

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



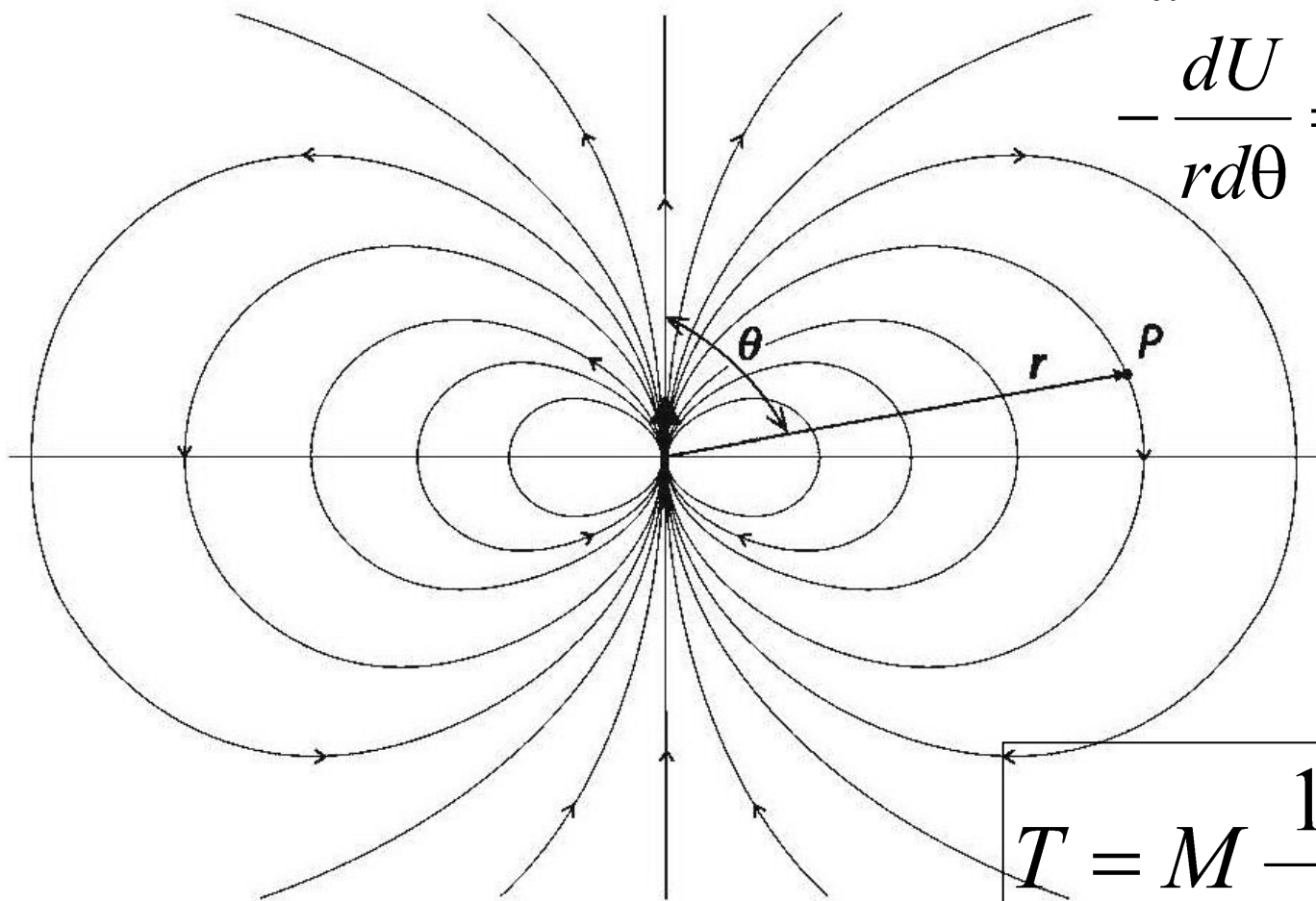
Поле диполя в сферических координатах

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

Компоненты

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

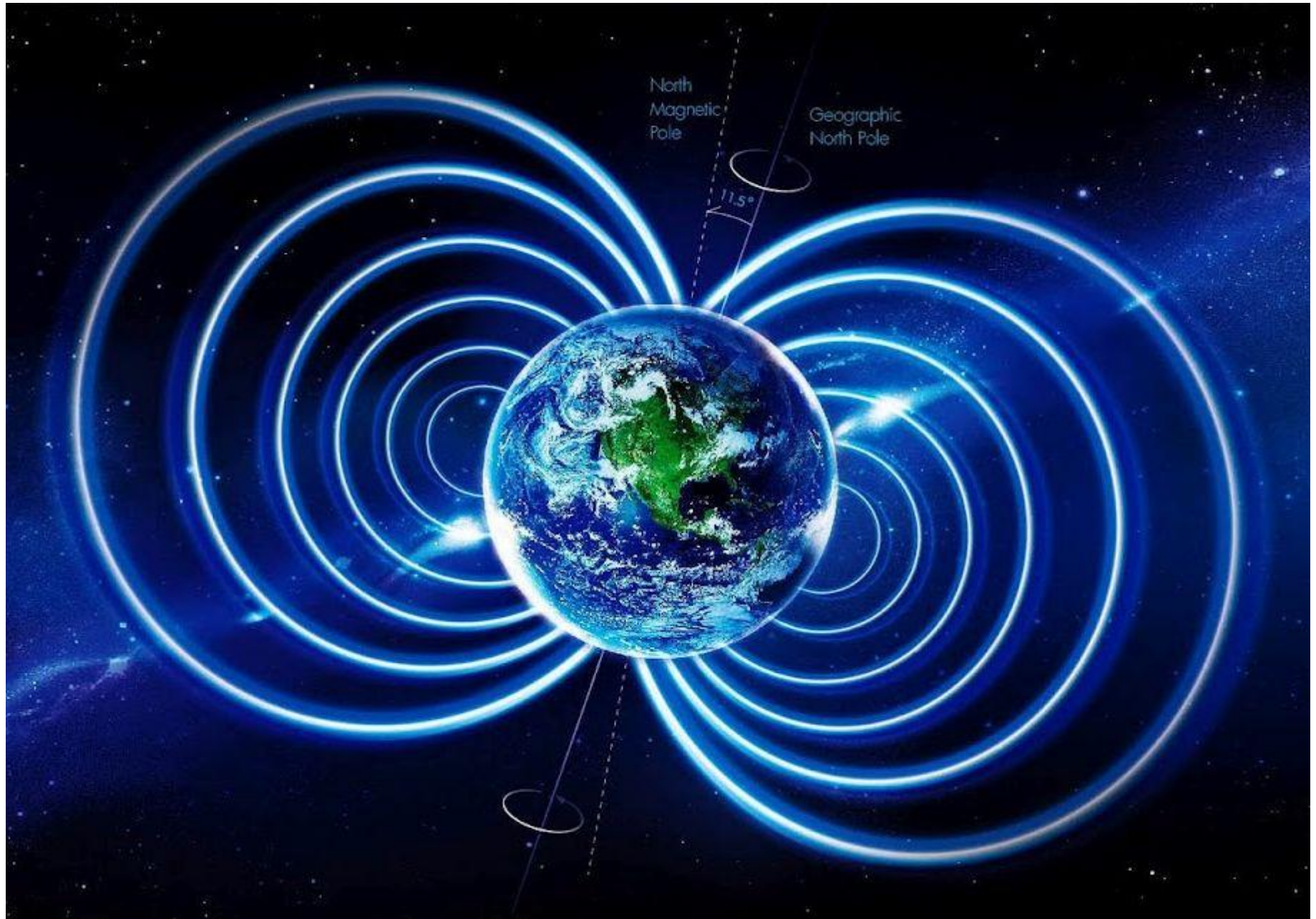
$$-\frac{dU}{rd\theta} = H = M \frac{1}{r^3} \sin \theta$$



