

Магнитометрия

Лекция 6.

Общие положения

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{J})$$

B - магнитная индукция (Тл)

H – напряженность магнитного поля (А/м)

J – намагниченность (А/м)

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Тл м)/А – магнитная постоянная

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}$$

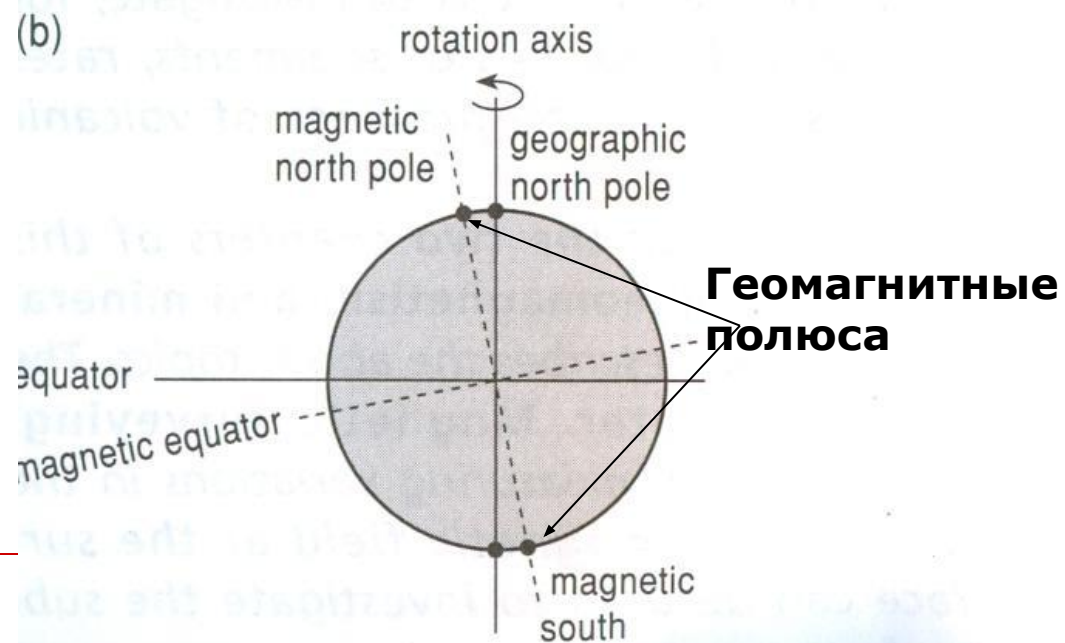
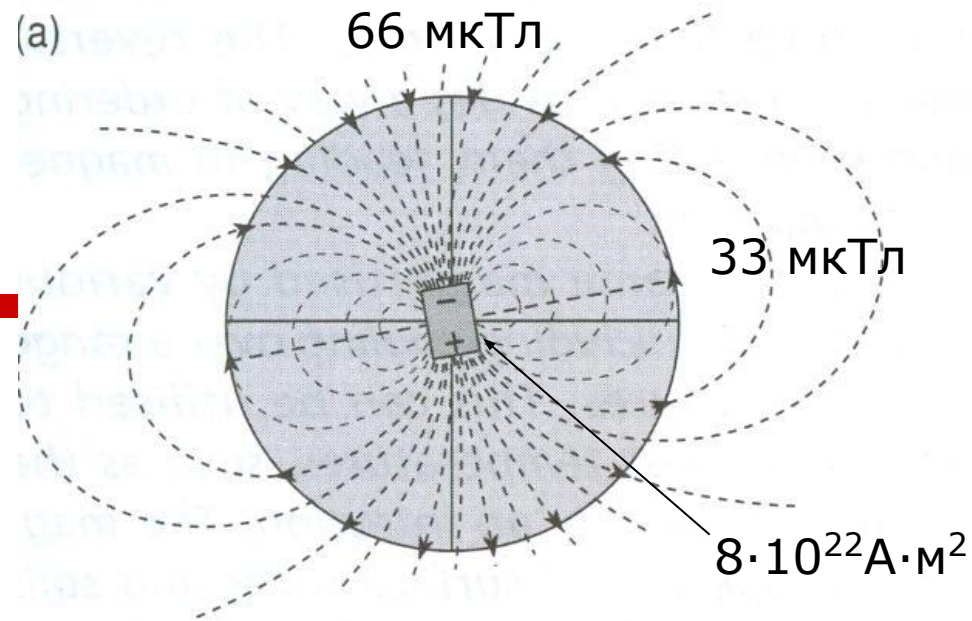
μ – магнитная проницаемость вещества

