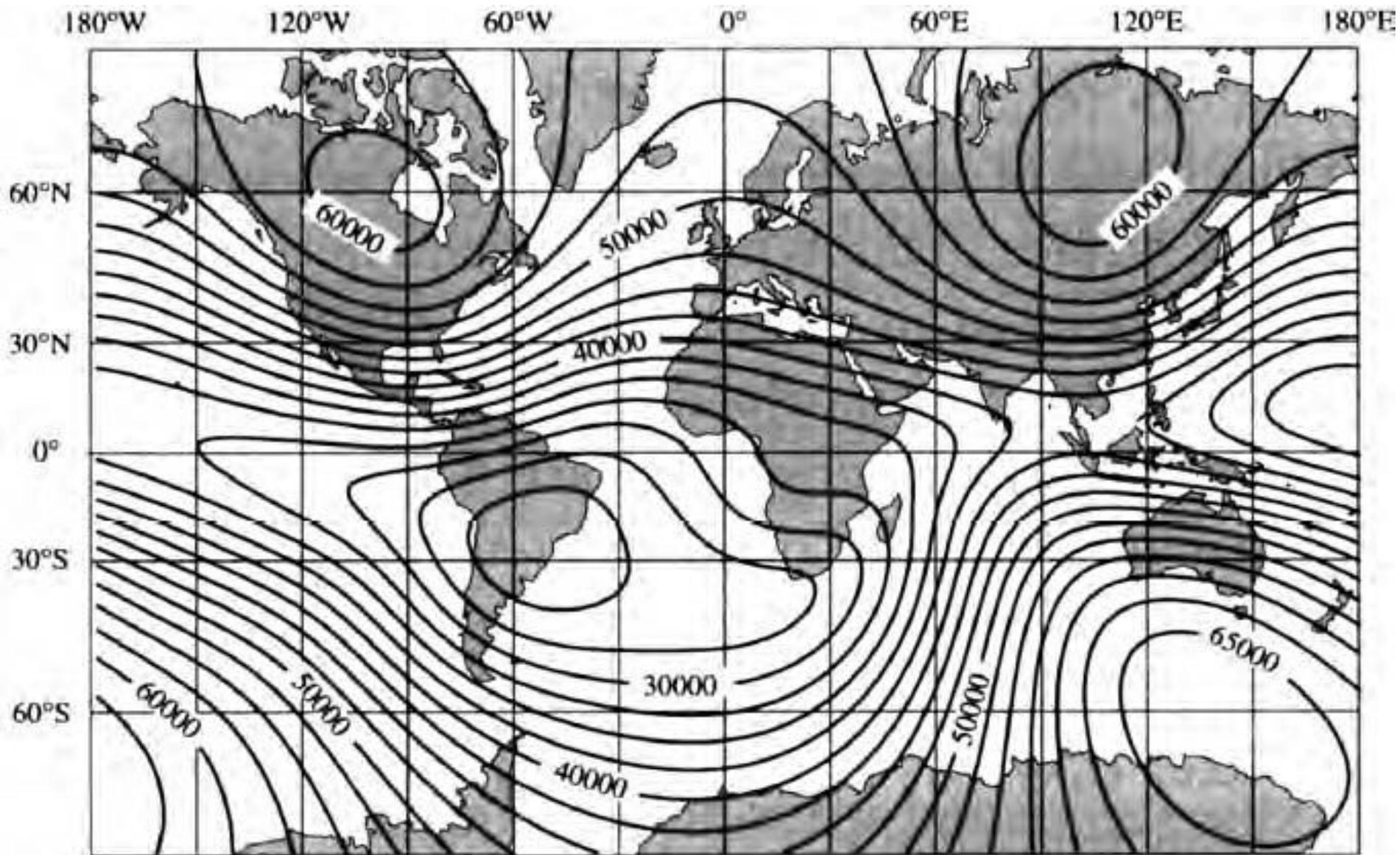
$$\vec{H}_T = \vec{H}_0 + \vec{H}_m + \vec{H}_a + \vec{H}_e + \delta\vec{H}$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_m \quad \text{– главное магнитное поле Земли}$$

$$\vec{H}_a = \vec{H}'_a + \vec{H}''_a \quad \text{– аномальное поле}$$

$$\vec{H}_n = \vec{H}_0 + \vec{H}_m + \vec{H}_e \quad \text{– нормальное поле Земли}$$

# нормальное магнитное поле Земли



# **Модель нормального магнитного поля Земли**

к

# Магнитные свойства горных пород и руд

## *Магнитные параметры среды*

Величина	Обозн.	Размерность СИ	Размерность СГС	Связь СГС и СИ
1	2	3	4	5
Намагниченность	$\vec{J}(\vec{I})$	ампер/метр (А/м)	ед. СГС · см <sup>-3</sup>	1 А/м = 10 <sup>-3</sup> СГС · см <sup>-3</sup>
Магнитная проницаемость абсолютная	$\mu_a$	генри/метр (Гн/м)	1 СГС	4 · 10 <sup>-7</sup> Гн/м = 1 СГС
Магнитная проницаемость относительная	$\mu (\mu_{отн})$	Безразмерная	Безразмерная	-
Магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная)	$\mu_0$	генри/метр (Гн/м)	ед. СГС	4 · 10 <sup>-7</sup> Гн/м = 1 СГС
Магнитная восприимчивость	$\chi$	ед. СИ	ед. СГС	1 ед.СИ = 4π ед. СГС

# Магнитные свойства вещества

**Магнетизм**

*Диамагнетизм*

*Парамагнетизм*

*Ферромагнетизм*

*Ферримагнетизм*

*Антиферромагнетизм*

## Магнитная восприимчивость диамагнитных минералов

Минерал	$\chi, \cdot 10^{-5}$ ед. СИ	Минерал	$\chi, \cdot 10^{-5}$ ед. СИ
Кварц	-1,6	Флюорит	-1,2
Ортоклаз	-0,6	Барит	-1,8
Циркон	-1,2	Сфалерит	- 6,5
Галенит	-3,3	Апатит	- 10,3
Касситерит	-2,0	Ковелин	-1,2

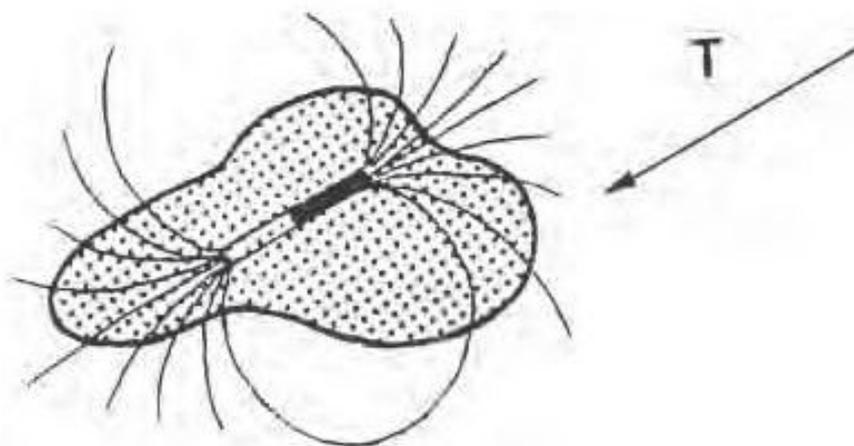
## Магнитные свойства ферромагнитных минералов

Минерал	$\chi$ , ед.СИ	Минерал	$\chi$ , ед.СИ
Магнетит	8,8–25	Гематит	$(1,3–13) \cdot 10^{-3}$
Титаномагнетит	$10^{-5}$ –1	Пирротин	0,13–1,3
Маггемит	3,8–25		

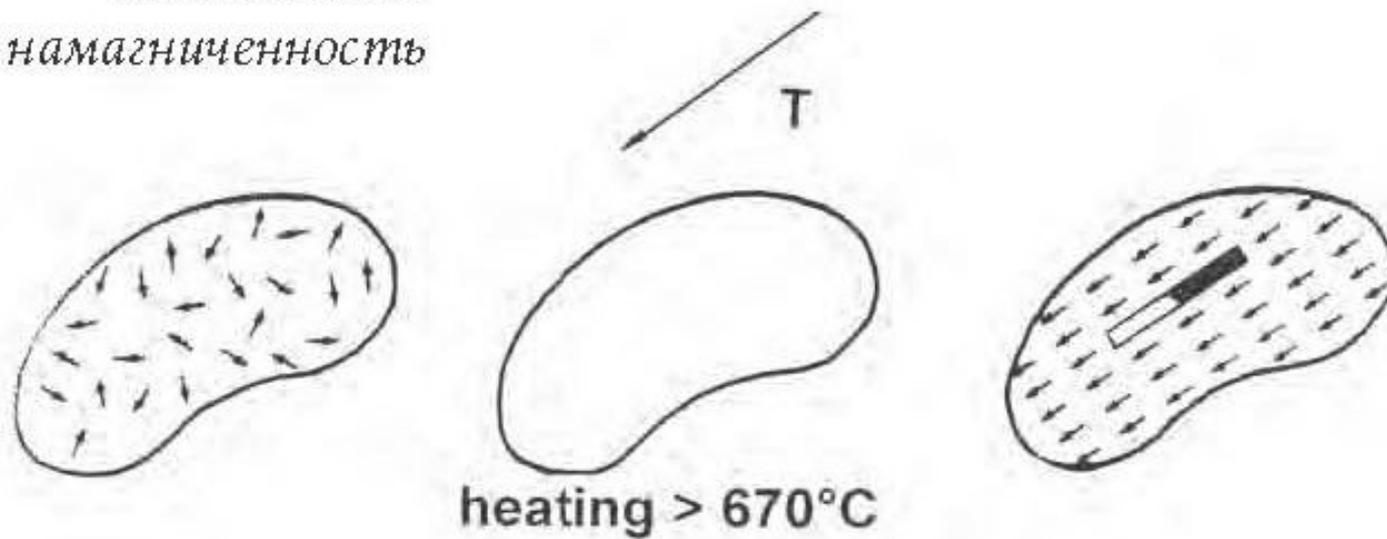
Магнитная восприимчивость, ед. СИ    Объемный процент магнетита    | 0,1% | 0,5% | 1% | 5% | 20% | 100% |