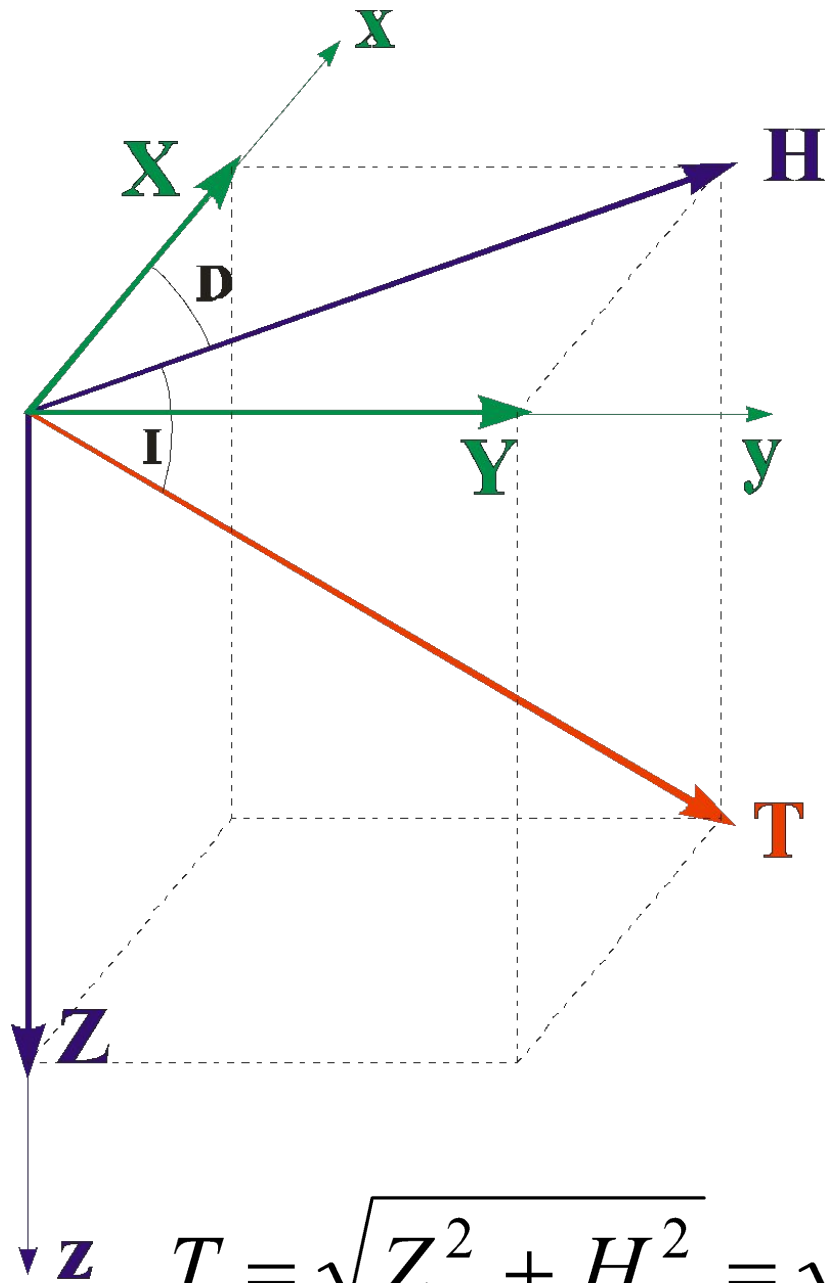
Полный вектор

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

магнитное поле Земли

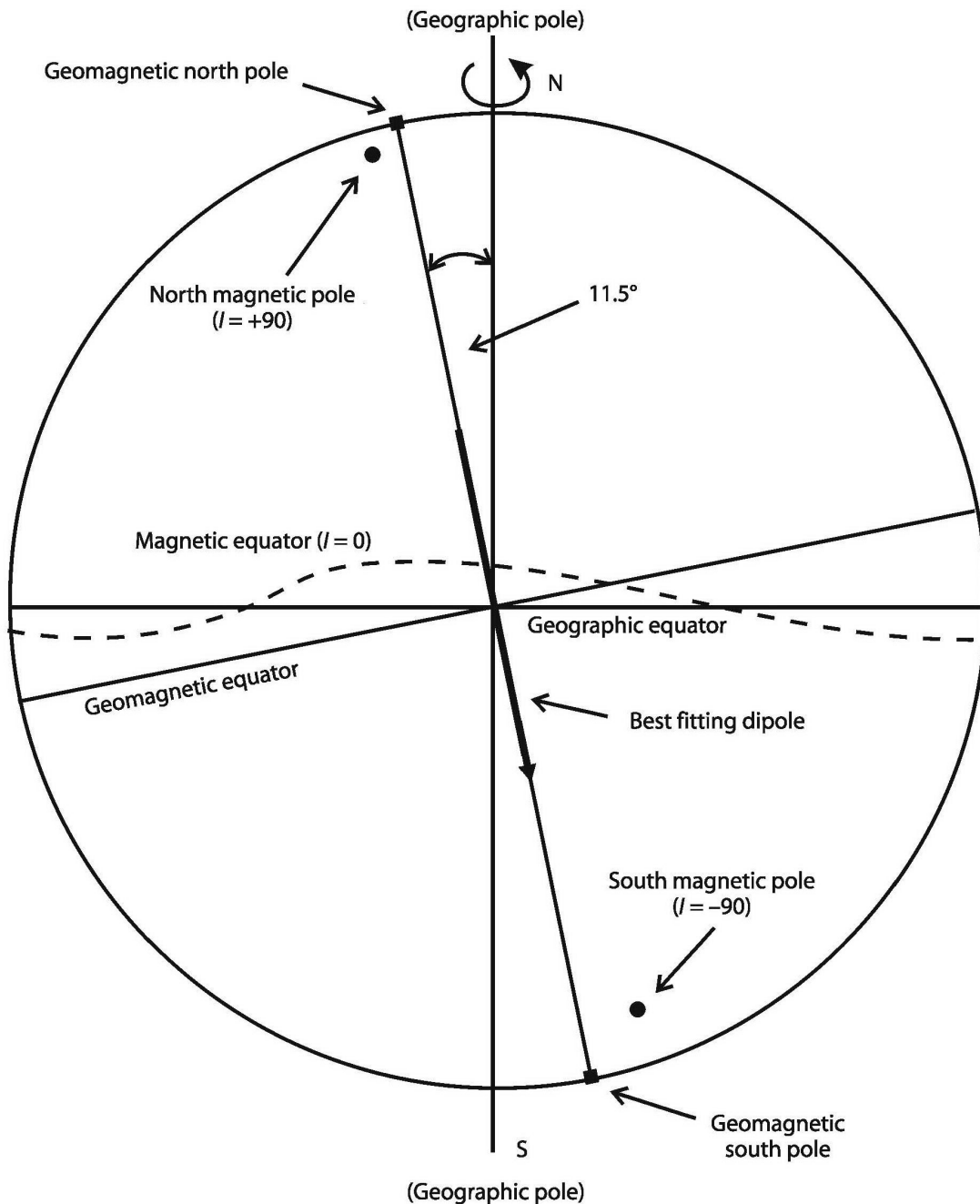


Компоненты магнитного поля Земли

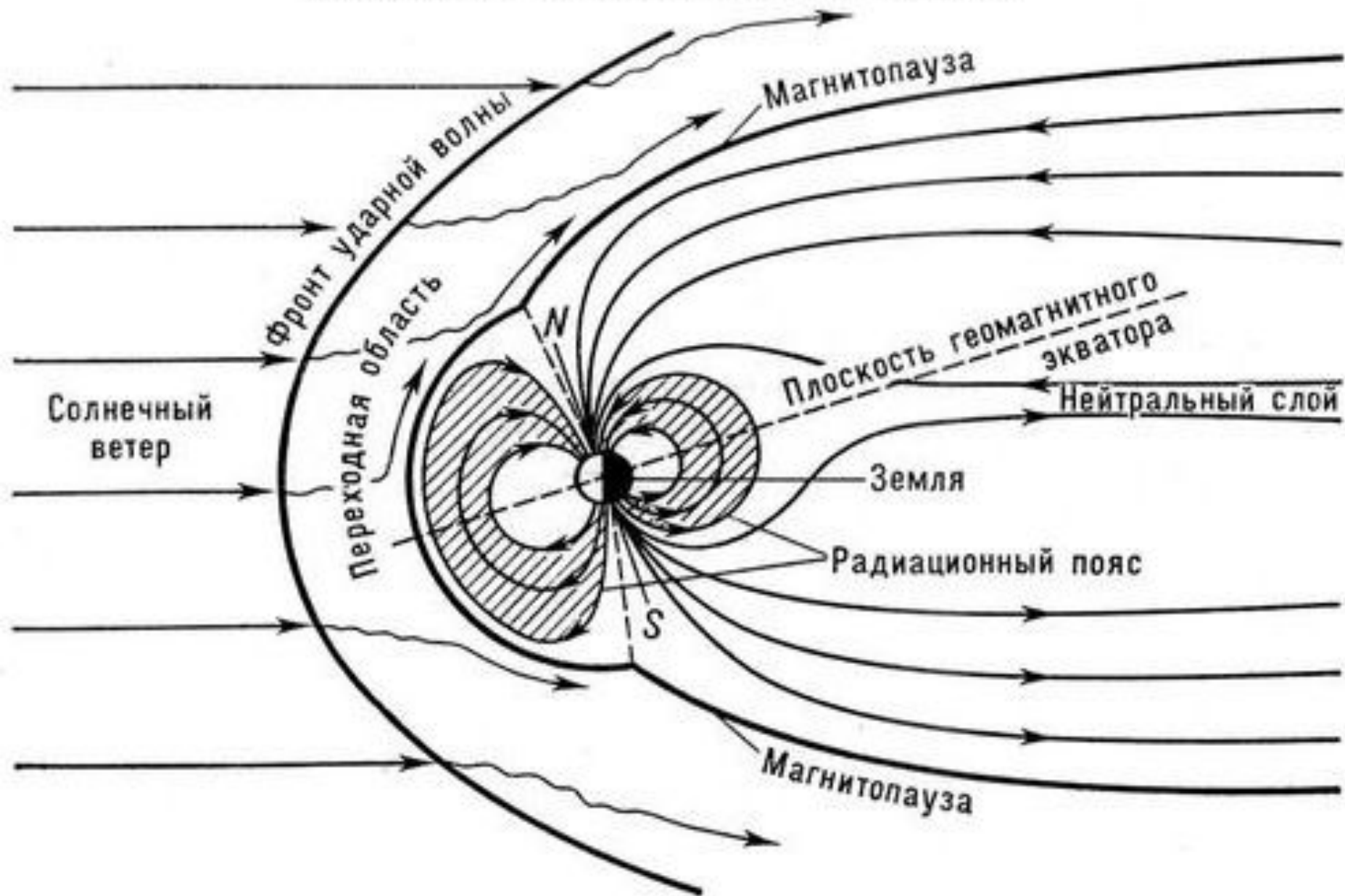


$$T = \sqrt{Z^2 + H^2} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Элементы магнитного поля Земли

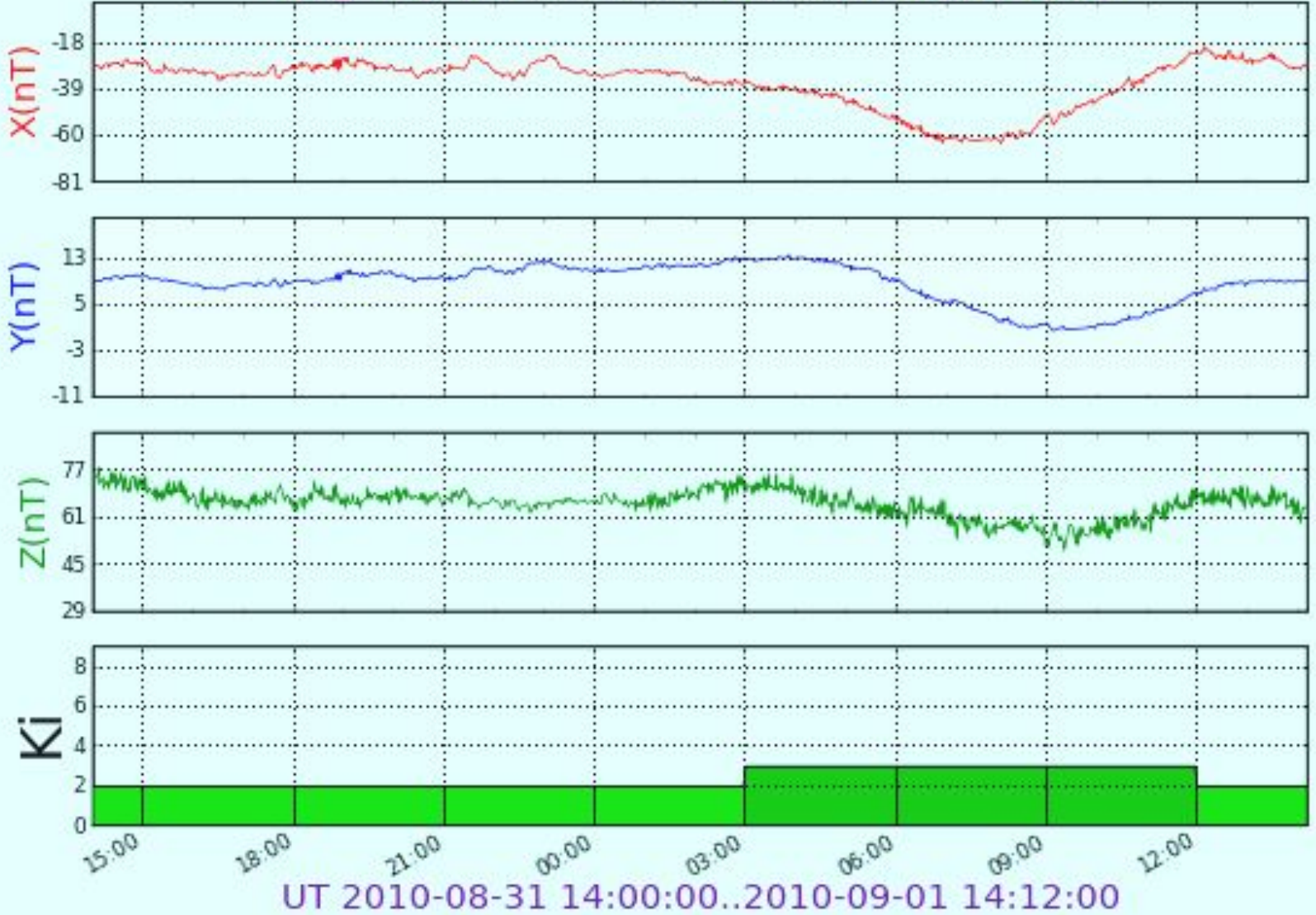


Строение магнитосферы Земли.