$$\mathbf{J} = \chi\mathbf{H}$$

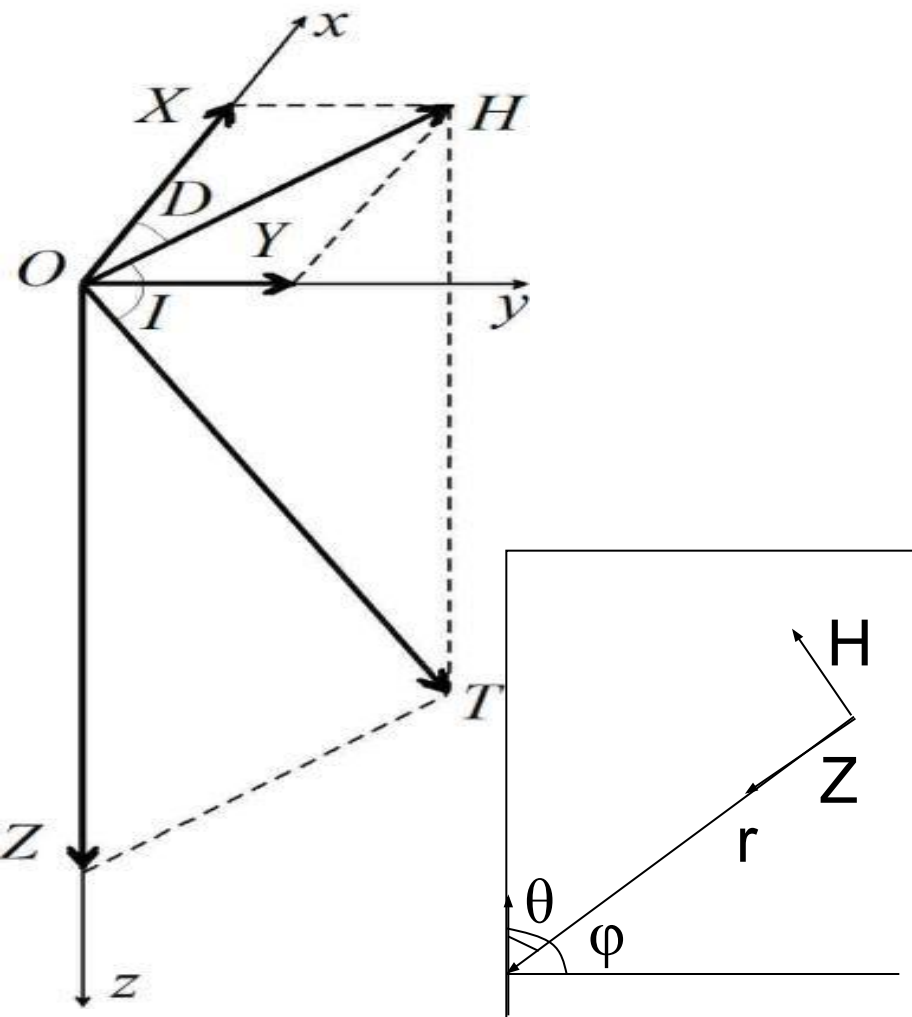
χ – магнитная восприимчивость вещества

6.1 Магнитное поле Земли: дипольное поле

Геомагнитные полюса:
Северный 79 с.ш., 71 з.д.
Южный 79 ю.ш., 109 в.д.



Составляющие магнитного поля



Потенциал магнитного
диполя

$$U = \frac{\mu_0 M \cos \Theta}{4\pi r^2}$$

Составляющие поля

$$-\frac{dU}{dr} = Z = \frac{\mu_0 2M}{4\pi r^3} \cos \Theta = \frac{\mu_0 2M}{4\pi r^3} \sin \varphi$$

$$-\frac{dU}{rd\Theta} = H = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \sin \Theta = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \cos \varphi$$

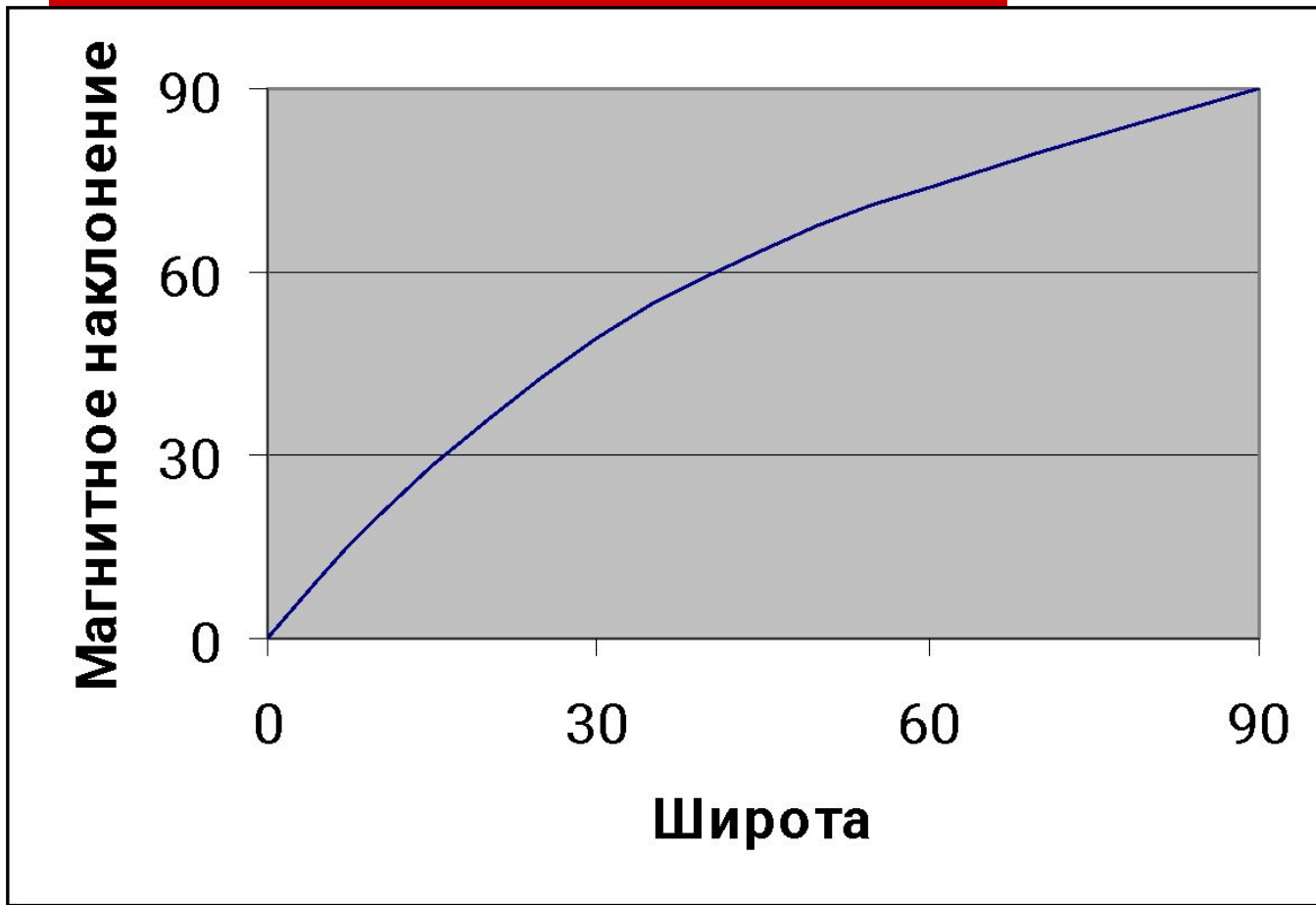
$$T = \sqrt{H^2 + Z^2} = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \sqrt{4 \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi} =$$