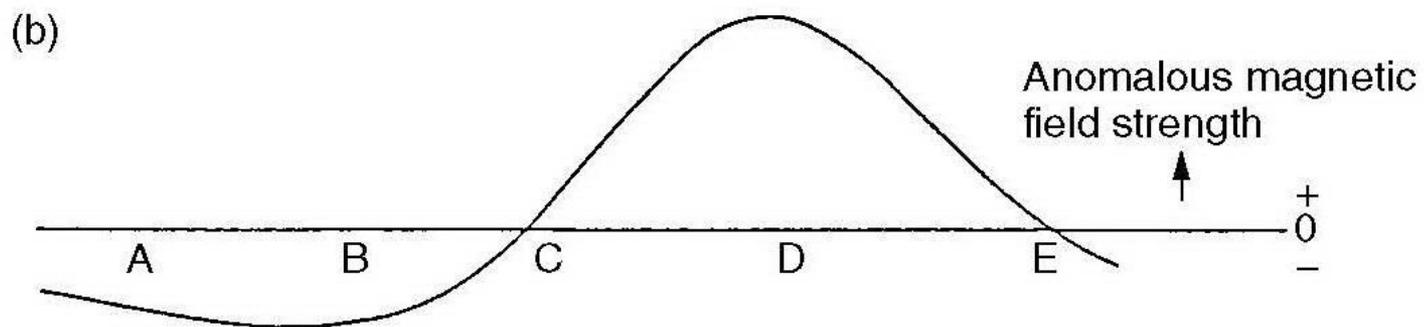
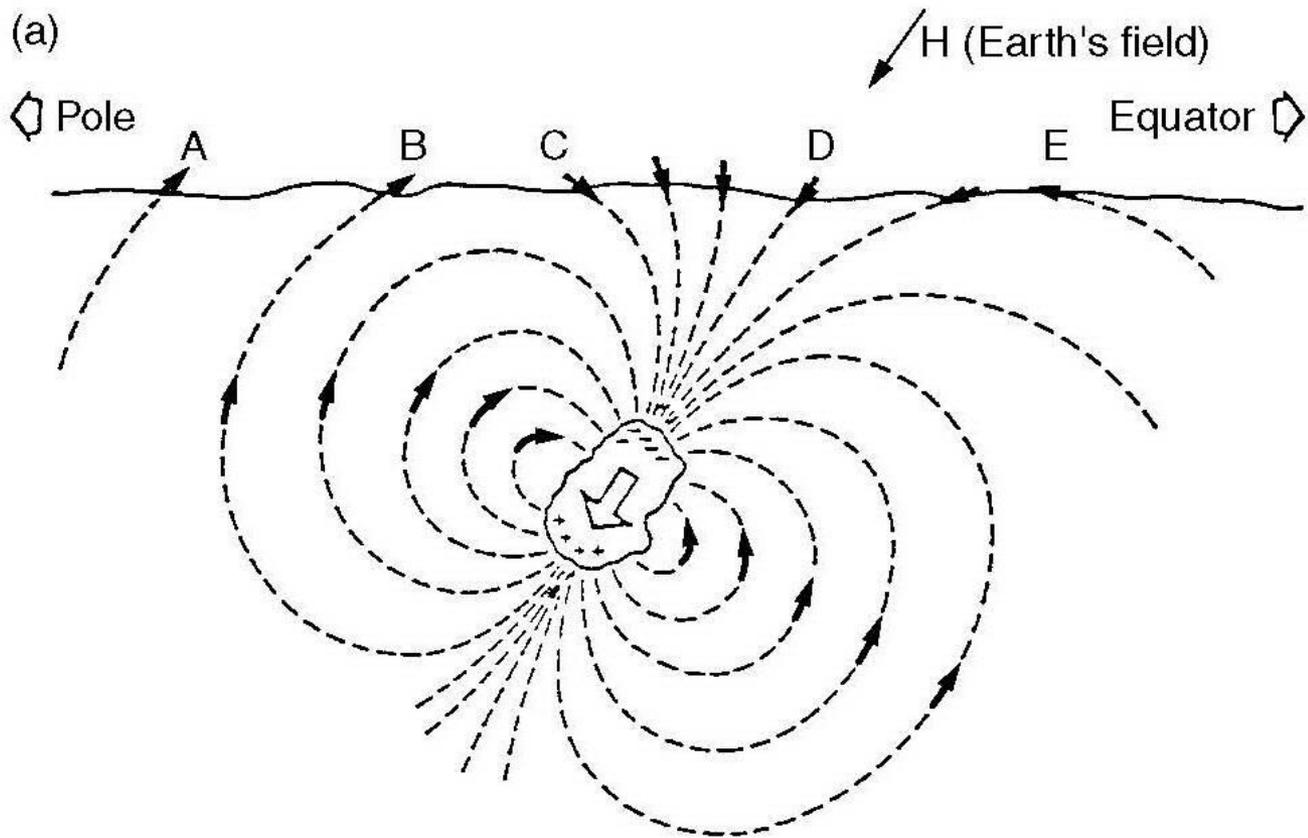
	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10	100
Железо									<b>железо</b>
Окиси железа			гематит		шлак		магнетит		
Вулканические породы				базальт					
			керамика						
			гранит						
			горелая почва						
			габбро						
			диорит						
Метаморфические породы			кварцит						
		песчаник							
			почва						
		подпочва							
		мрамор							
Осадочные породы	мел								
	известняк								
	песок								

Индукцированная  
намагниченность

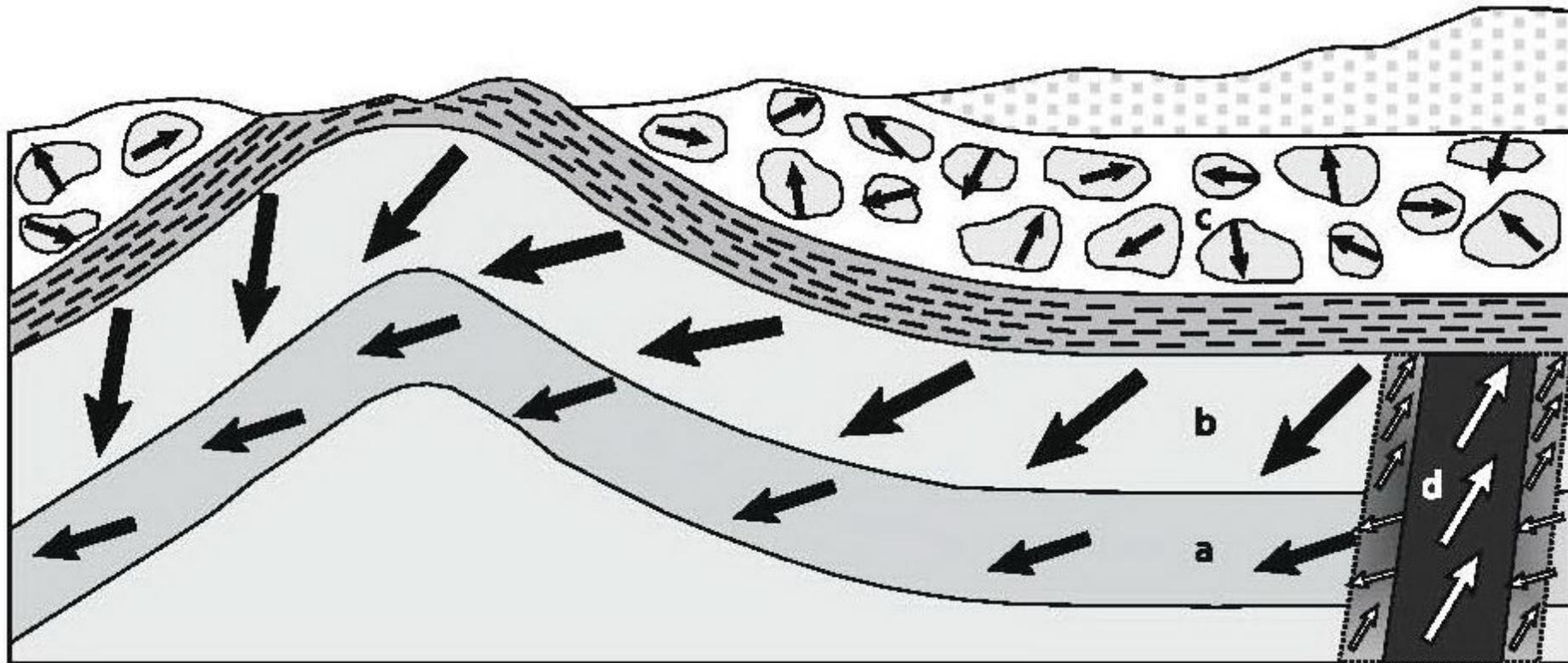


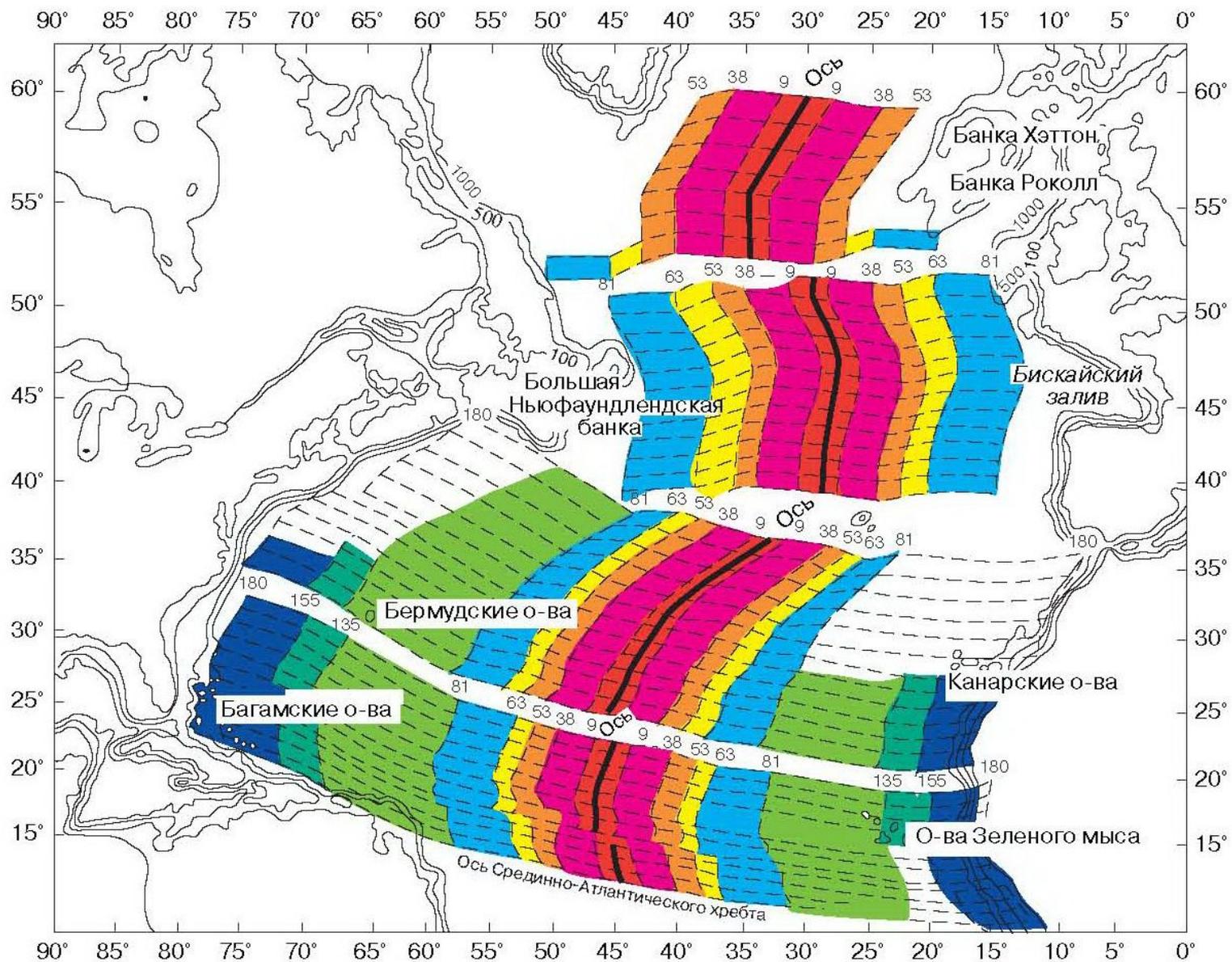
Остаточная  
намагниченность





# Естественная остаточная намагниченность. Палеомагнетизм





**Рис. 5.** Карта возраста пород океанического дна в Северной Атлантике, составленная по магнитным аномалиям У. Питменом и М.Тальвани в 1972 г. и впоследствии подтвержденная результатами глубоководного бурения. Разными цветами выделены участки океанского дна различных возрастных интервалов. Цифры обозначают миллионы лет.