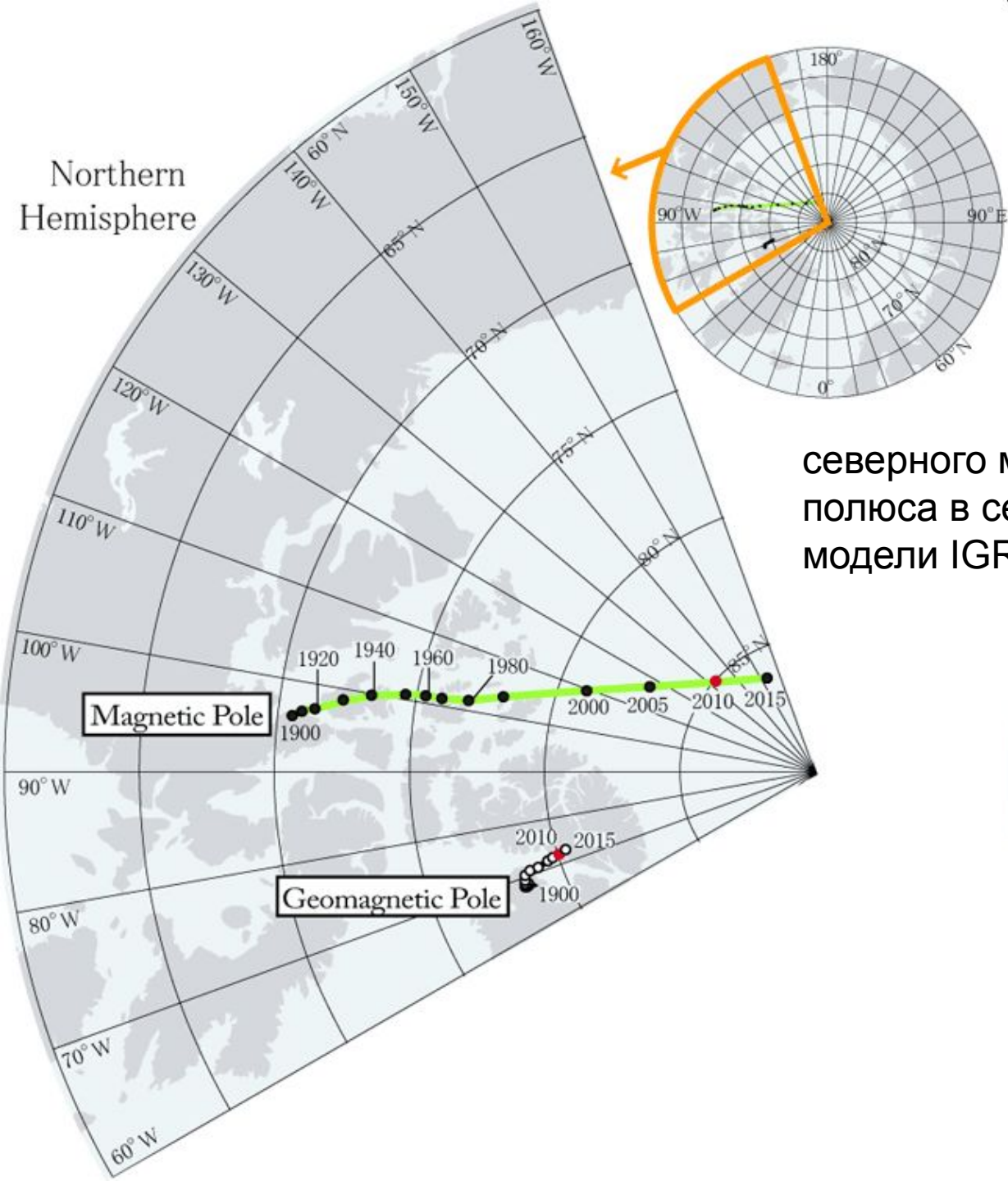
Вариации магнитного поля Земли

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

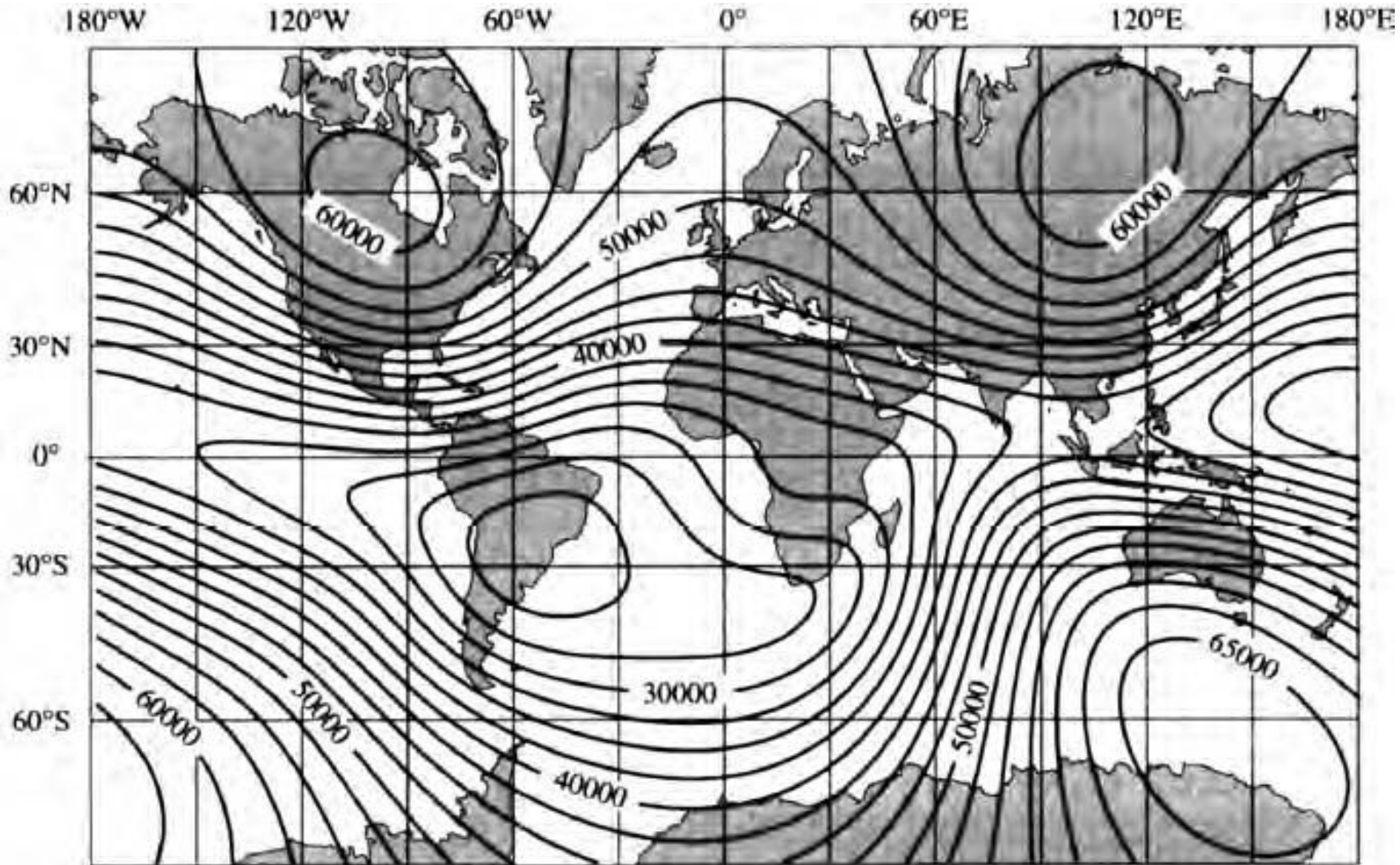
$$\vec{H}_T = \vec{H}_0 + \vec{H}_m + \vec{H}_a + \vec{H}_e + \delta\vec{H}$$

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

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

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

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 ⁻³	1 А/м = 10 ⁻³ СГС · см ⁻³
Магнитная проницаемость абсолютная	μ_a	генри/метр (Гн/м)	1 СГС	4 · 10 ⁻⁷ Гн/м = 1 СГС
Магнитная проницаемость относительная	$\mu (\mu_{отн})$	Безразмерная	Безразмерная	-
Магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная)	μ_0	генри/метр (Гн/м)	ед. СГС	4 · 10 ⁻⁷ Гн/м = 1 СГС
Магнитная восприимчивость	χ	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

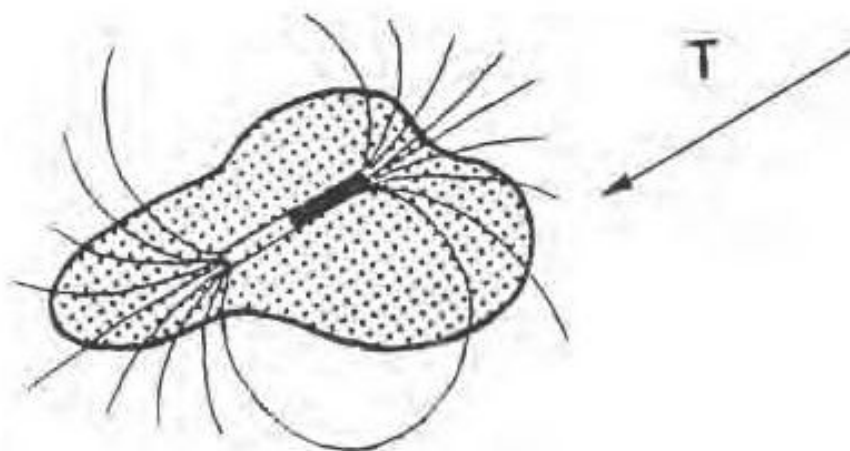
Магнитные свойства ферромагнитных минералов

Минерал	χ , ед.СИ	Минерал	χ , 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		

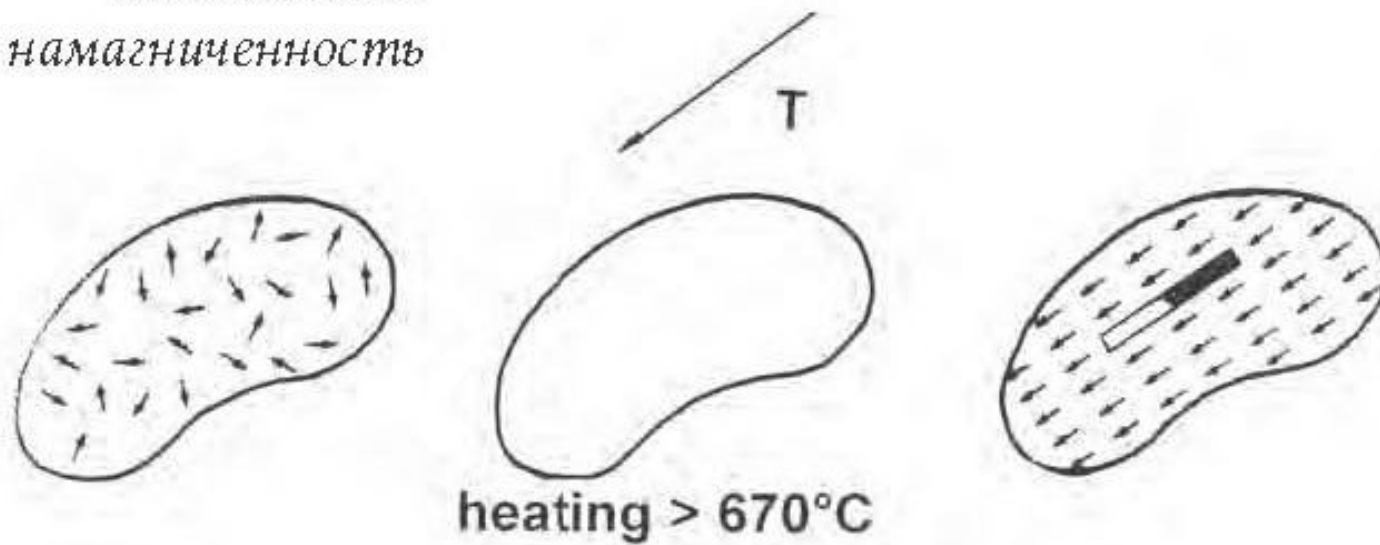
Магнитная восприимчивость, ед. СИ Объемный процент магнетита | 0,1% | 0,5% | 1% | 5% | 20% | 100% |

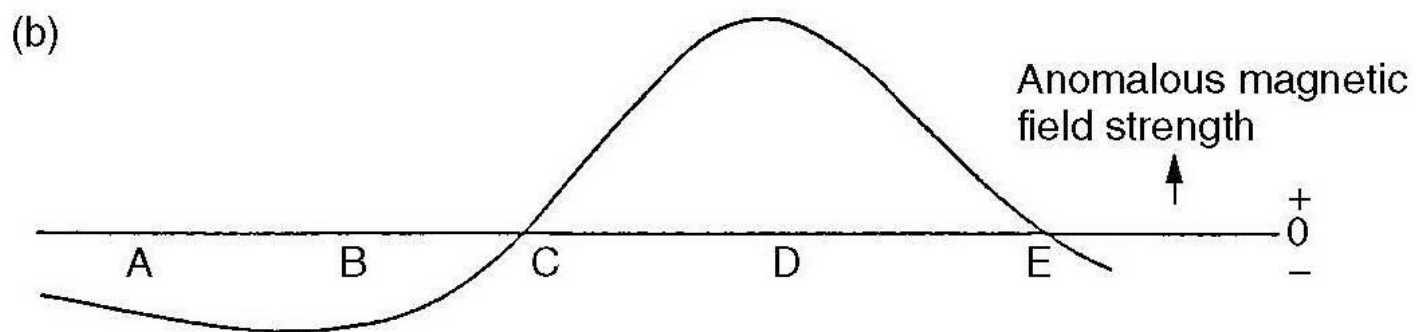
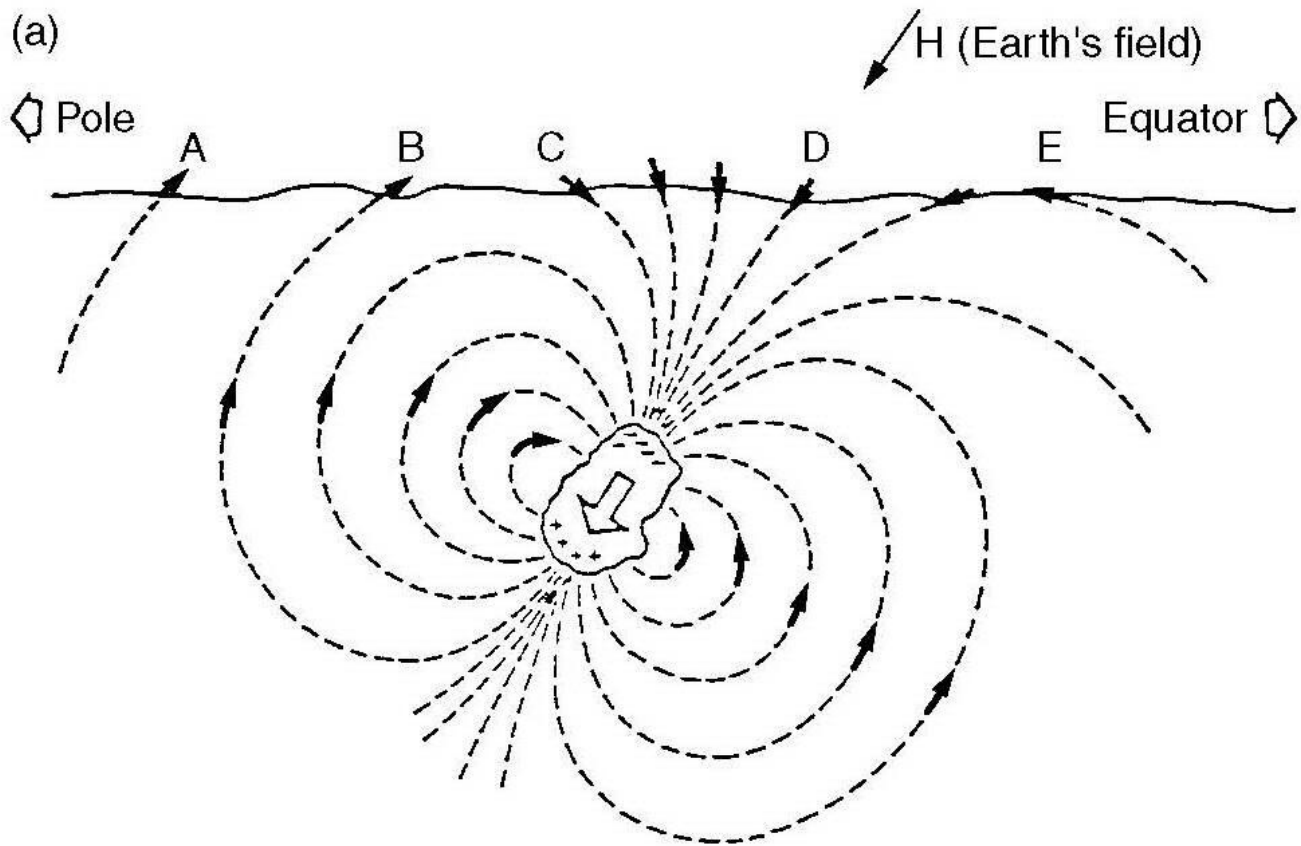
	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10	100
Железо									железо
Окиси железа			гематит		шлак		магнетит		
Вулканические породы				базальт					
			керамика						
			гранит						
			горелая почва						
			габбро						
			диорит						
Метаморфические породы			кварцит						
		песчаник							
			почва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