$$= \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \sqrt{3 \sin^2 \varphi + 1}$$

Магнитное
наклонение:

$$\operatorname{tg} I = \frac{Z}{H} = 2 \operatorname{tg} \varphi$$

Магнитное наклонение



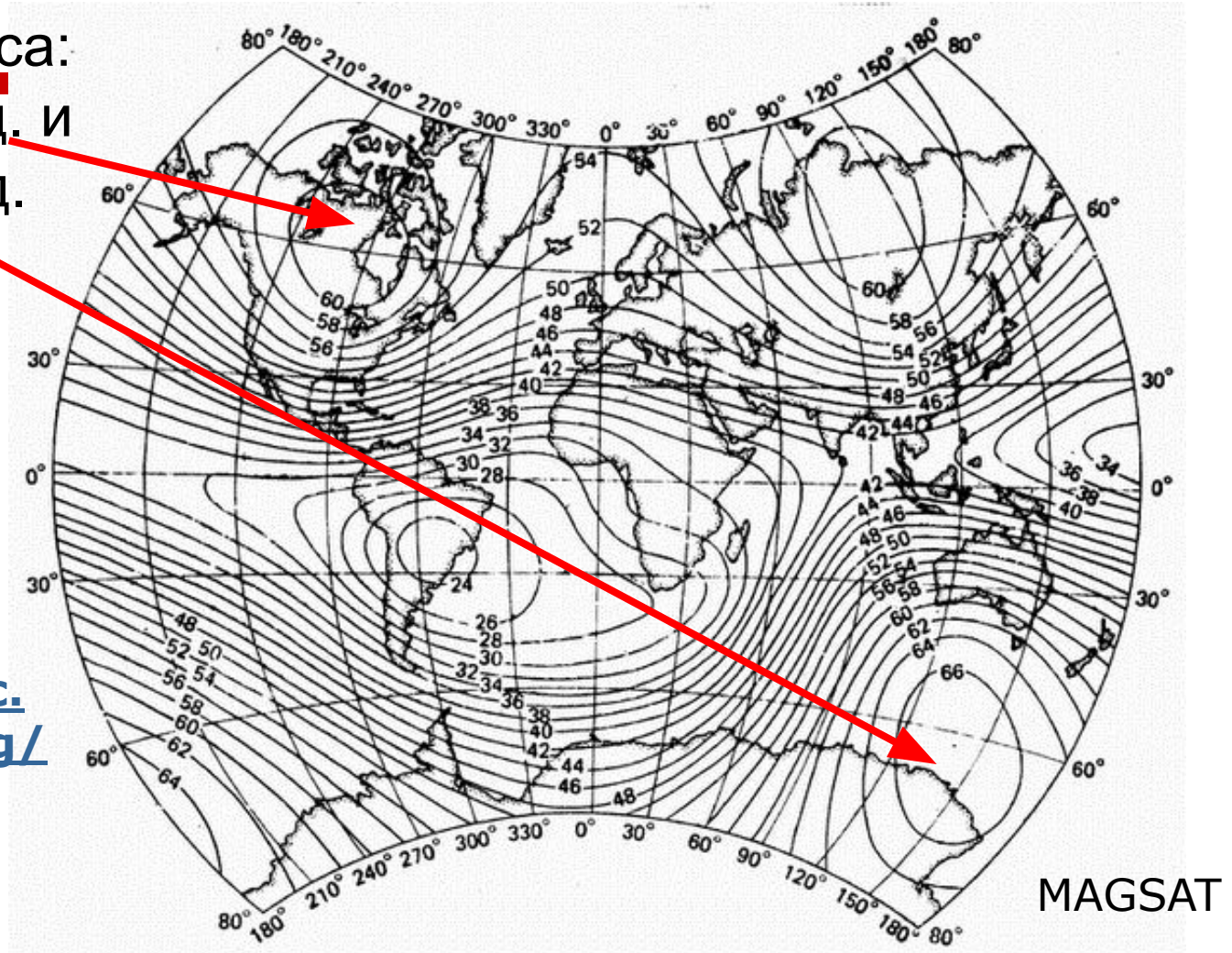
$$\operatorname{tg} I = \frac{Z}{H} = 2 \operatorname{tg} \varphi$$

На самом деле поле – сложнее по структуре...