**Физико-геологическая модель (ФГМ)** – это совокупность упрощений геометрических и петрофизических свойств геологического разреза.

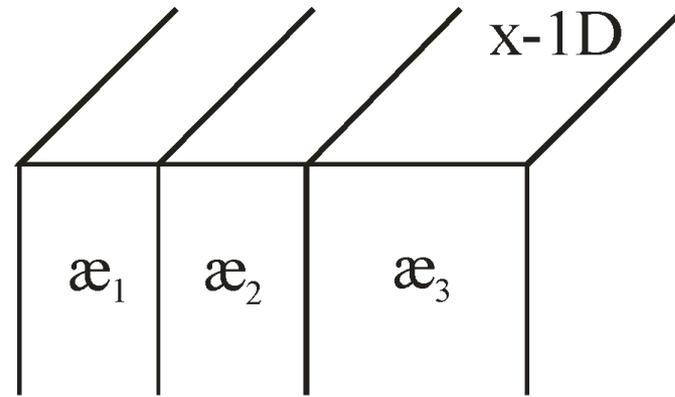
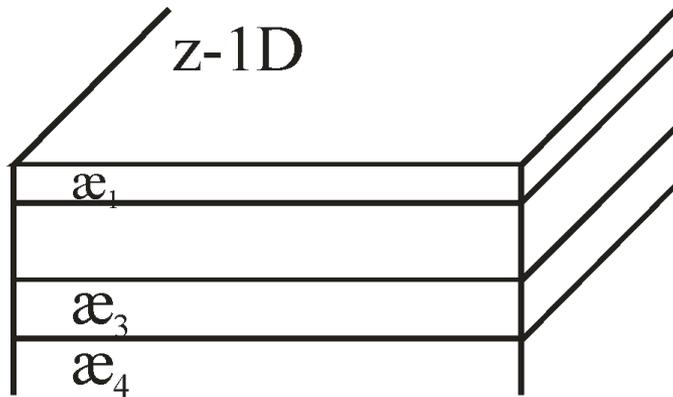
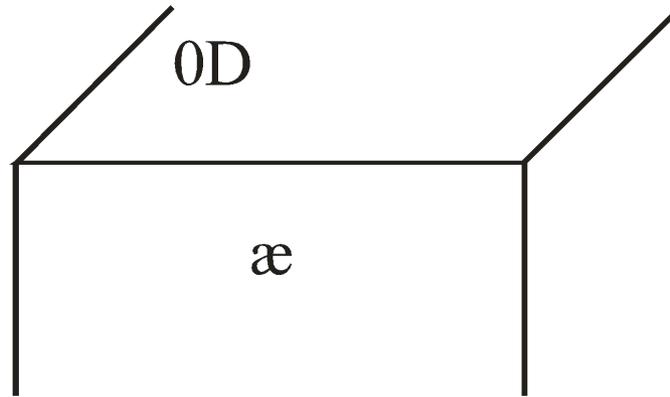
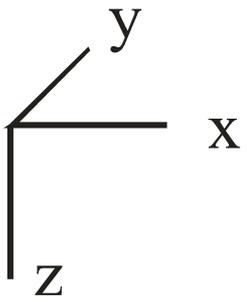
Упрощения ФГМ

Размерности

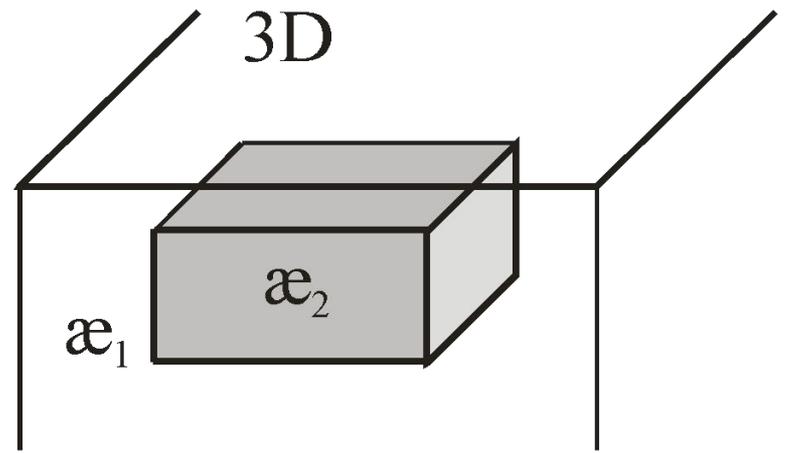
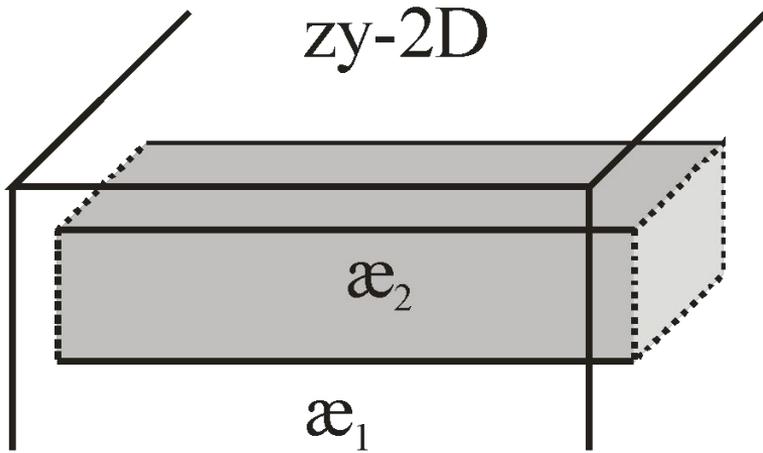
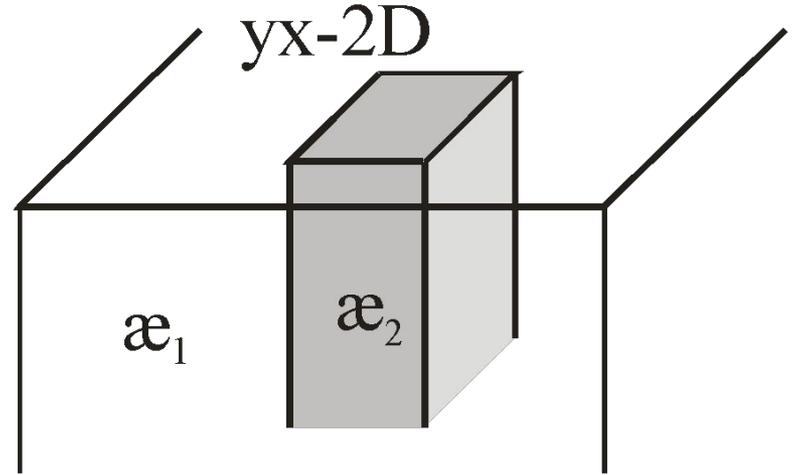
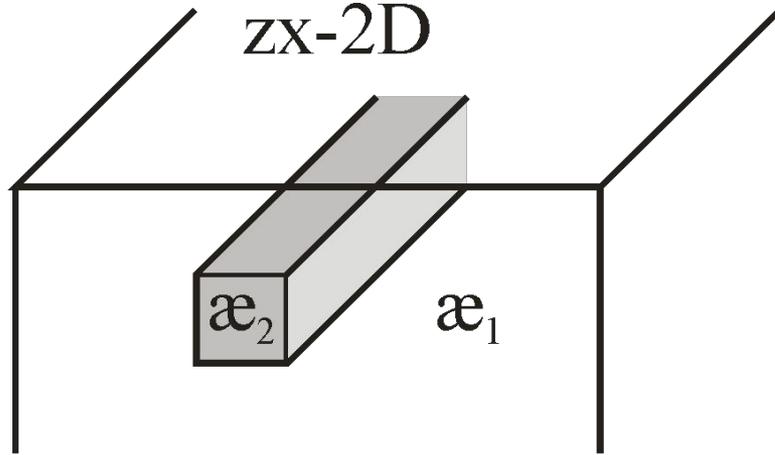
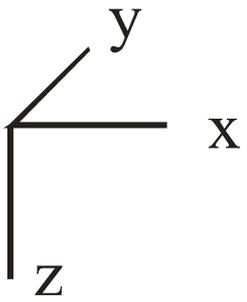
Распределения  
физических  
свойств