Индукцированная
намагниченность



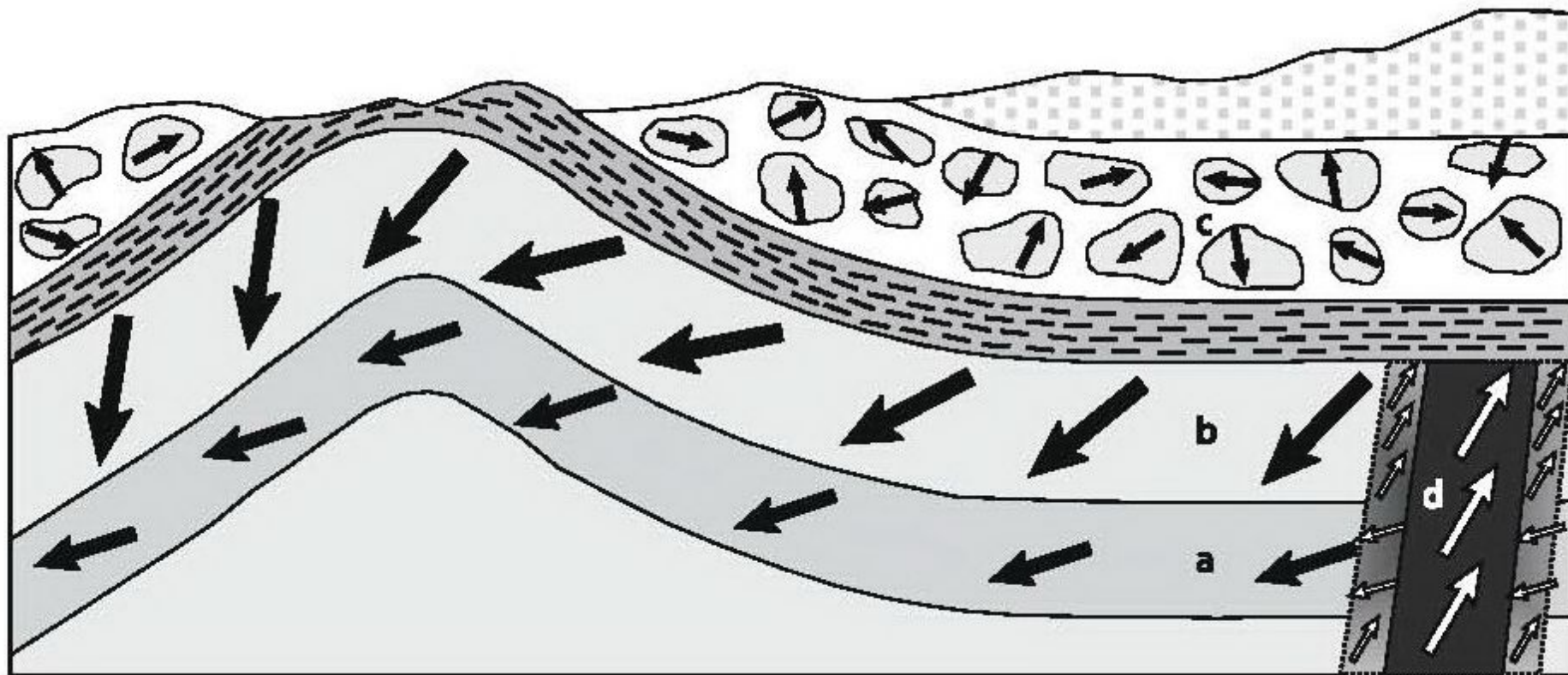
Остаточная
намагниченность





Естественная остаточная намагниченность.

Палеомагнетизм



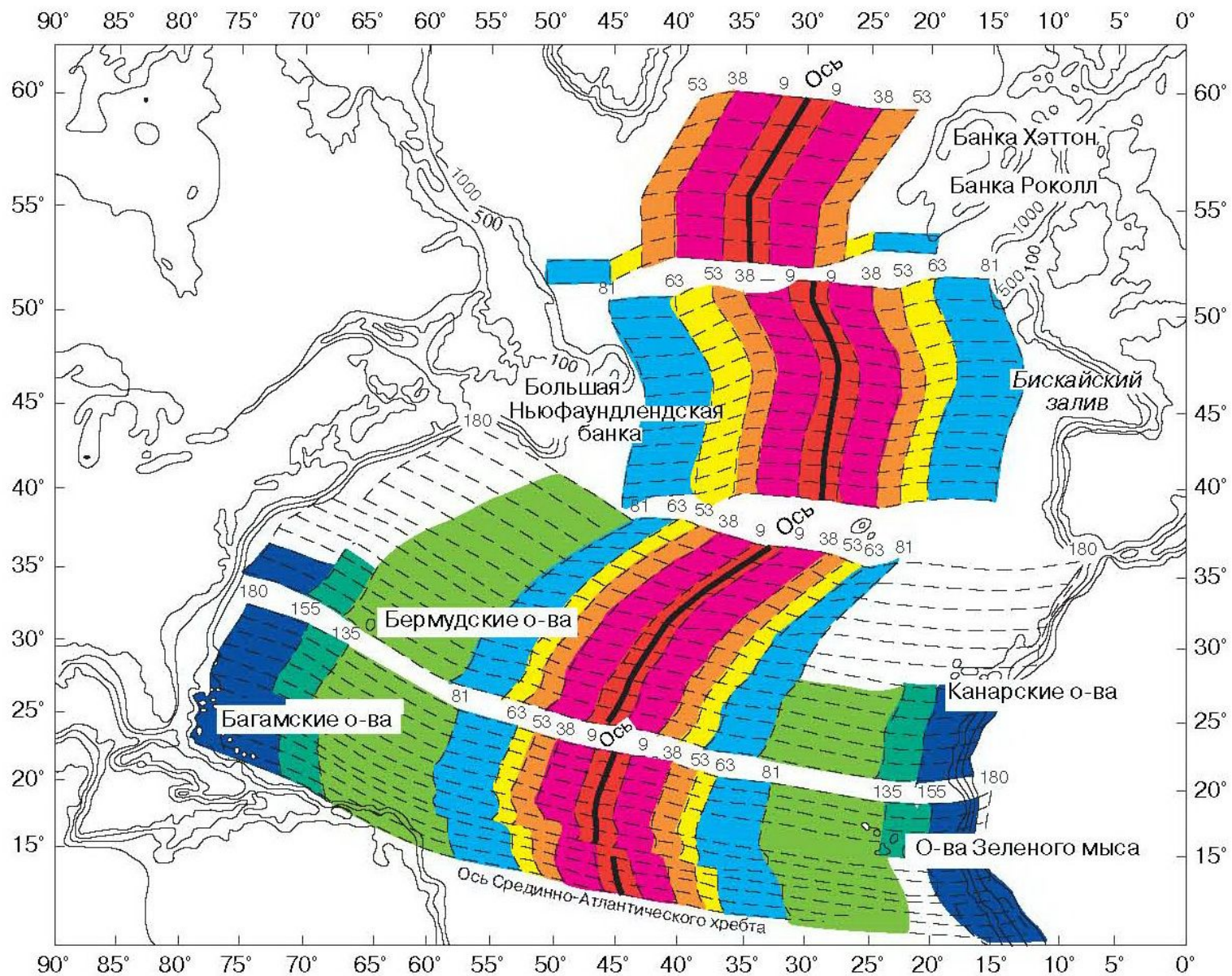


Рис. 5. Карта возраста пород океанического дна в Северной Атлантике, составленная по магнитным аномалиям У. Питменом и М.Тальвани в 1972 г. и впоследствии подтвержденная результатами глубоководного бурения. Разными цветами выделены участки океанического дна различных возрастных интервалов. Цифры обозначают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

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

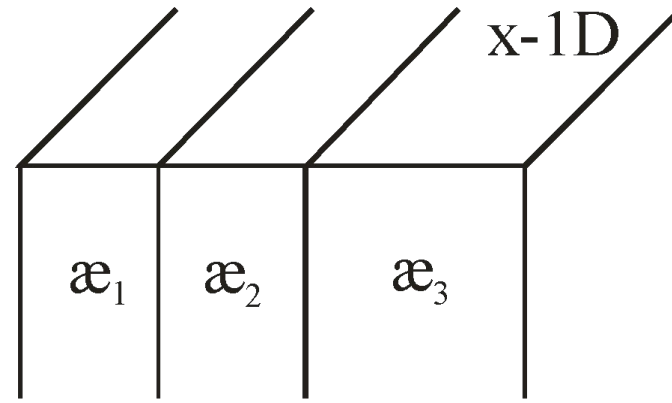
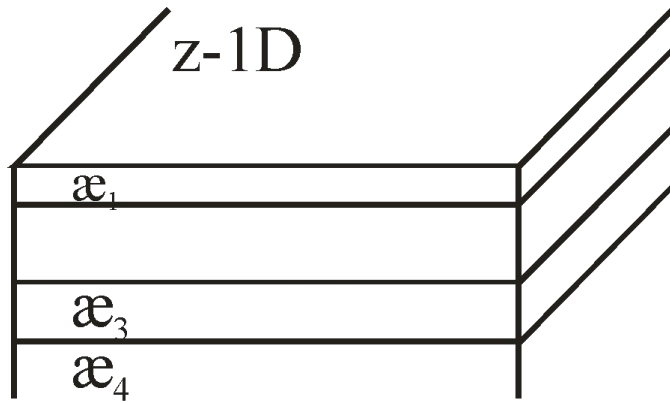
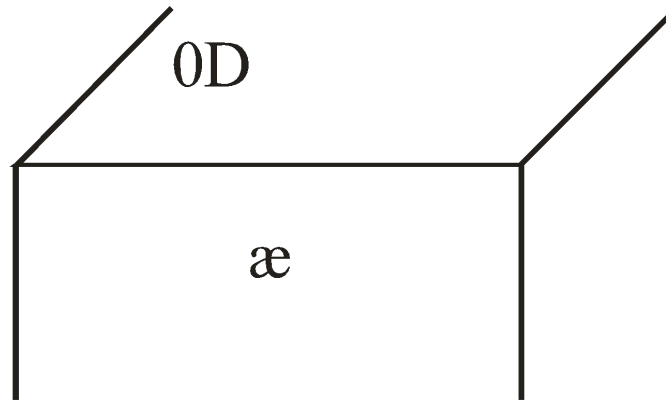
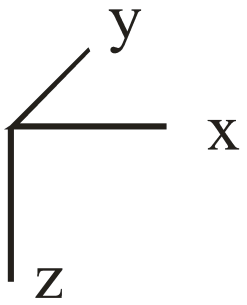
Упрощения ФГМ