Магнитные полюса:
76° с.ш., 101° з.д. и
66° ю.ш., 141° в.д.

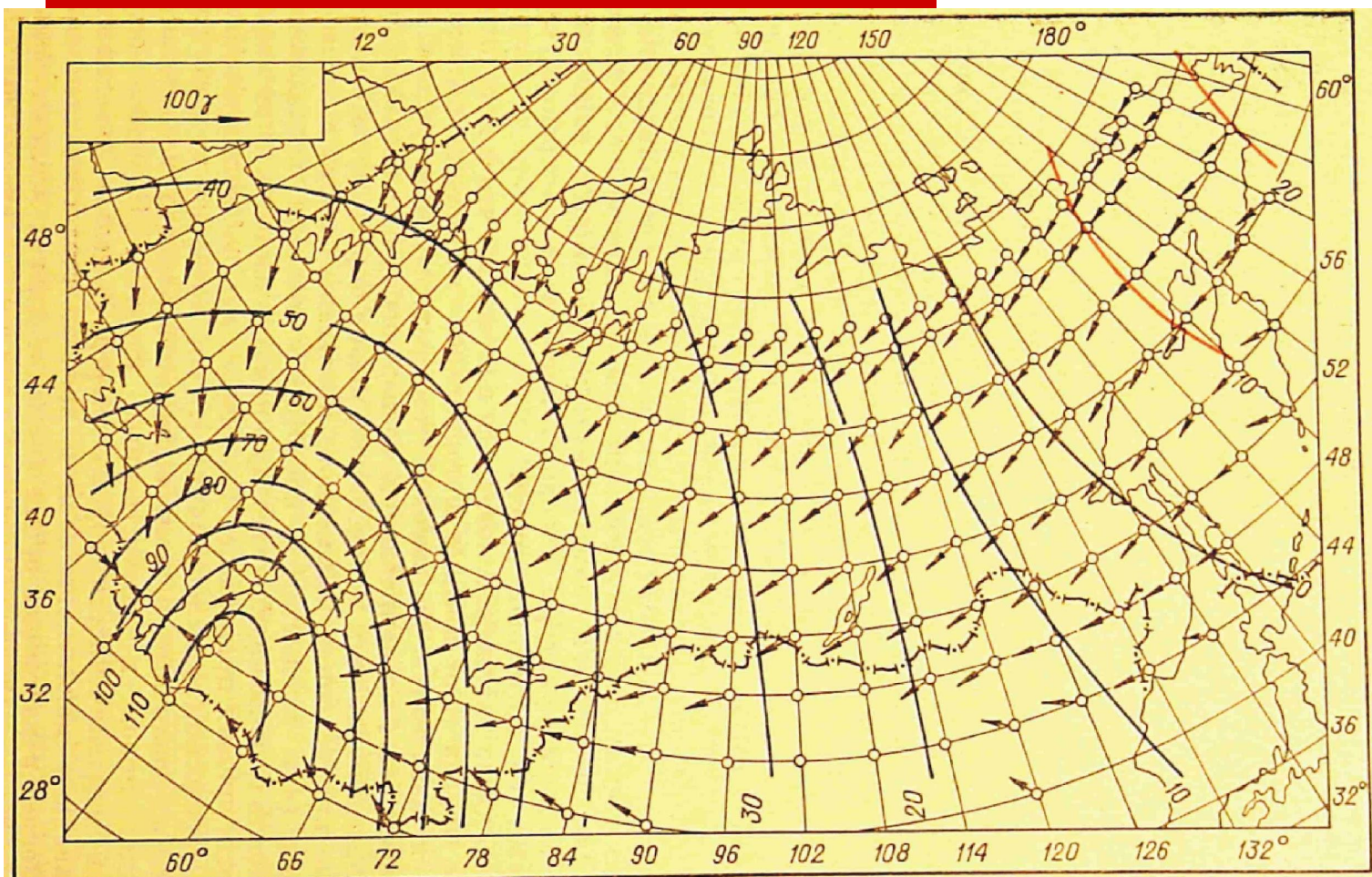
Калькулятор
магнитного поля

<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/magfield.shtml>



Главное магнитное поле Земли (T_0 , микротесла) состоит из дипольной составляющей и континентальных аномалий

...и меняется со временем



Изменения магнитного поля, нТл/год

6.2 Магнитные аномалии

$$\Delta T = T - T_0$$

T_0 - карты магнитного поля среднего – крупного масштаба,
-калькулятор

T - измеренное значение поля

ΔT - скаляр (!) “приращение модуля вектора индукции магнитного поля”

Чем они отличаются от гравитационных?