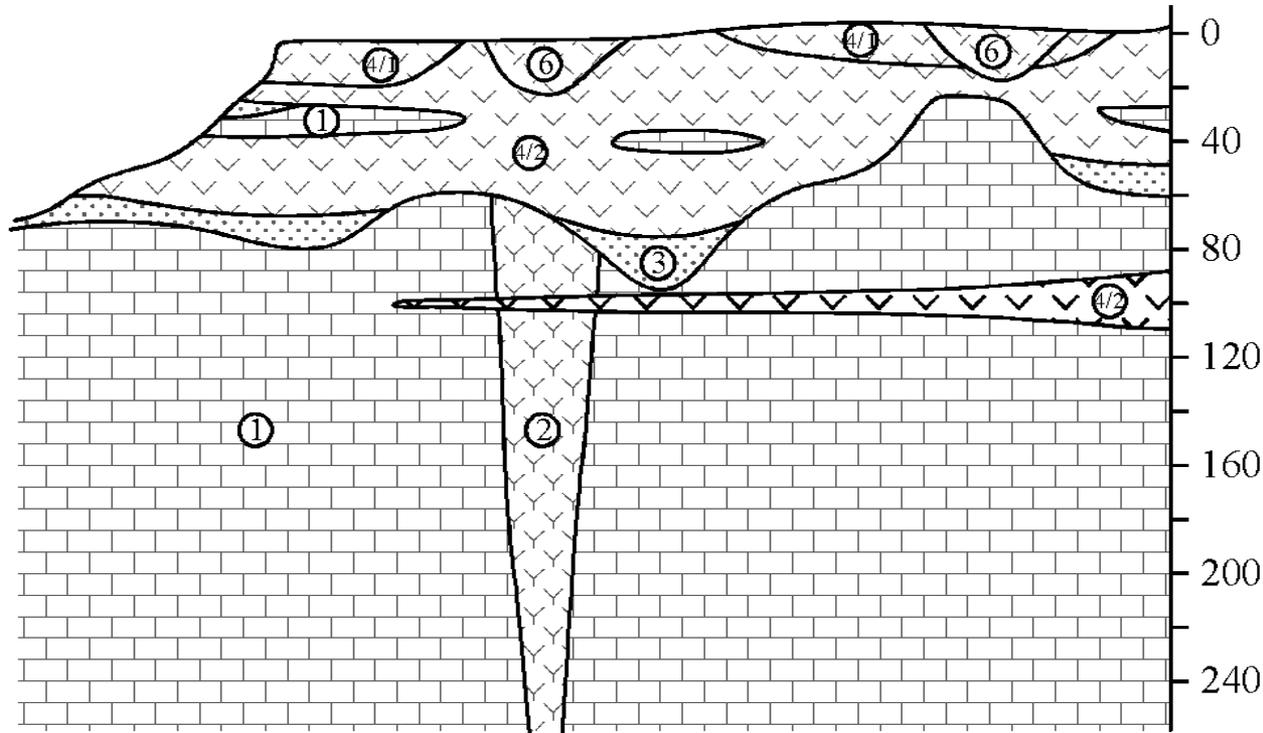
Формы

# 0D и 1D модели



# 2D и 3D модели





**ФГМ для кимберлитовой  
трубки Далдынского поля  
Якутской алмазоносной  
провинции. [Доброхотова  
и др., 1987]**

№ п/п	Магнитная восприимчивость, $\cdot 10^{-5}$ ед.СИ	Направление вектора ЕОН, $I_n$	Отношение $Q =$ $I_n/I_i$	Суммарная намагниченность, $\cdot 10^{-2}$ ед.СИ
1	0,12	—	—	—
2	0,25–2,0 (23%) 3,1–20,0 (38%) 20,0–45,0 (39%)	положительное	0,4 (0,1/1,0)	—
3	0,2	—	—	—
4-1	11,0 (8,8/16,0)	положительное	6,5 (4/12)	380 (210/1010)
4-2	18,0 (11,3/25,0)	отрицательное	1,8 (0,8/2,5)	-10,4 (-90/+28,5)
5	1,1 (0,38/2,5)	положительное	5,0 (2/6)	—
6	0,5–13,8	положительное	1–20	—

# Магниторазведочная аппаратура

## Основные принципы измерений



# *Классификация магнитометров по принципу действия*

Типы магнитометров

```
graph TD; A[Типы магнитометров] --- B[Оптико-механические]; A --- C[Феррозондовые]; A --- D[Протонные и Оверхаузера]; A --- E[Квантовые];
```

Оптико-механические

Феррозондовые

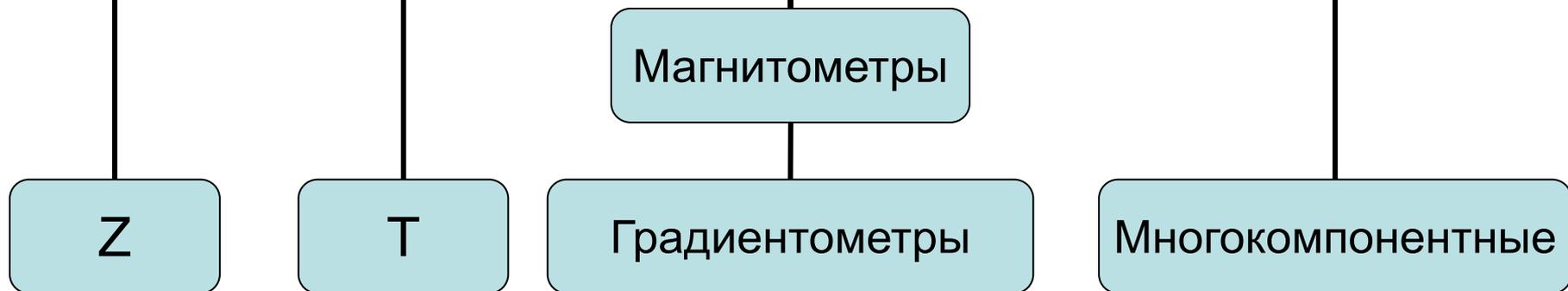
Протонные и Оверхаузера

Квантовые

*Классификация магнитометров по виду использования*



*Классификация магнитометров по типу измеряемой величины*



# Достоинства и недостатки различных типов магнитометров

Тип	Достоинства	Недостатки
<i>Протонные</i>	<p>Не боятся тряски и вибраций.</p> <p>2. Измерения не зависят от изменения внешних условий (температура, влажность, давление).</p> <p>3. Нет необходимости в точной ориентации датчика.</p>	<p>Цикличность измерений, из-за значительного времени преобразования.</p> <p>2. Нестабильность и пропадание сигнала при больших градиентах магнитного поля</p>
<i>Оверхаузера</i>	<p>Все положительные качества протонных магнитометров.</p> <p>2. Снижение времени измерения.</p> <p>3. Низкая погрешность, за счет повышения отношения сигнал/шум.</p> <p>4. Малый размер датчика.</p>	<p>Меньшее время жизни рабочего вещества.</p> <p>2. Появление систематической ошибки, за счет влияния блока СВЧ.</p>
<i>Квантовые</i>	<p>Возможность непрерывных измерений.</p> <p>2. Высокая разрешающая способность.</p>	<p>Ориентационная и азимутальная погрешность.</p> <p>2. Температурный дрейф. Смещение нуля-пункта.</p> <p>3. Чувствительность к механическим воздействиям (удары, вибрация).</p>



ФГУНПП

Геологоразведка



**МИНИМАГ**



**ММПГ-1**





Способы работы с датчиком магнитометра



**Quantum  
Magnetometry  
Laboratory**

**USTU - UPI**

# Лаборатория квантовой магнитометрии Уральского Государственного Технического Университета (УГТУ - УПИ)



**MMPOS-1**

**MMPOS**

## Portable Cesium Magnetometer/Gradiometer - Model G-858/G



## G-856 Portable Magnetometer

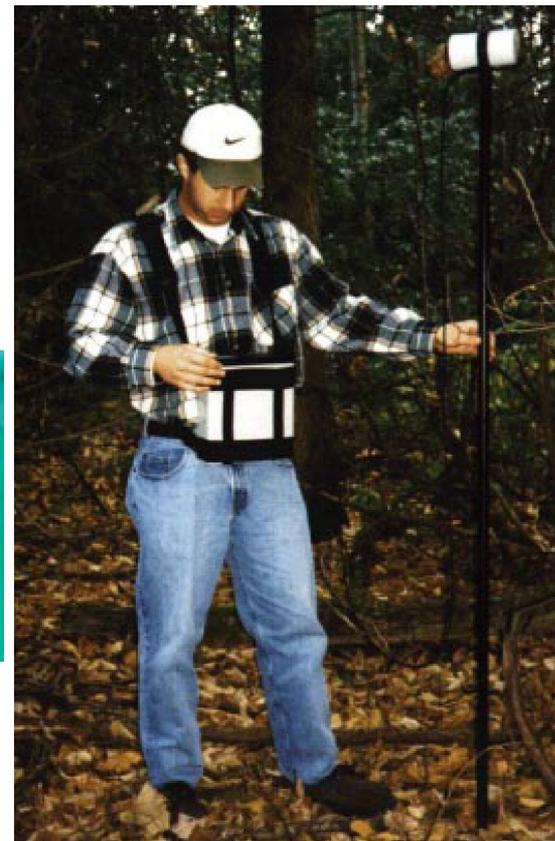




GSM-19 Overhauser  
Magnetometer/  
Gradiometer / VLF

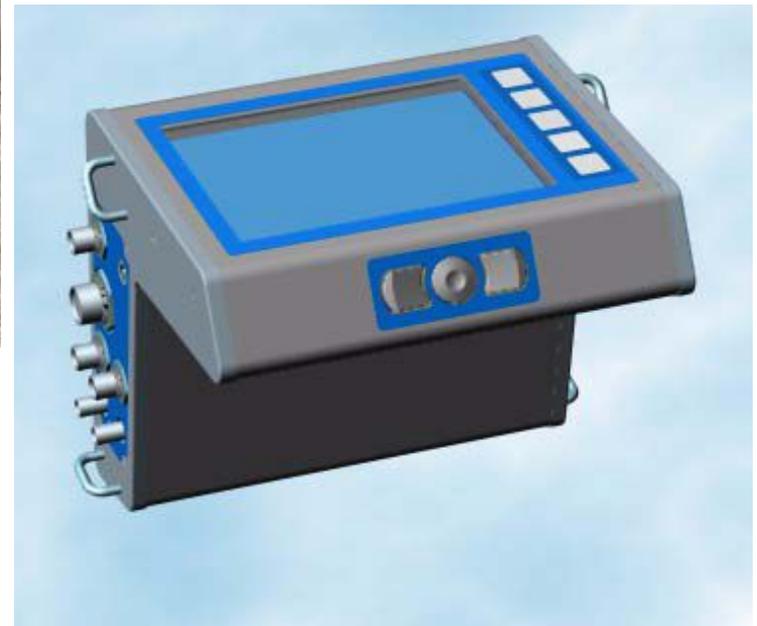


GSM-19T Proton  
Precession  
Magnetometer /  
Gradiometer / VLF  
system



**"Setting the Standards"**

**SM-5 NAVMAG**





Датчики аэромагнитометров (GEM)



Морской квантовый магнитометр G-882 с цезиевым датчиком (Geometrics)



# **Методика наземной магнитной съемки**

*Основные вопросы методики магнитных съемок  
закljučаются в выборе:*

- 1. вида магнитной съемки, в зависимости от поставленных геологических задач;**
- 2. масштаба съемки и сети точек наблюдения;**
- 3. аппаратуры;**
- 4. способа учета вариаций;**
- 5. точности измерений и способов ее достижения;**
- 6. топографических работ (разбивка профилей, их геодезическая привязка, очистка профилей от кустарника и т.д.);**
- 7. обработки и интерпретации данных;**
- 8. дополнительных геологических или геофизических работ**

## *При выборе методики:*

- 1. формируется физико-гелогоическая модель (ФГМ);**
- 2. на основании сформированной ФГМ решается прямая задача магниторазведки для наименее контрастного объекта;**
- 3. По результатам решения прямой задачи выбираются масштаб съемки, шаг по профилю, необходима точность съемки, аппаратура!**
- 4. Планируются топографические работы и контрольные измерения.**
- 5. Предварительно выбираются методы обработки и интерпретации полученных данных, вид и форма отчетных материалов.**

**Прямая задача** магниторазведки заключается в нахождении аномального магнитного поля от объекта с известными геометрическими и петрофизическими характеристиками.