Размерности

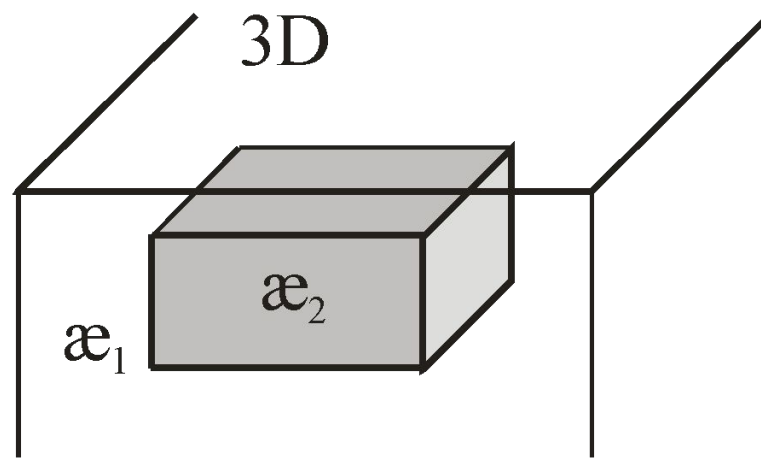
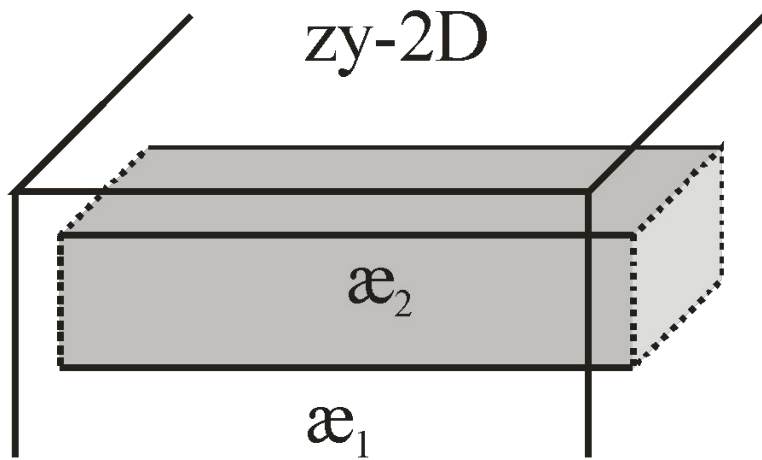
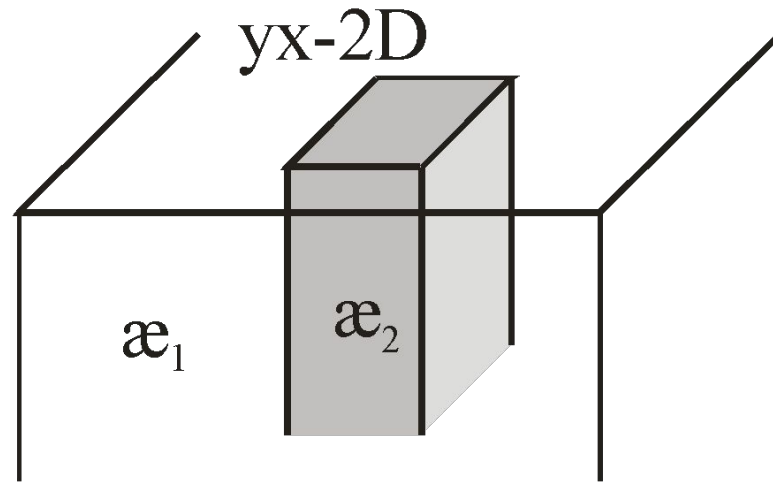
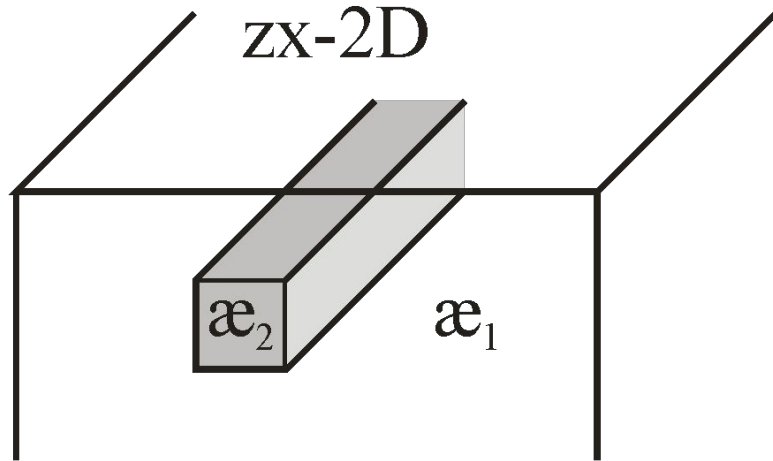
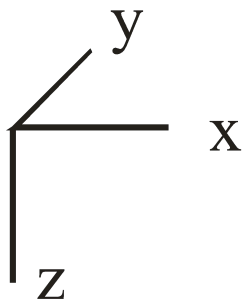
Распределения
физических
свойств

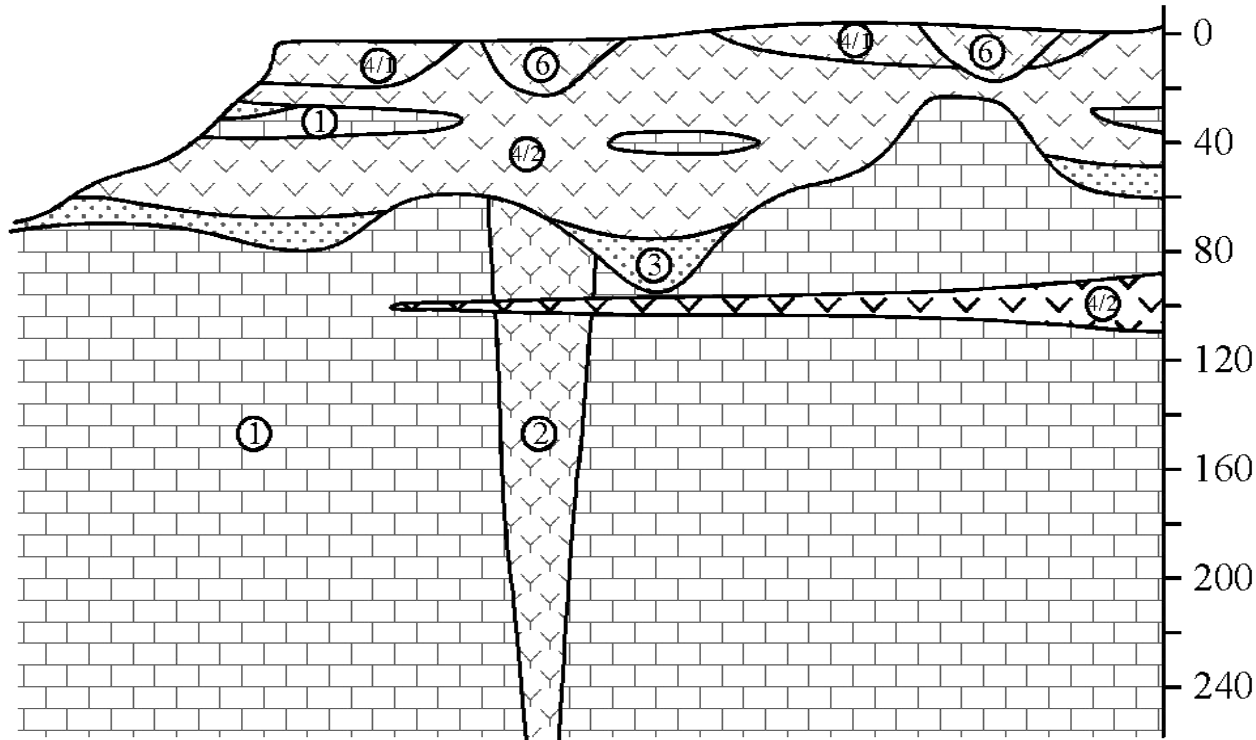
Формы

0D и 1D модели



2D и 3D модели



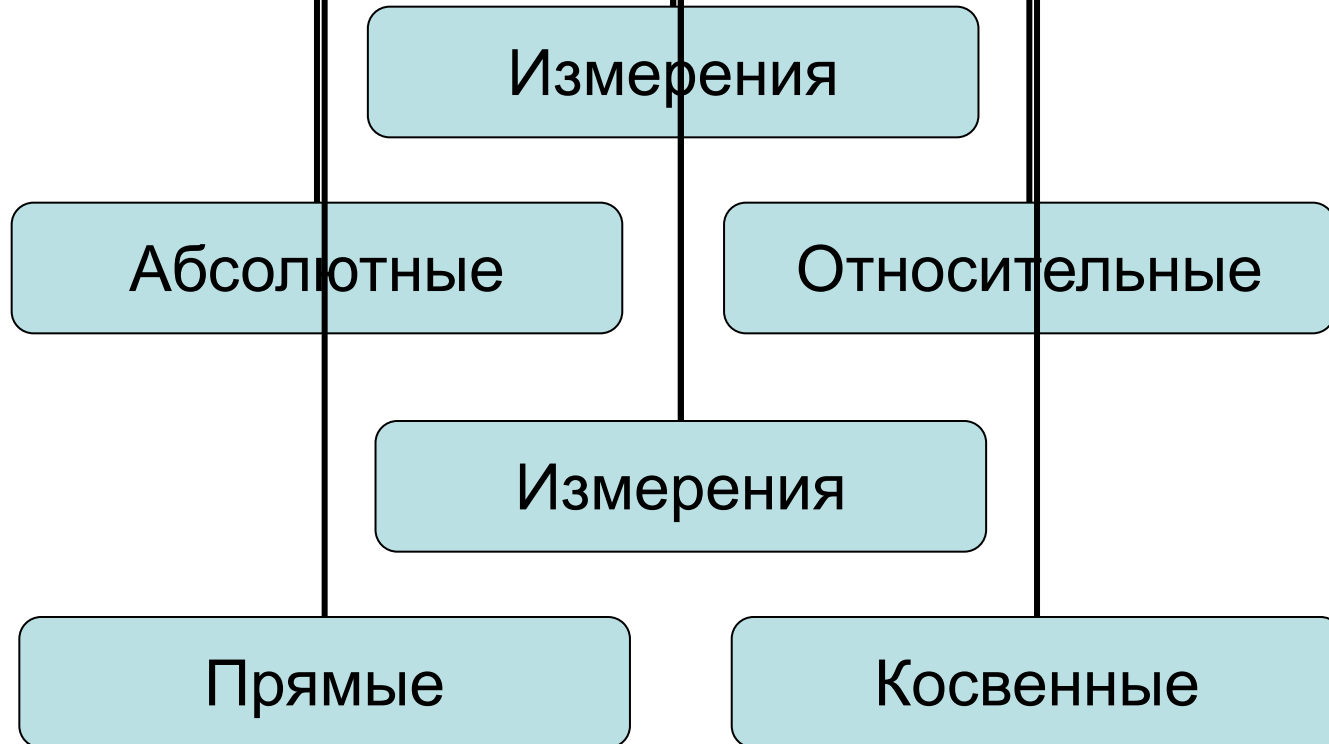


**ФГМ для кимберлитовой
трубки Далдынского поля
Якутской алмазоносной
провинции. [Доброхотова
и др., 1987]**

№ 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

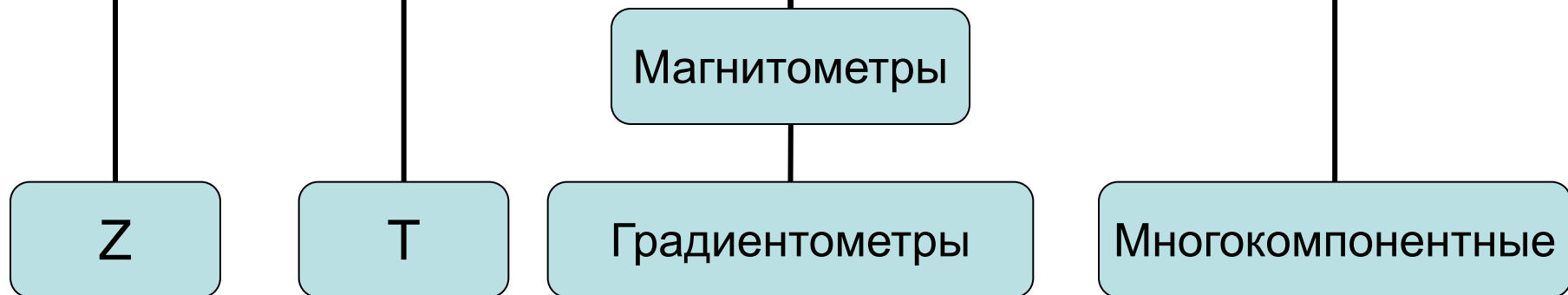
Протонные и Оверхаузера

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

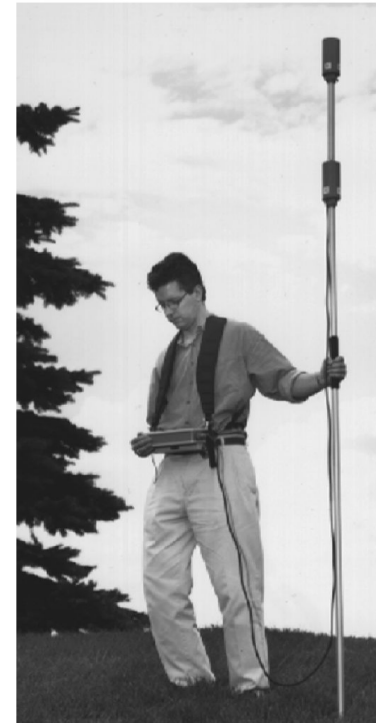
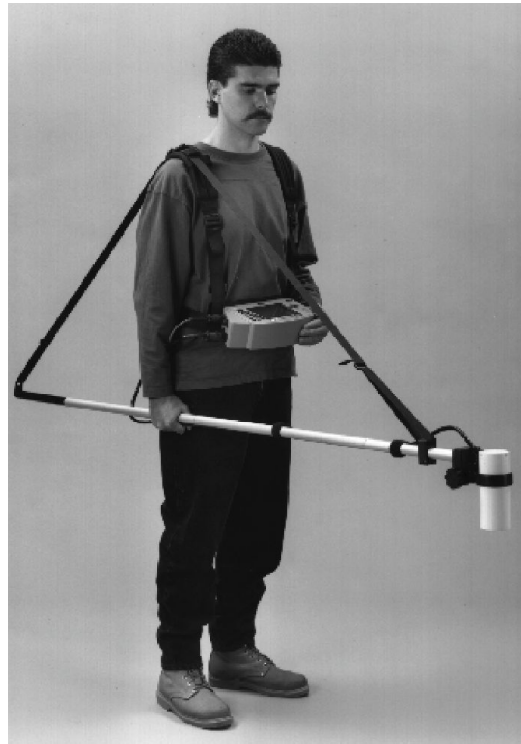