- Могут превышать магнитное поле Земли (>66 мкТл);
 - Как правило – биполярные, имеют положительную и отрицательную части
-

6.3 Изменение магнитного поля со временем:

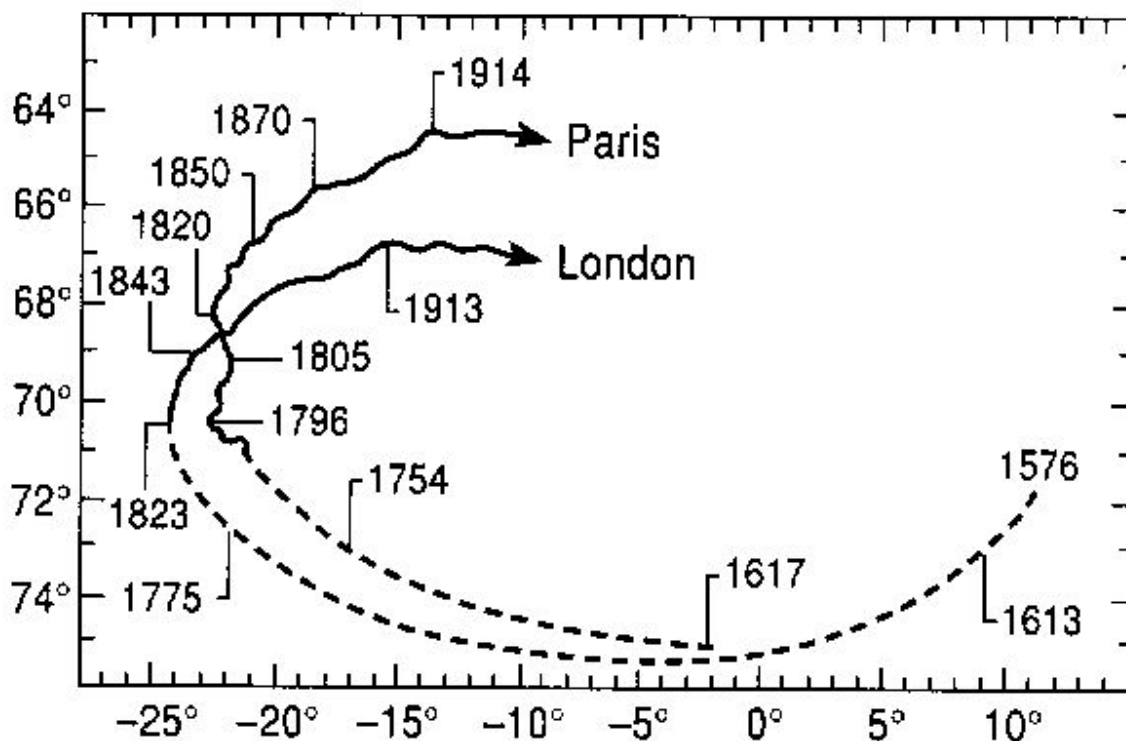
(а) солнечно-суточные вариации



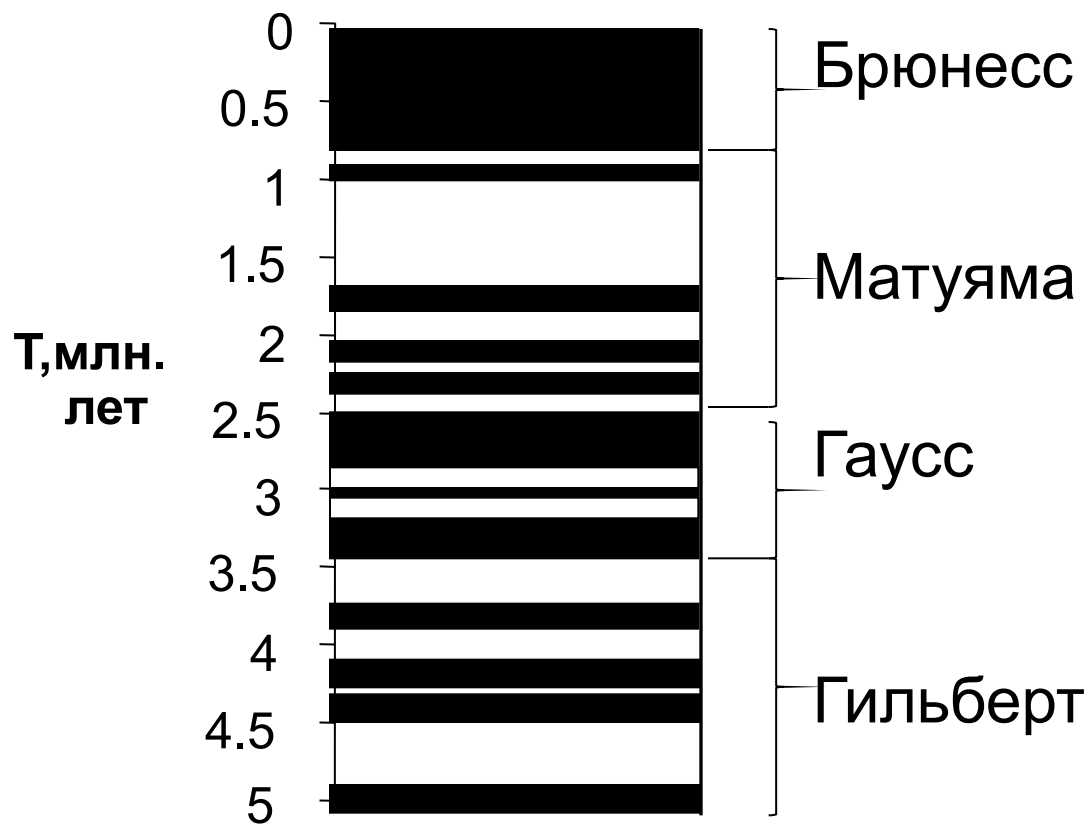
Рис. 39. Магнитосфера Земли:

1 — силовые линии магнитного поля диполя;
2 — силовые линии геомагнитного поля; 3 —
граница магнитосферы; 4 — переходная зо-
на; 5 — область, занятая солнечным ветром