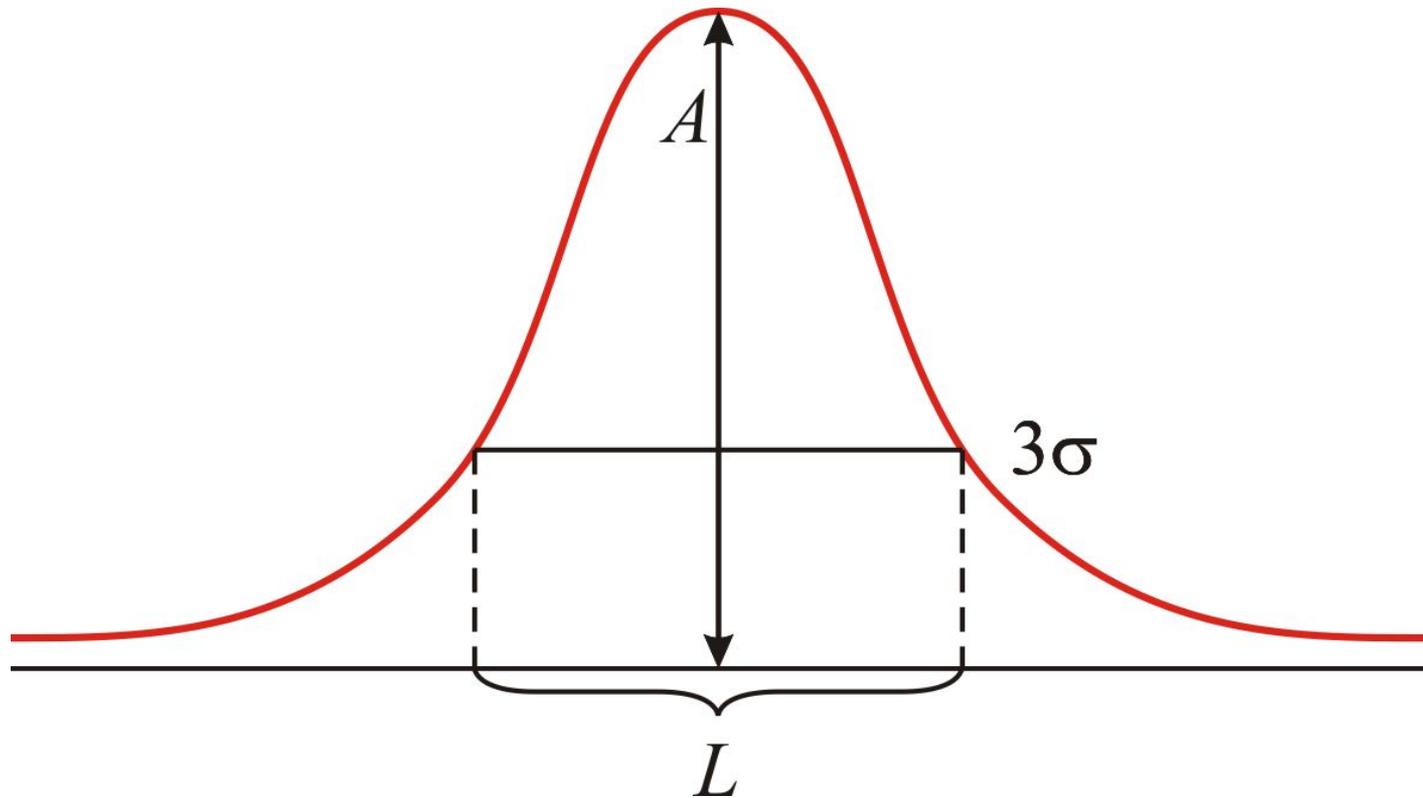
**Обратная задача** магниторазведки заключается в нахождении по известным значениям магнитного поля параметров его источника.

---

**Ошибка первого рода** – пропуск аномалии и как следствие существующего объекта.

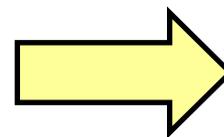
**Ошибка второго рода** – обнаружение ложной аномалии.

## Выбор шага по профилю



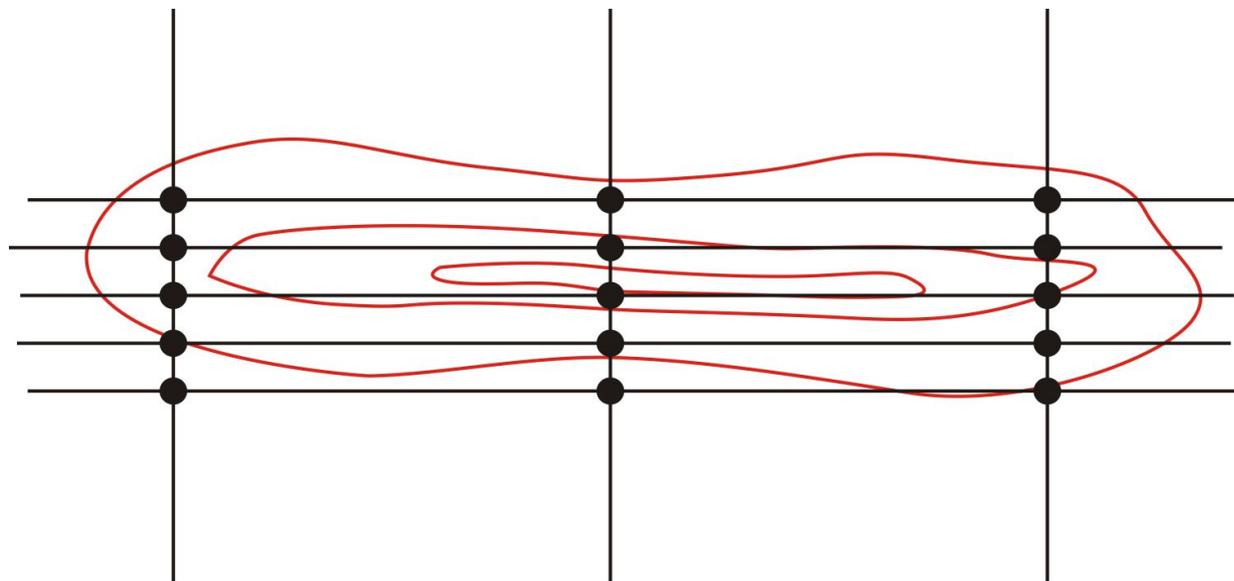
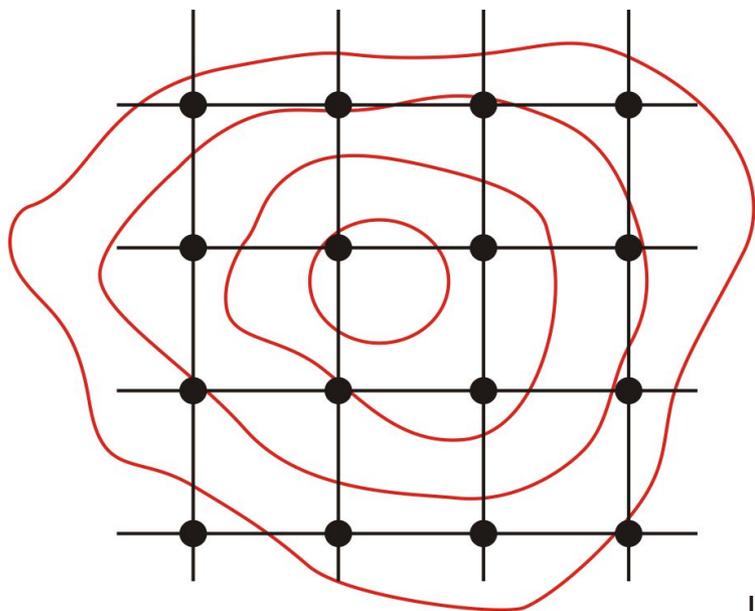
$$A_{\min} \geq 3\sigma$$

Аномалия считается **достоверной**,  
если она зафиксирована не менее  
чем тремя точками на трех профилях.



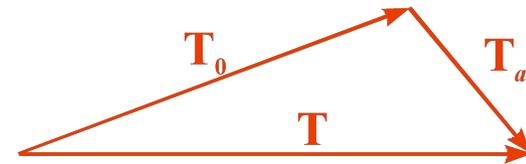
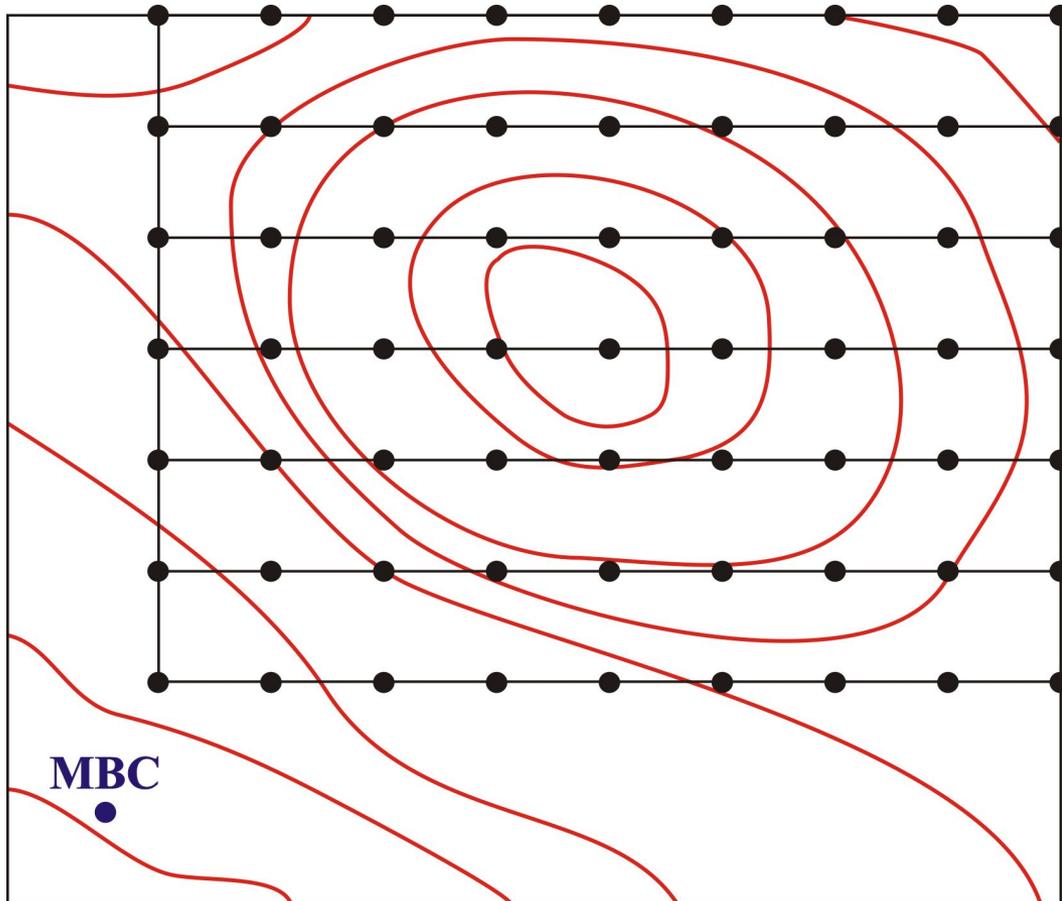
$$\Delta L = \frac{L}{3}$$