МИНИМАГ



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

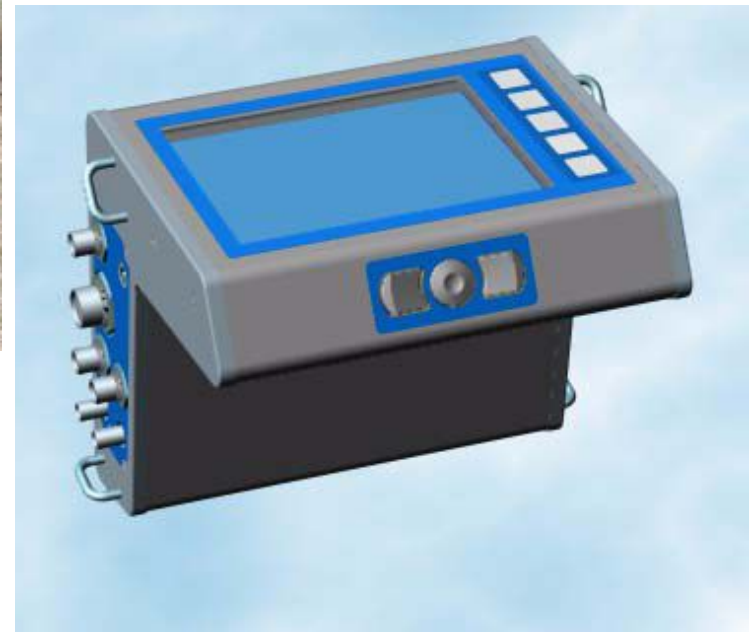


GSM-19T Proton
Precession
Magnetometer /
Gradiometer / VLF
system



"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.**

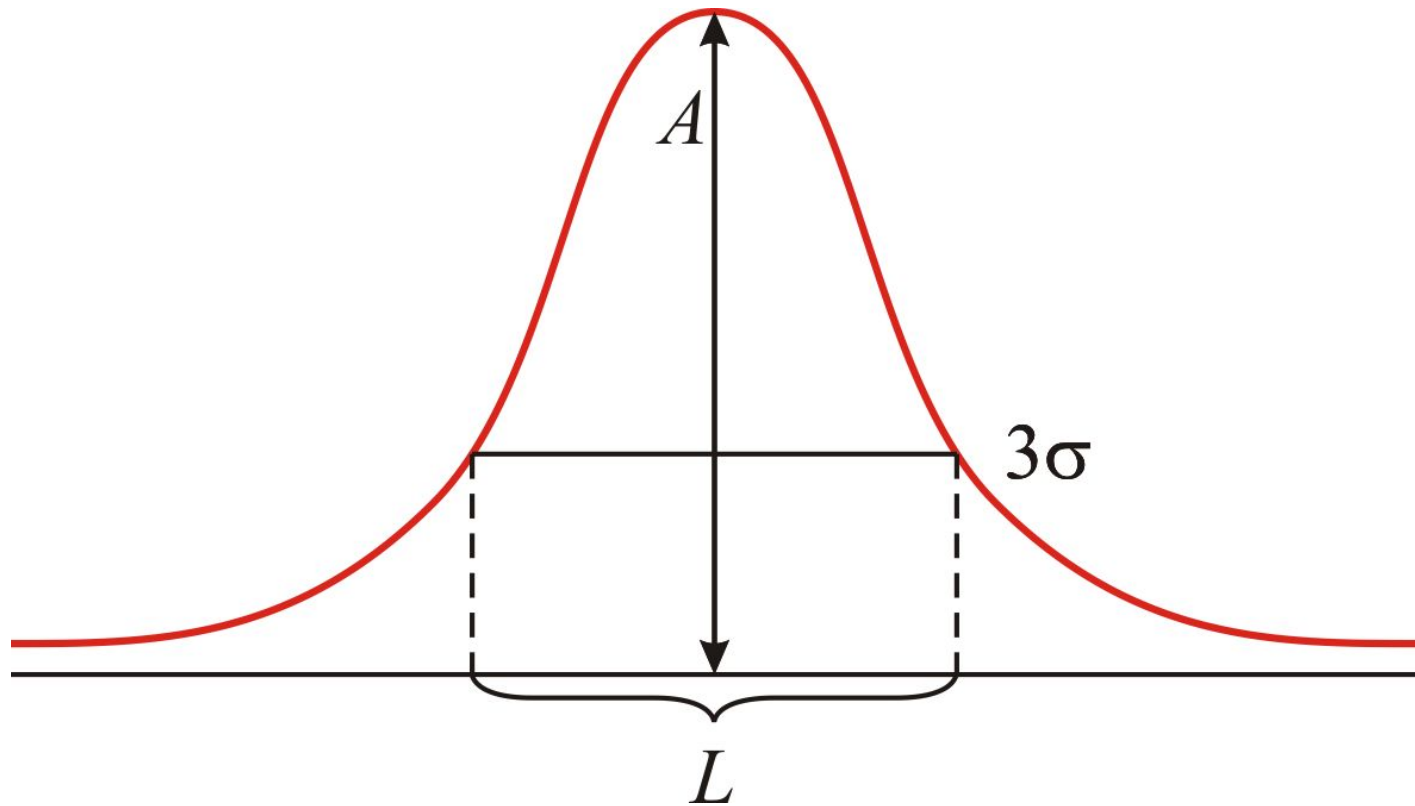
Прямая задача магниторазведки заключается в нахождении аномального магнитного поля от объекта с известными геометрическими и петрофизическими характеристиками.

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

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

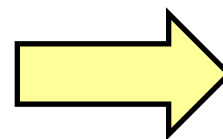
Ошибка второго рода – обнаружение ложной аномалии.

Выбор шага по профилю



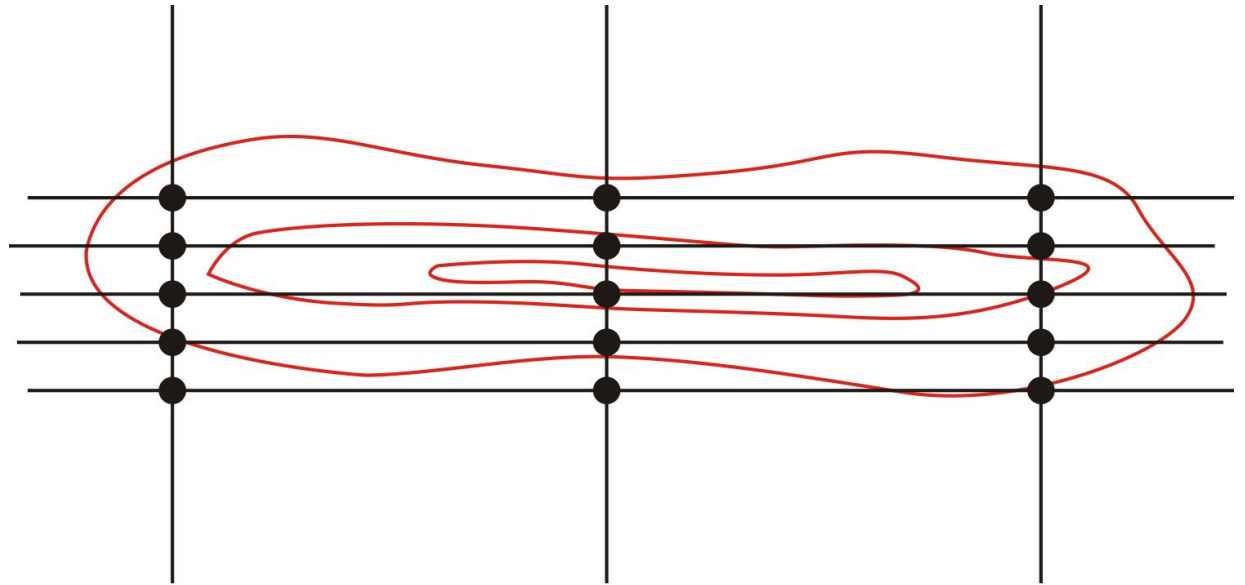
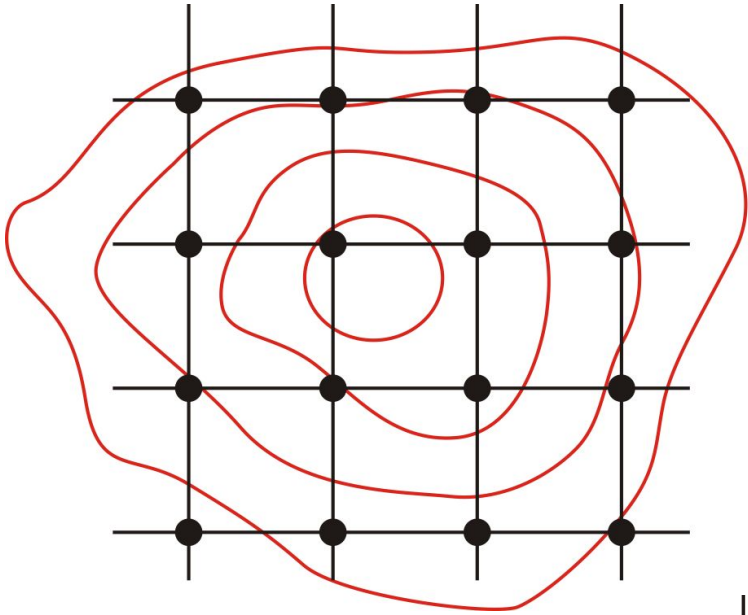
$$A_{\min} \geq 3\sigma$$

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



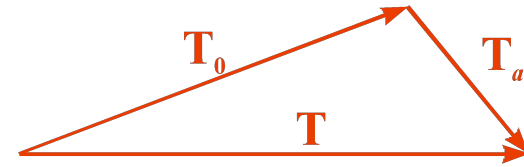
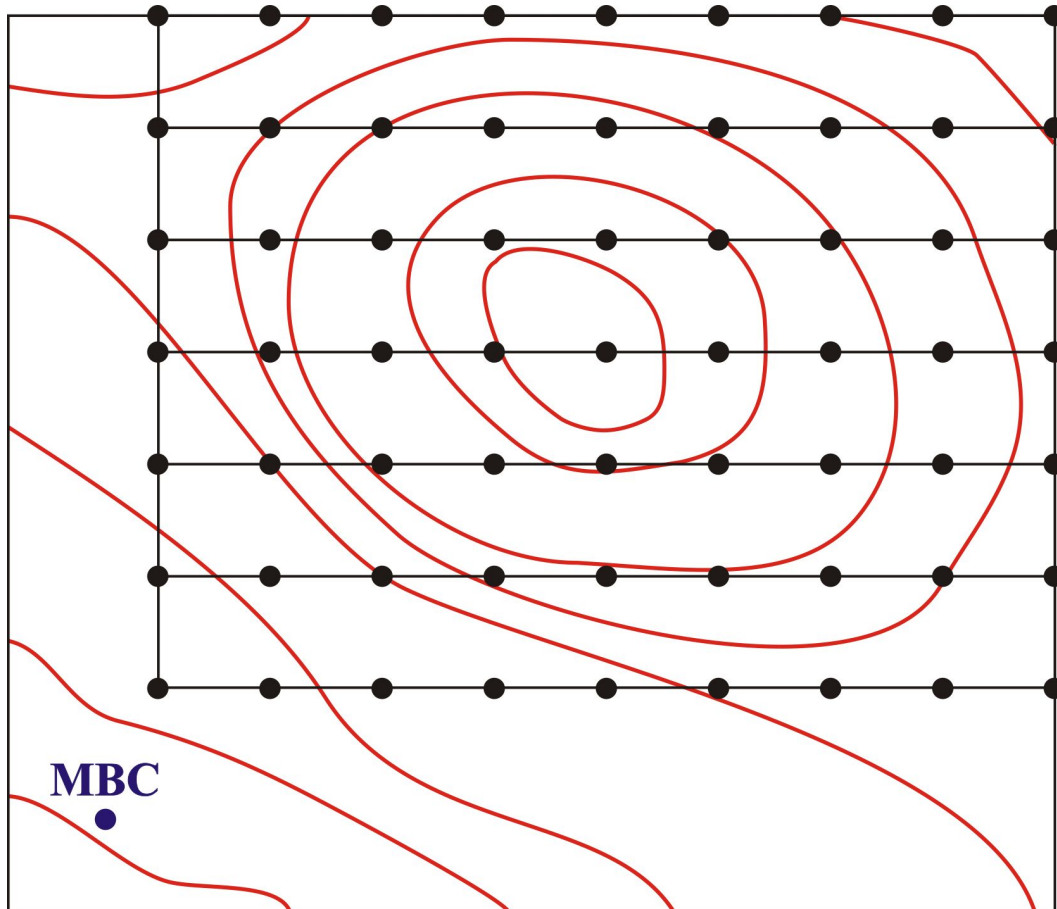
$$\Delta L = \frac{L}{3}$$

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:

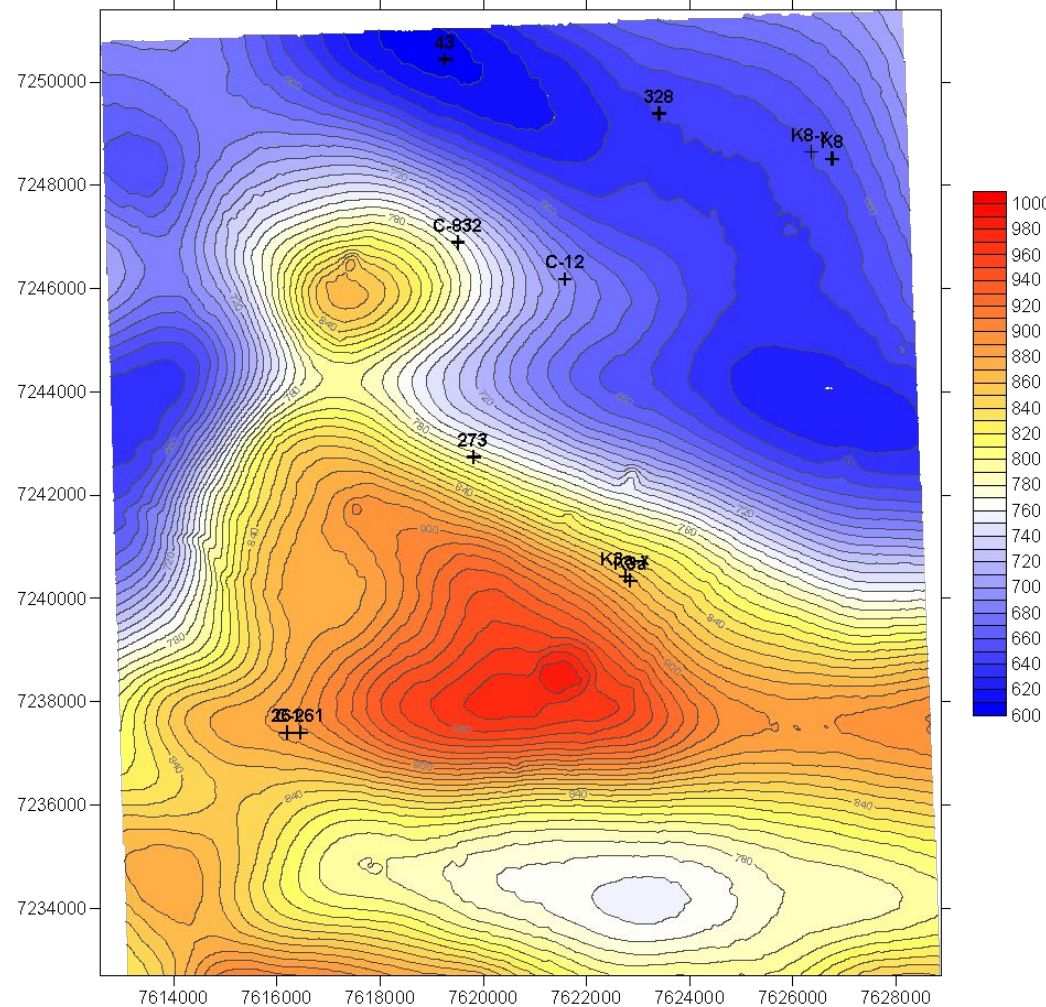
✓ T, Z, H, X, Y – изодинамы;

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

✓ D – изогоны;

✓ I – изоклины.

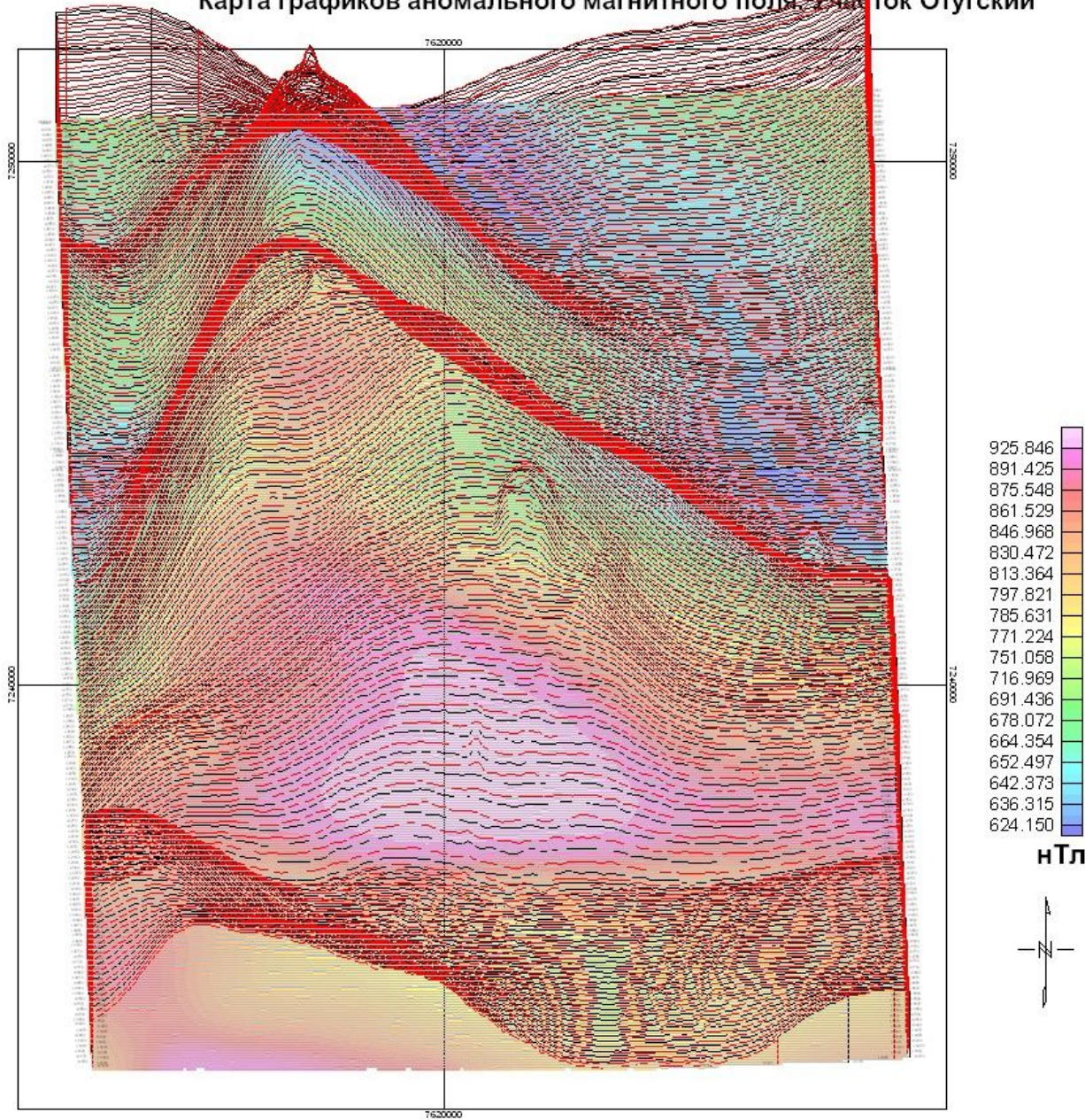
Èàòòà àí îí àèùí î ã î àã èòí î ã î îéü dTa
Î óóànéay î éí ù àáü



2007 ä

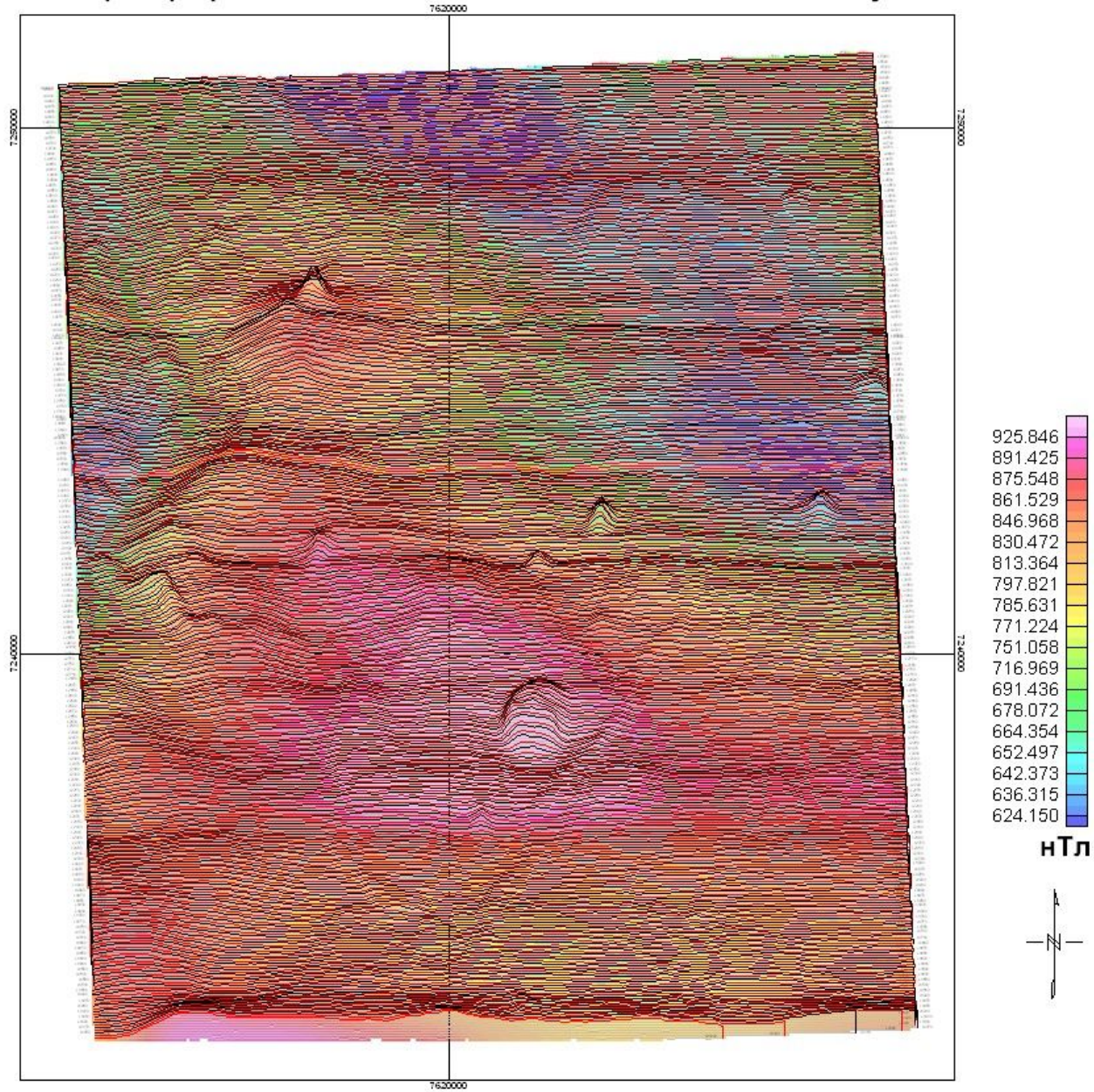
0 5000 10000 15000 20000 25000

Карта графиков аномального магнитного поля. Участок Отугский



Scale 1:50000

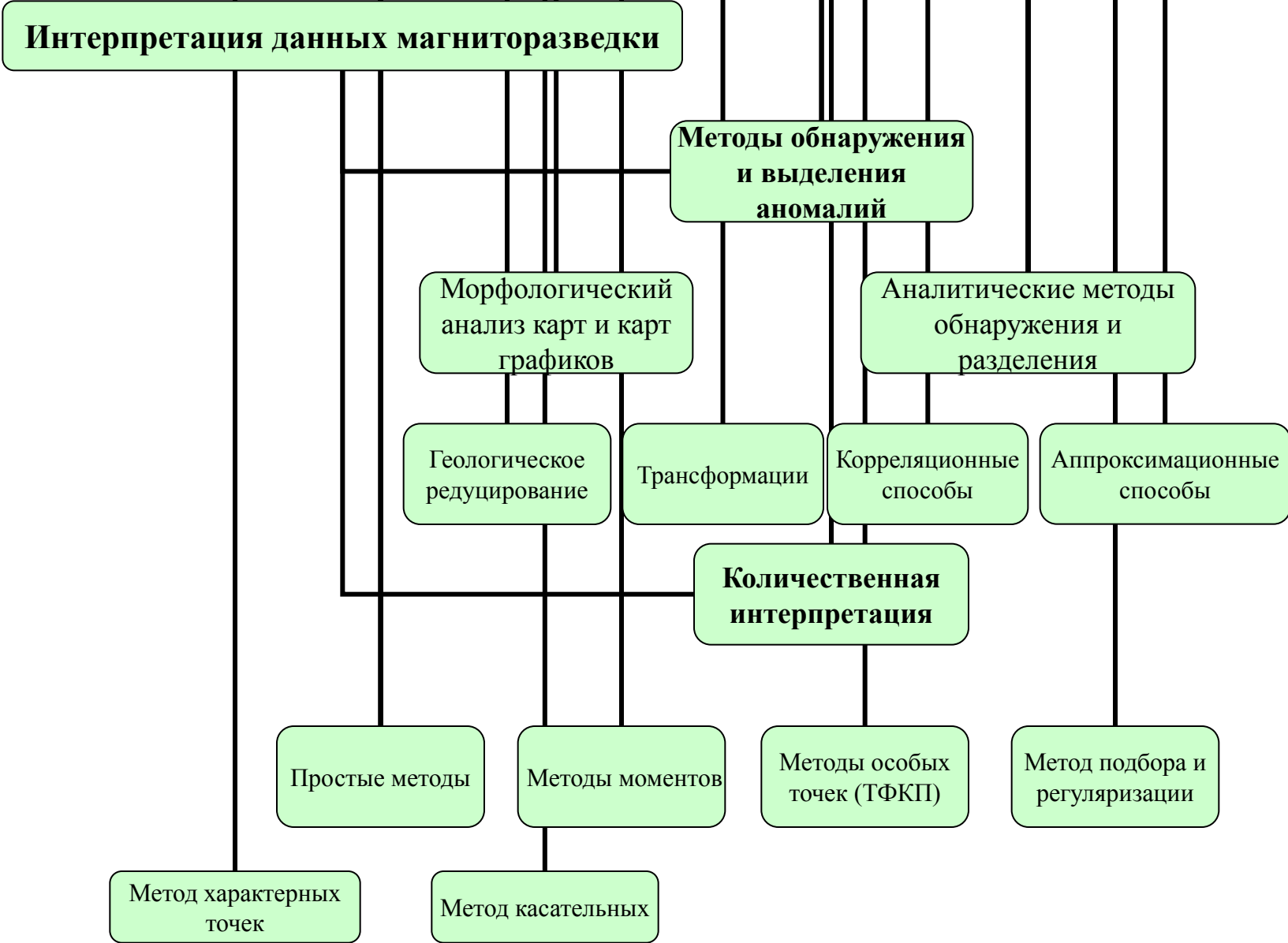
Карта графиков остаточного магнитного поля. Участок Отугский