(б) Вековой ход магнитного поля

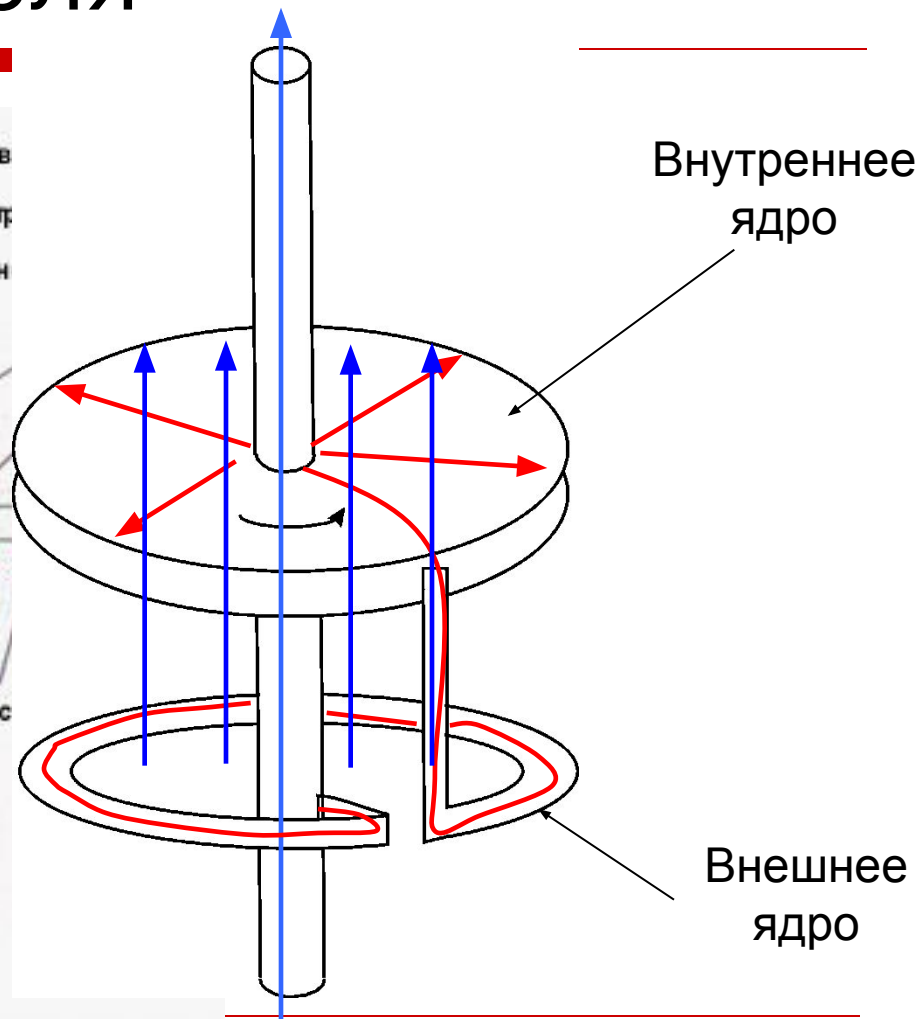
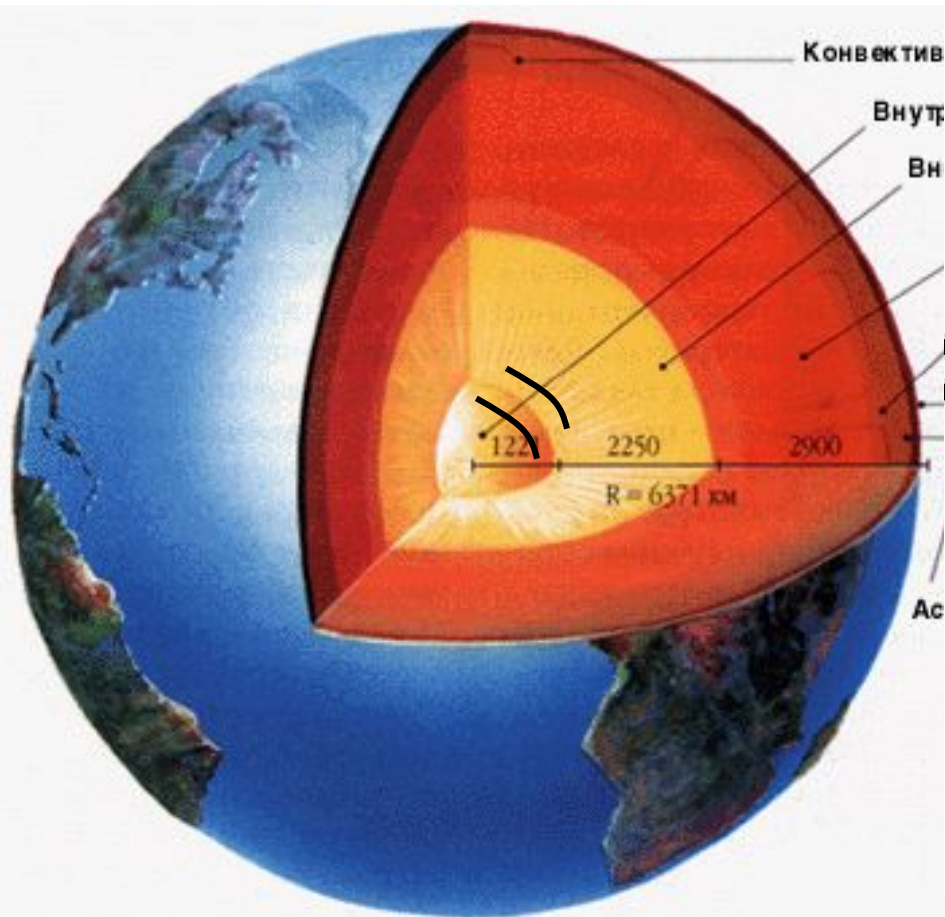