# *Выбор сети наблюдения*



# Учет вариаций магнитного поля Земли

$$\Delta T = T(t_n) - T^{MBC}(t_n)$$



$$T_a^{MBC} \rightarrow 0$$

$$T(t_n) = T_0 + T_m + T_e + T_a + \delta T(t_n)$$

$$T^{MBC}(t_n) = T_0 + T_m + T_e + \delta T(t_n)$$

$$\Delta T_a = T - T^{MBC}$$

# Отчетные материалы по магнитной съемке

*Отчетными материалами в магниторазведке являются:*

1. карты изодинам;
2. карты графиков;
3. каталоги аномалий;

*Магнитное поле Земли часто представляют в виде карт изолиний:*

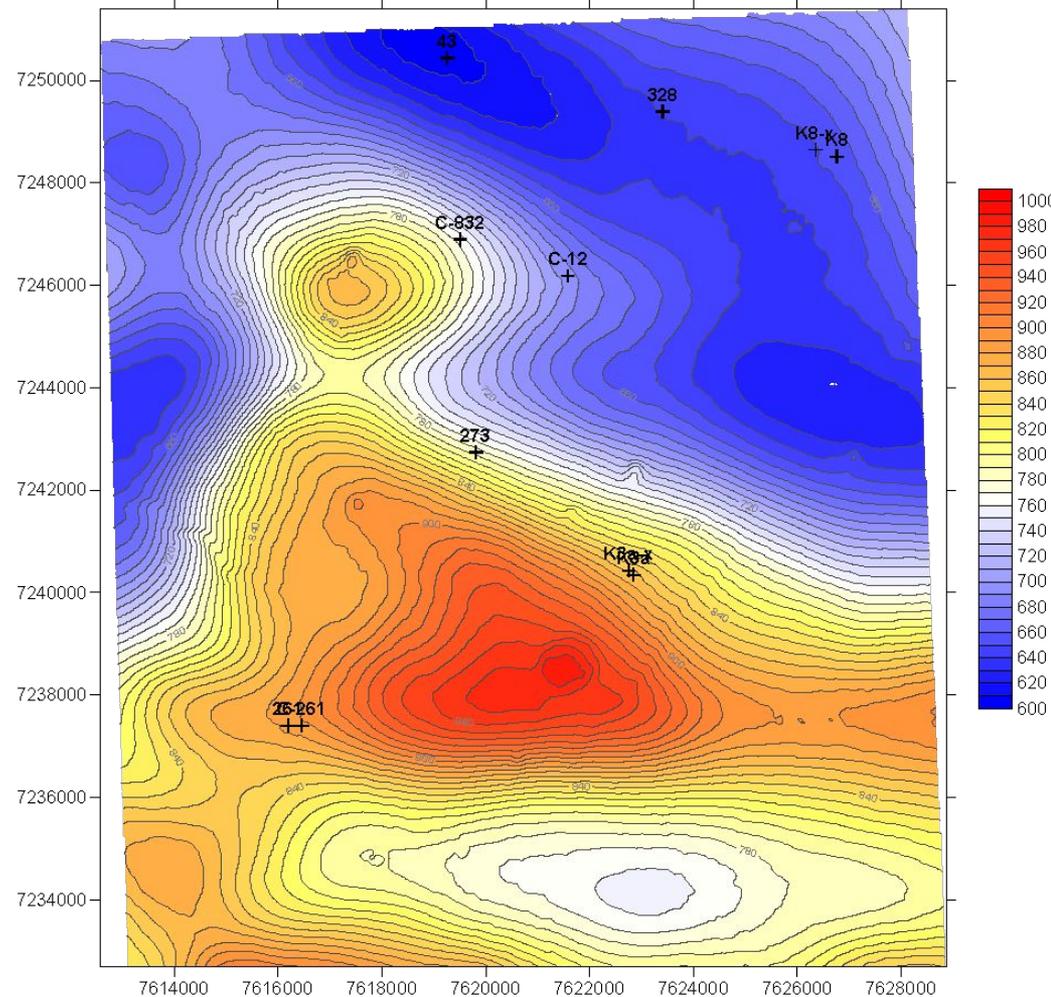
✓ T, Z, H, X, Y – изодинамы;

✓  $\delta T, \delta Z, \delta H, \delta X, \delta Y$  – изопоры;

✓ D – изогоны;

✓ I – изоклины.

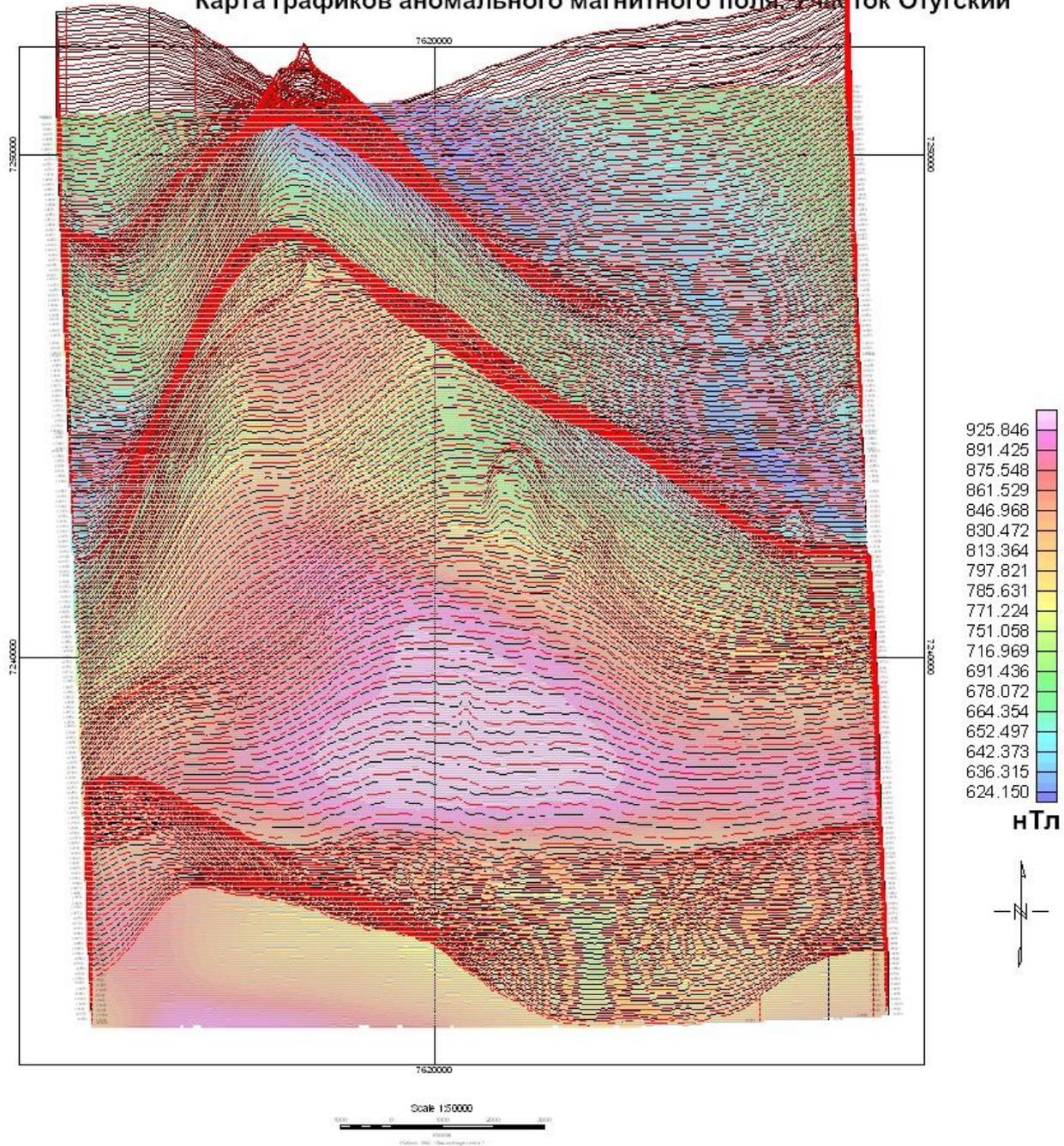
Èàòòà àí îí àèùíí ã î àã èòí ã î ííèÿ dTa  
Î óóànéay î éí ù àáù