Scale 1:50000



Масштаб вертикальный в 1см - 20 нТл



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

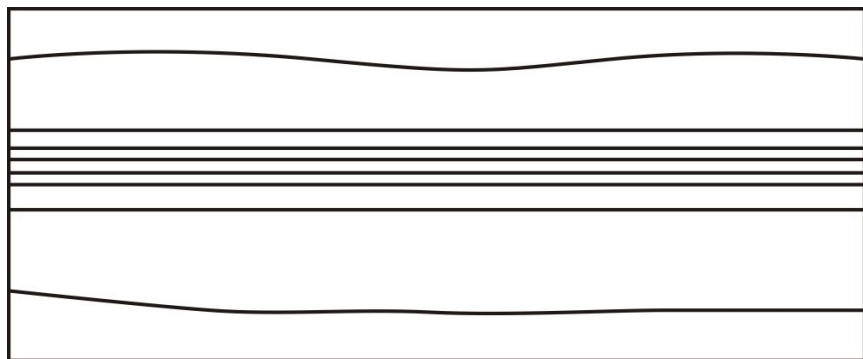
Методы особых точек (ТФКП)

Метод подбора и регуляризации

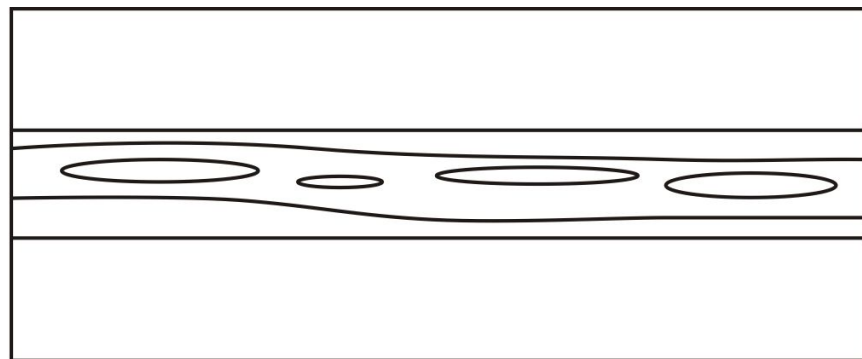
Метод характерных точек

Метод касательных

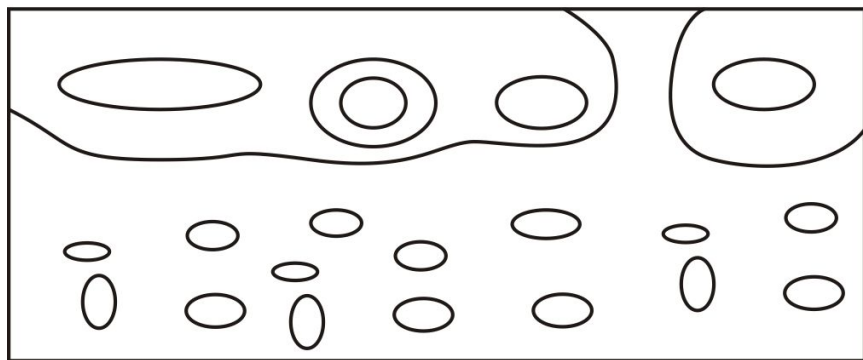
Признаки наличия разломов



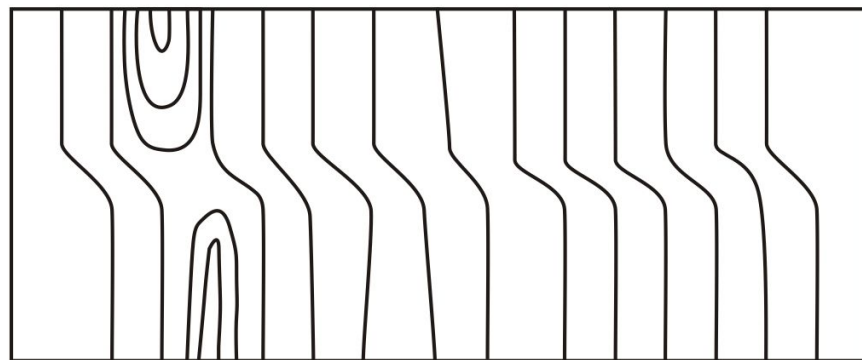
а.



б.



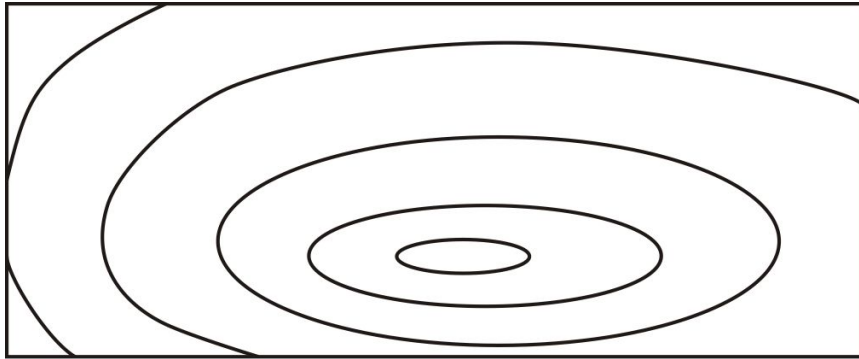
в.



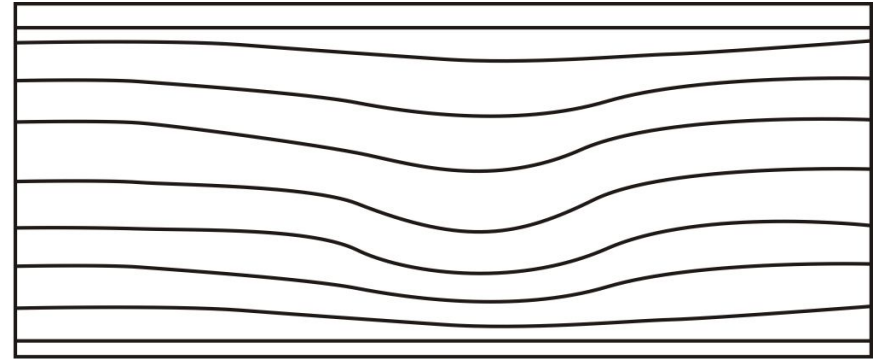
г.

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

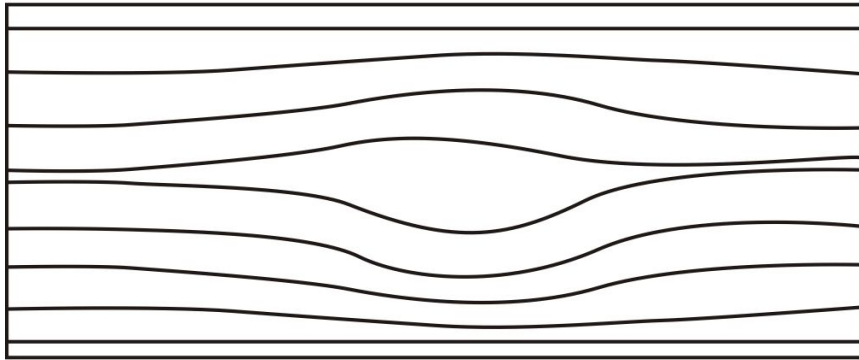
Признаки наличия локальных аномалий



а.



б.



в.



г.

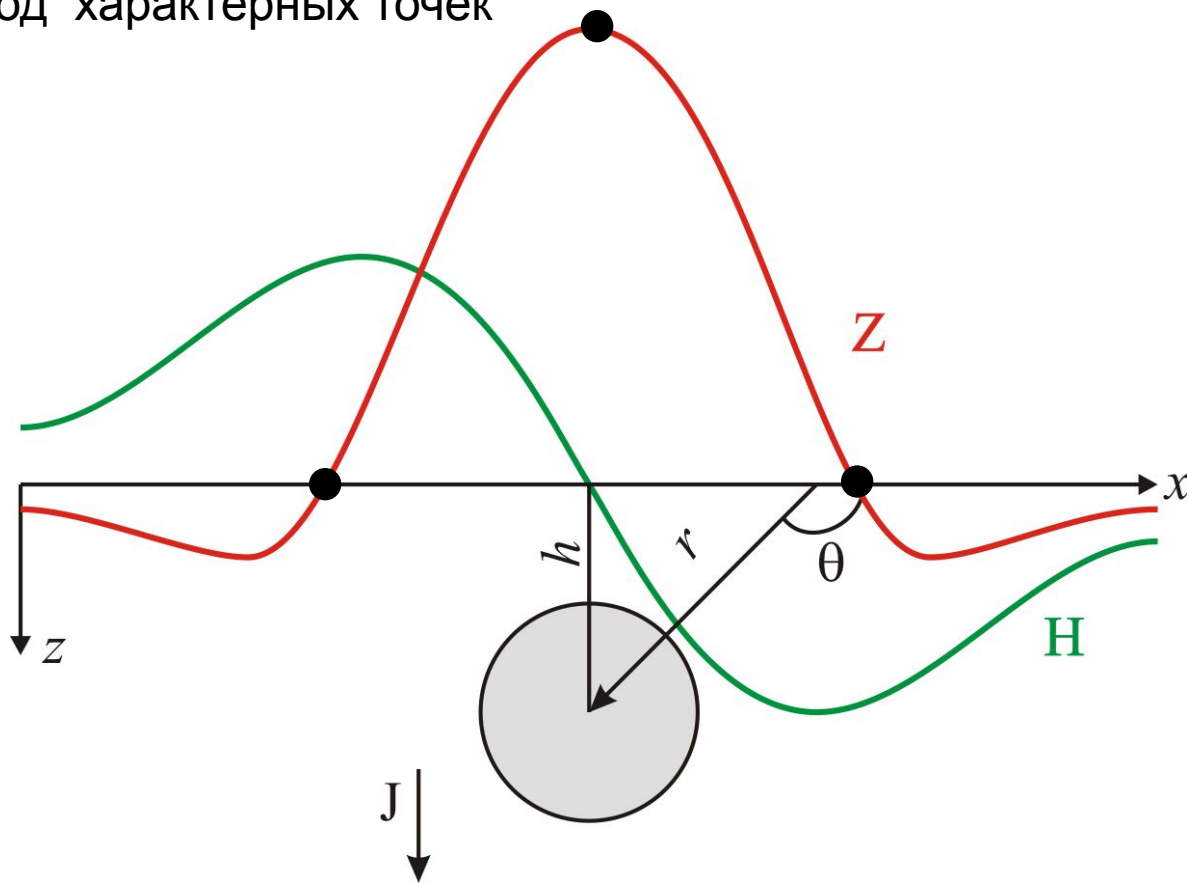
- а. замкнутые изолинии;
- б. местные изгибы изолиний;
- в. миндалевидные расширения изолиний;
- г. малые градиентные зоны (сгущение изолиний).

Методы обнаружения и разделения аномалий

Группа способов разделения	Объем требуемой информации
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.

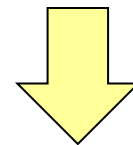
Простые способы решения обратной задачи магниторазведки

Метод характерных точек



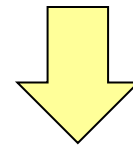
$$Z_a = \frac{M(2h^2 - x^2)}{(h^2 + x^2)^{5/2}}$$

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



$$Z_a = \max \text{ при } x_0 = 0$$

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



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

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.