(в) инверсии магнитного поля



(пример последних пяти миллионов лет)

6.4 Происхождение магнитного поля



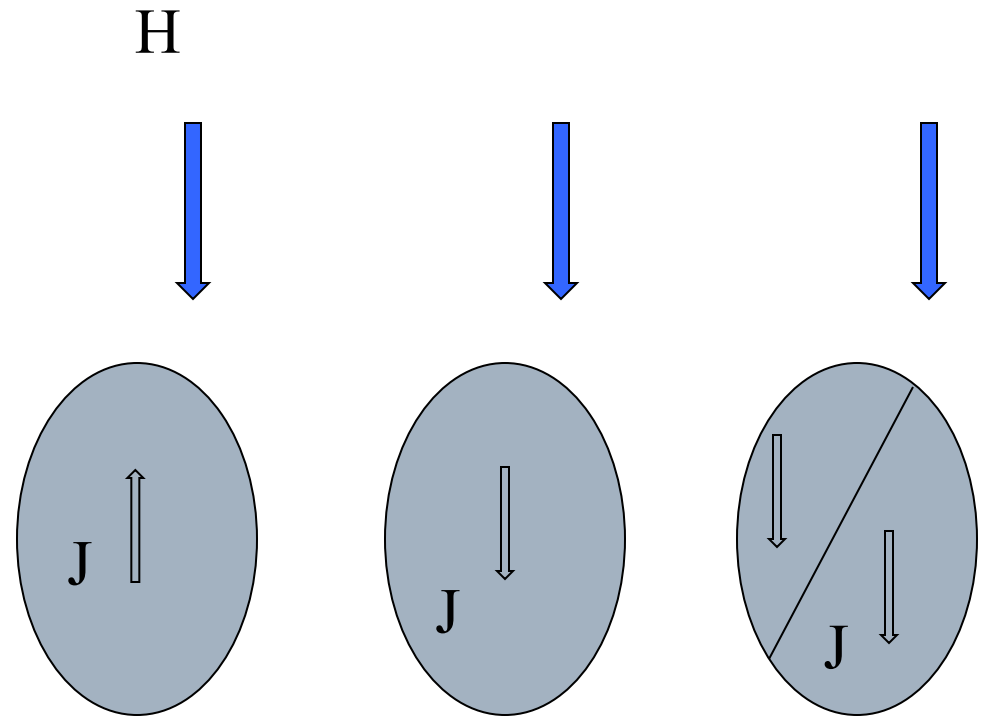
6.5 Магнетизм горных пород

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{J}) \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{M}/V \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \chi\mathbf{H} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} \quad (4)$$

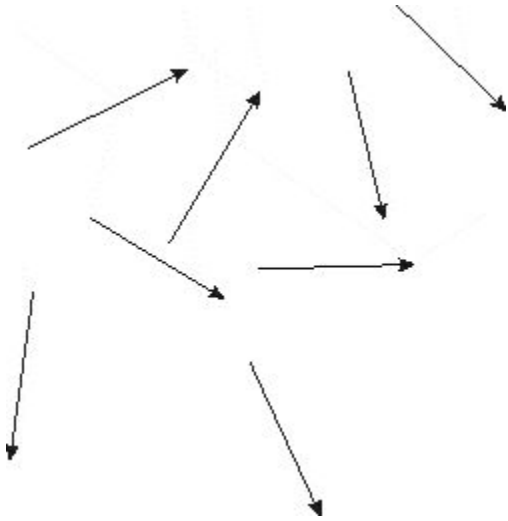


Диамагнетик
 $\chi \sim -10^{-6}$

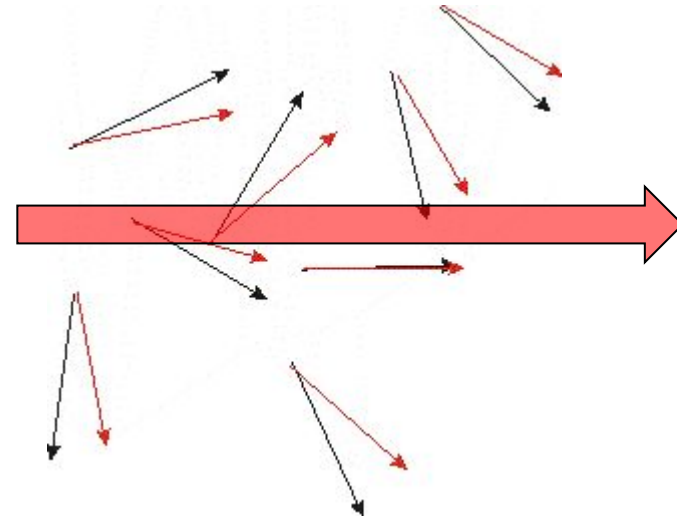
Парамагнетик
 $\chi \sim 10^{-6} - 10^{-3}$