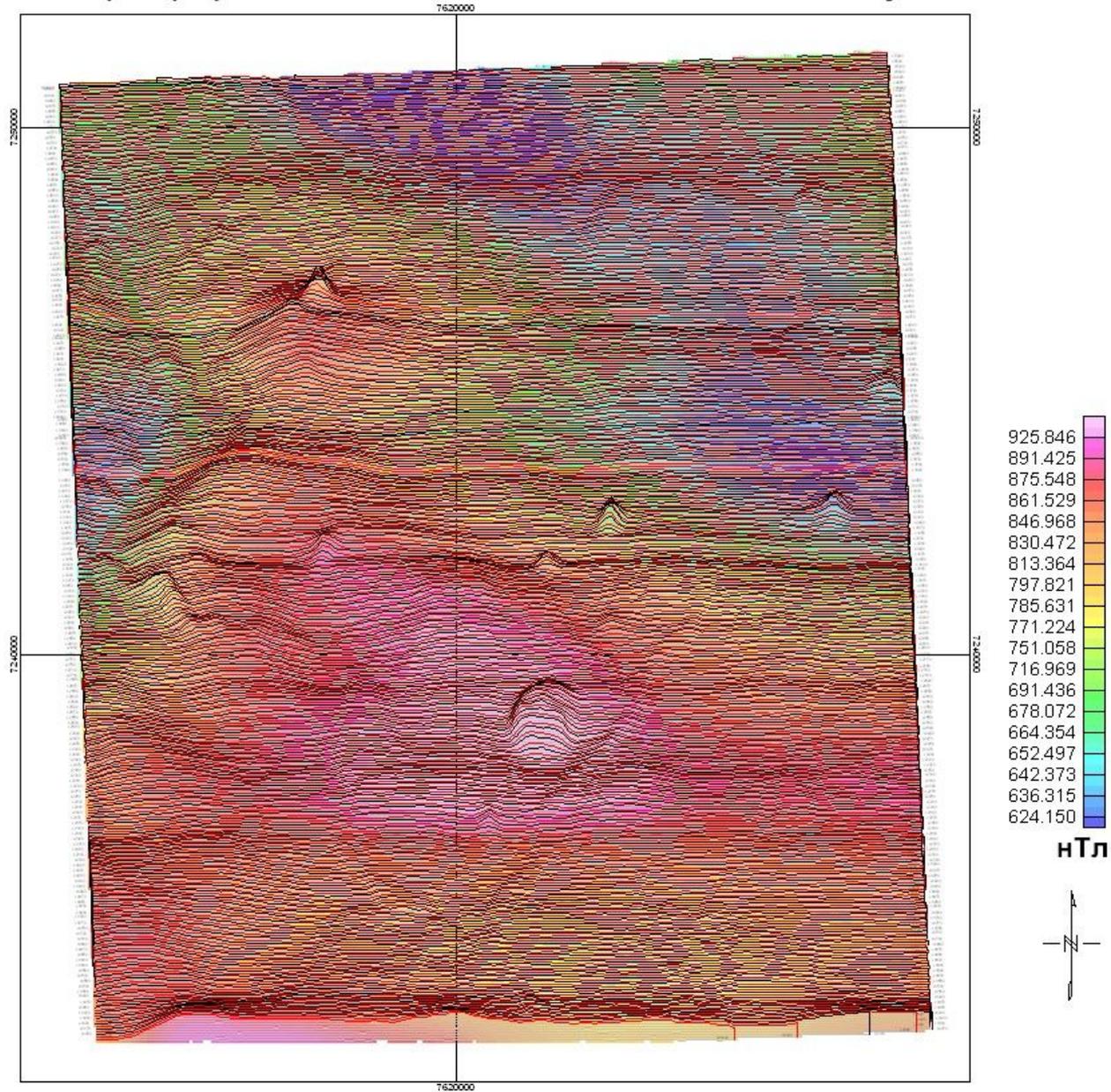
2007 ã

0 5000 10000 15000 20000 25000

# Карта графиков аномального магнитного поля. Участок Отугский



# Карта графиков остаточного магнитного поля. Участок Отугский



Scale 1:50000

Масштаб вертикальный в 1см - 20 нТл

км 2 0 2 4 6 8 км

ПЛАН ГРАФИКОВ ( $\Delta T$ )<sub>a</sub>

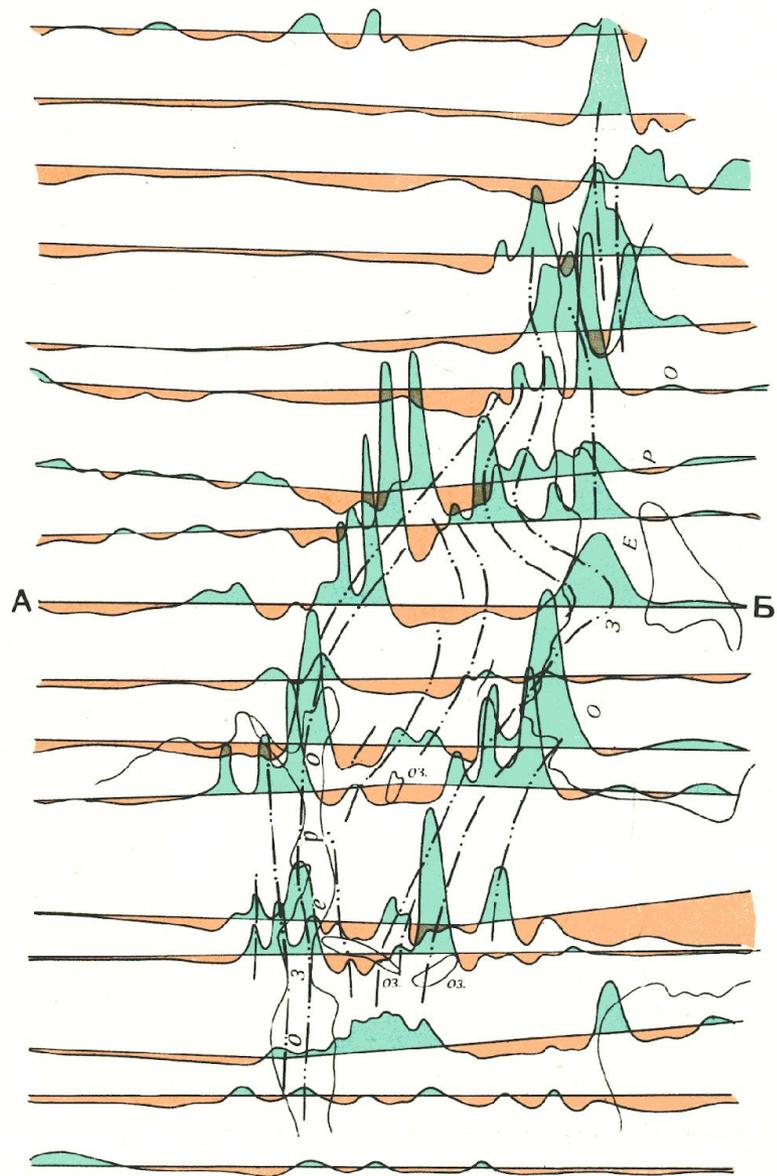


Рис.1

Вертикальный масштаб — в 1 см 2000γ  
Высота полета 70 м

ПЛАН ИЗОЛИНИЙ ( $\Delta T$ )<sub>a</sub>

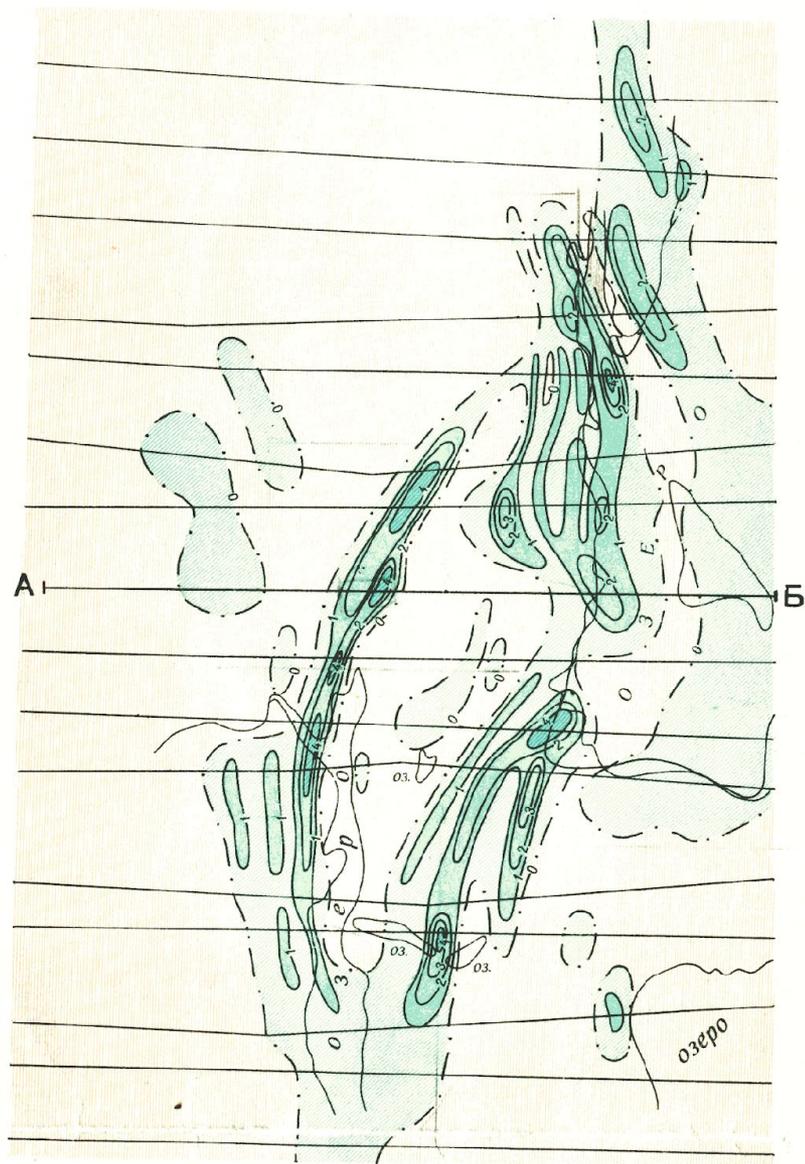


Рис.2

Значение из

**Интерпретация данных магниторазведки**

**Методы обнаружения  
и выделения  
аномалий**

Морфологический  
анализ карт и карт  
графиков

Аналитические методы  
обнаружения и  
разделения

Геологическое  
редуцирование

Трансформации

Корреляционные  
способы

Аппроксимационные  
способы

**Количественная  
интерпретация**

Простые методы

Методы моментов

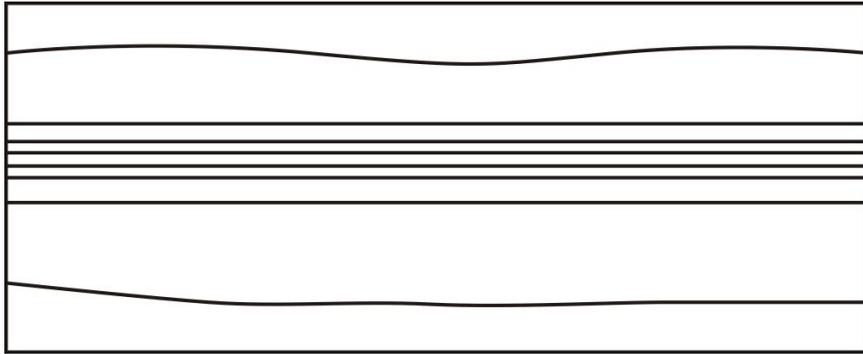
Методы особых  
точек (ТФКП)

Метод подбора и  
регуляризации

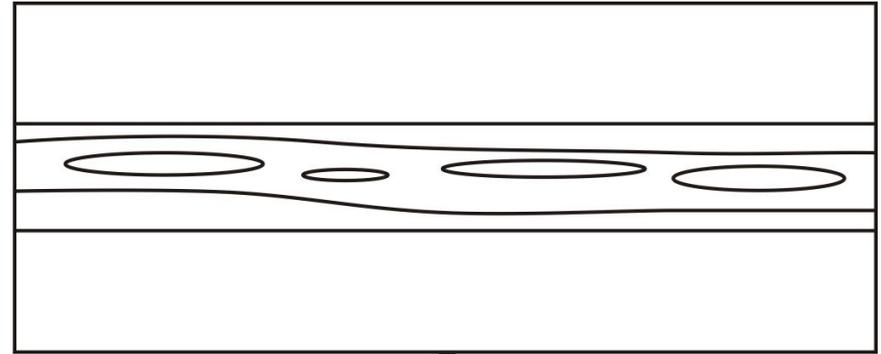
Метод характерных  
точек

Метод касательных

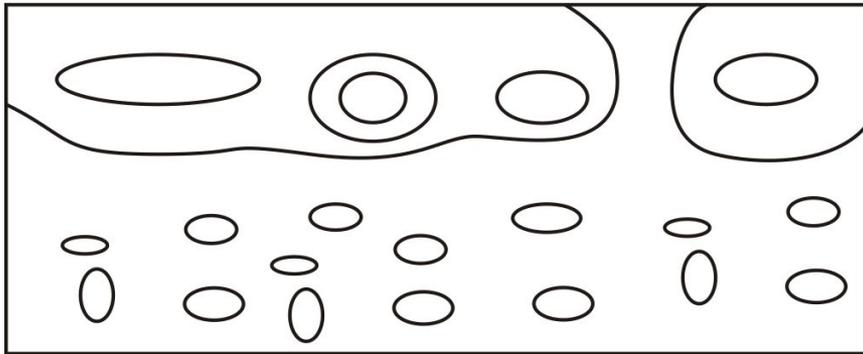
# Признаки наличия разломов



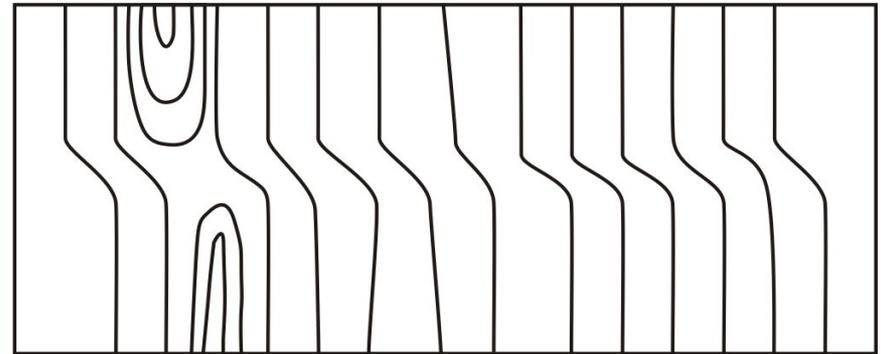
а.



б.



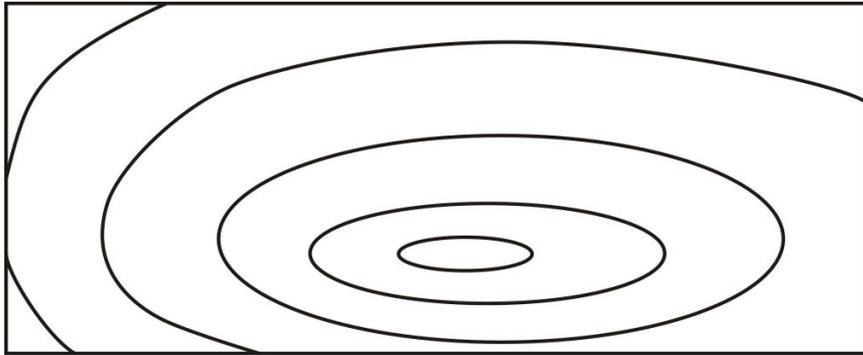
в.



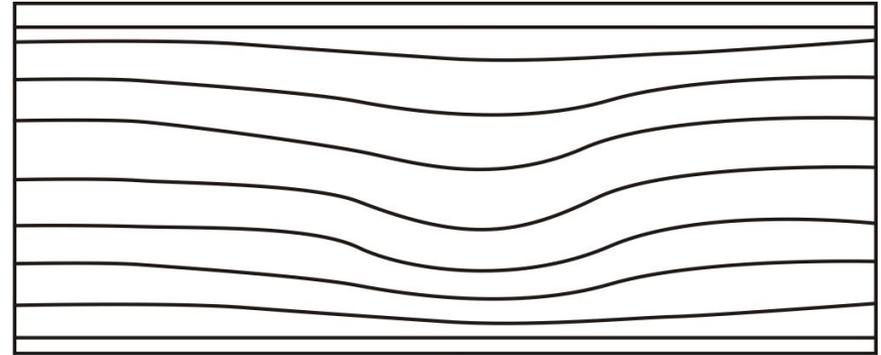
г.

- а. наличие ступени в уровнях аномального поля;
- б. наличие линейных локальных аномалий;
- в. смена характерных особенностей аномальных полей;
- г. нарушение корреляции аномальных полей.

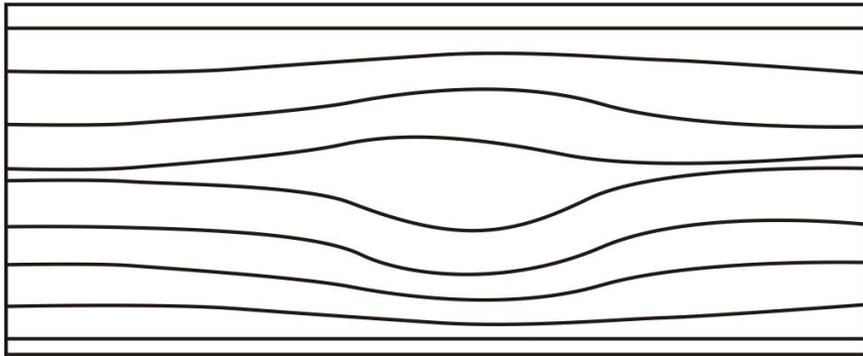
# Признаки наличия локальных аномалий



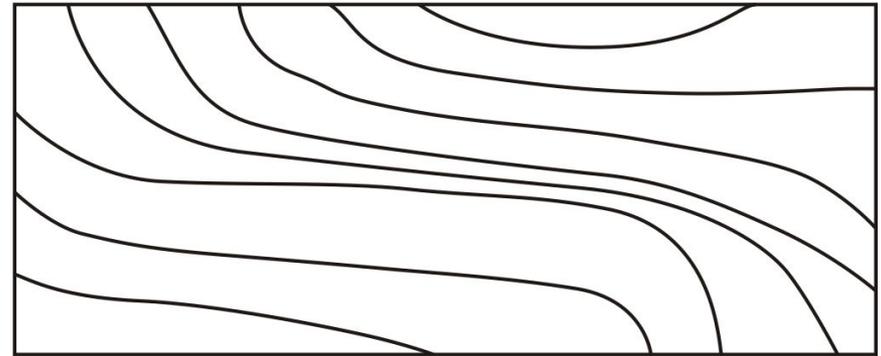
а.



б.



в.



г.

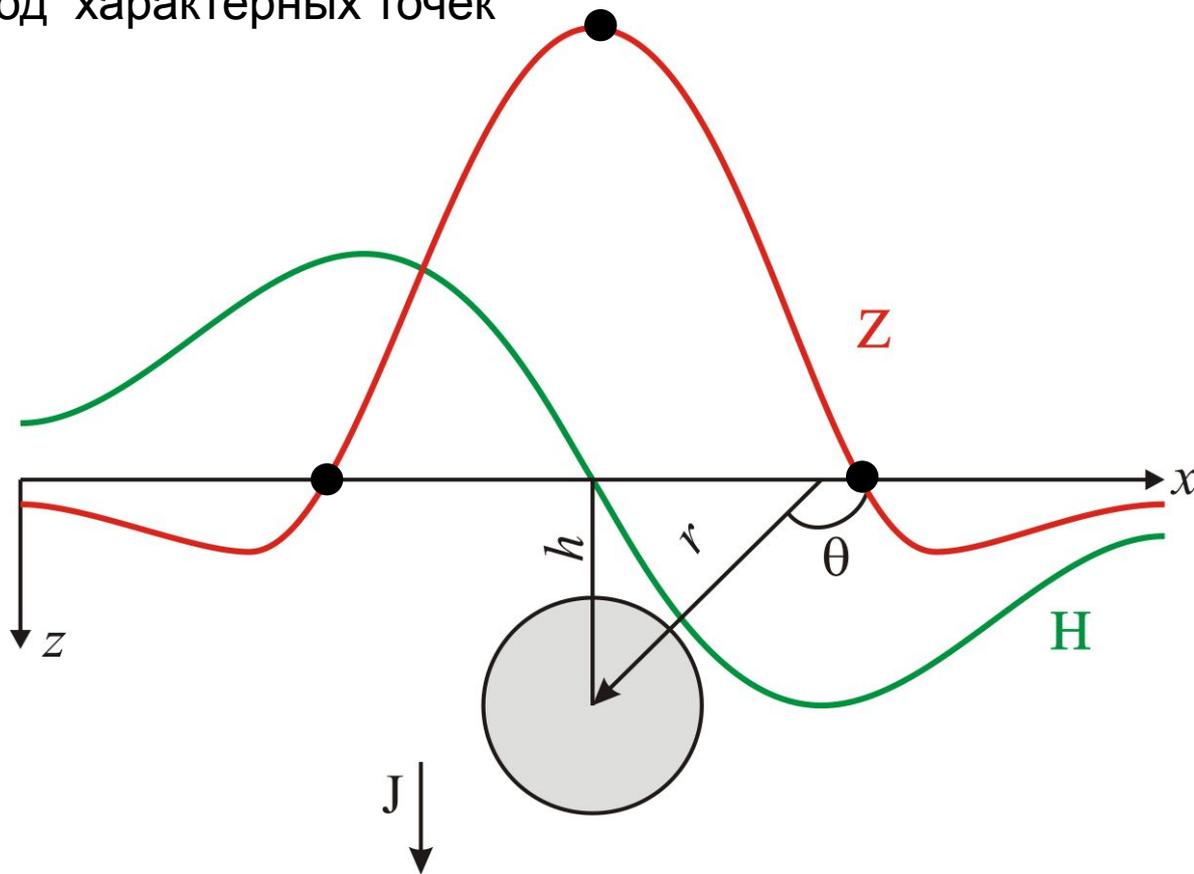
- а. замкнутые изолинии;
- б. местные изгибы изолиний;
- в. миндалевидные расширения изолиний;
- г. малые градиентные зоны (сгущение изолиний).

# Методы обнаружения и разделения аномалий

<b>Группа способов разделения</b>	<b>Объем требуемой информации</b>
Геологическое редуцирование	Детальные сведения о форме, расположении некоторых из объектов и о их физических свойствах.
Корреляционные способы	Сведения о характеристиках некоторых объектов на эталонных профилях или площадях.
Трансформации	Сведения о возможном спектральном составе различных составляющих.
Аппроксимационные способы	Общие представления о характере возможных источников аномалий.

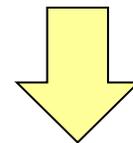
# Простые способы решения обратной задачи магниторазведки

Метод характерных точек



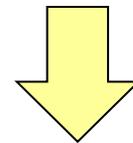
$$Z_a = \frac{M(2h^2 - x^2)}{(h^2 + x^2)^{5/2}}$$

$$H_a = -\frac{3Mhx}{(h^2 + x^2)^{5/2}}$$



$$Z_a = \max \text{ при } x_0 = 0$$

$$\text{В точке } Z = 0 \quad x_0 = \pm h\sqrt{2}$$



$$h = \frac{x_0}{\sqrt{2}} \quad R = \sqrt[3]{\frac{1,5Z_{a \max} h^3}{4\pi J}}$$

# **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. Серкеров 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.