Ферромагнетик

Парамагнетики: распределение магнитного момента



Парамагнетик:
Поле = 0



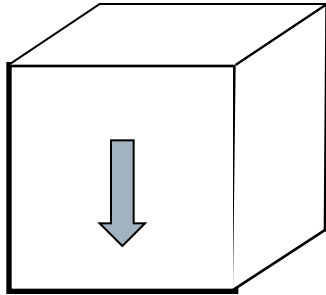
Парамагнетик:
Приложено поле

Магнитная восприимчивость диа- и парамагнитных минералов

Минерал	$\chi, 10^{-5} \text{СИ}$	Минерал	$\chi, 10^{-5} \text{СИ}$
Микроклин	0	Кварц	-1.6
Плагиоклаз		Циркон	-1.2
Плагиоклаз с железистыми примесями		Галенит	-3.3
Мусковит	>50	Касситерит	-2.0
	4-21	Ковеллин	-1.2
		Сфалерит	-6.5
		Графит	-25/-0.6
		Ортоклаз	-0.6

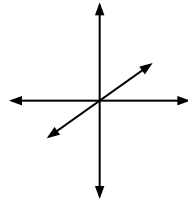
Ферромагнетики: спонтанное намагничивание

Ферромагнитное зерно
малого размера (<0.001 – 1 mm):

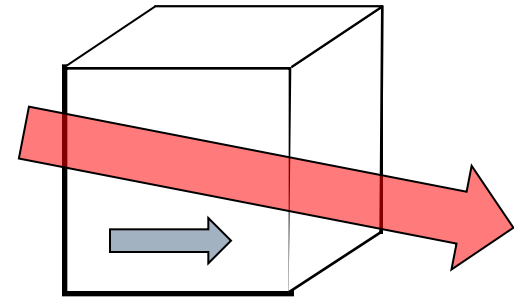


**Магнитный
момент**

Поле=0



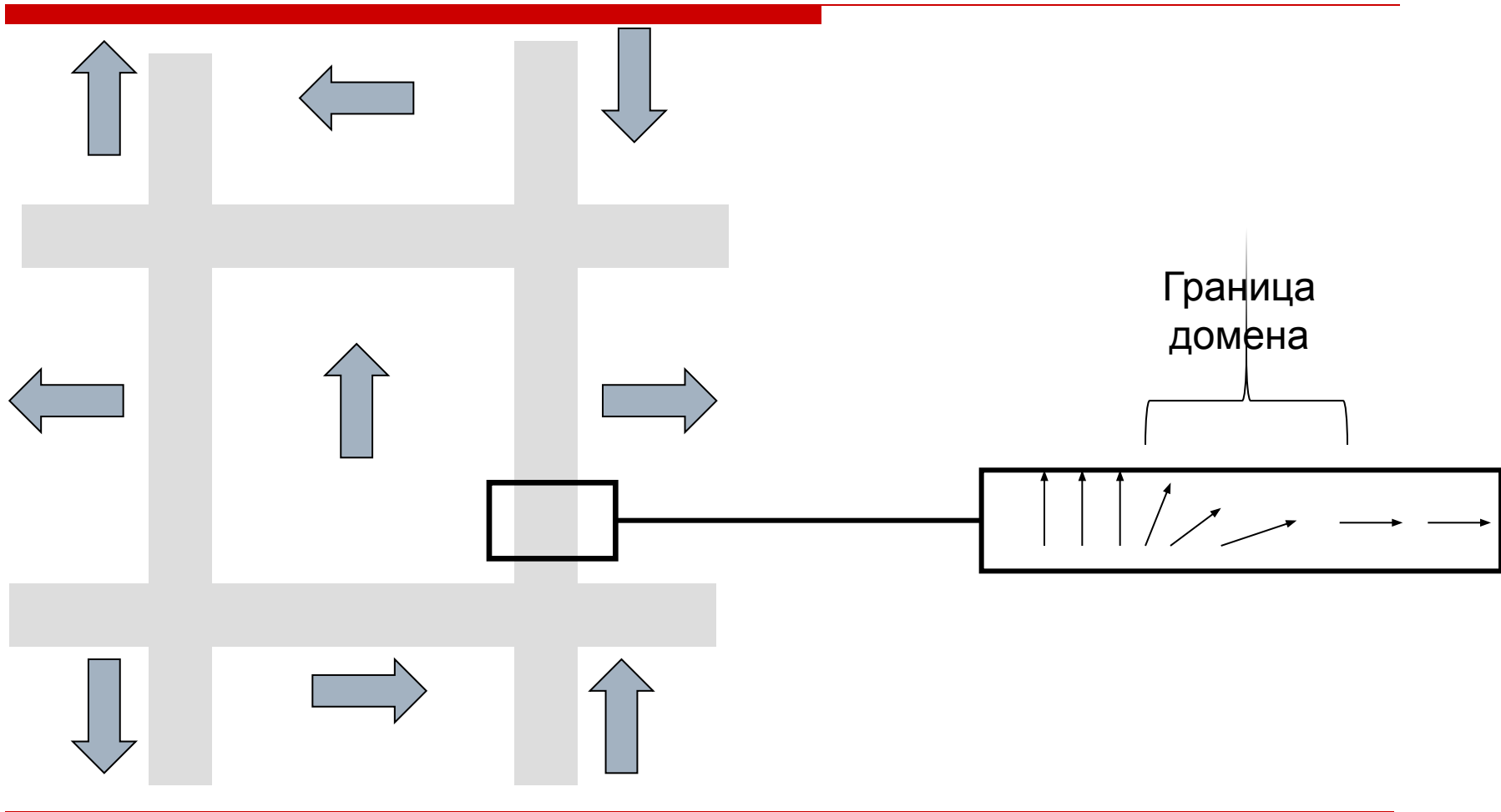
Преимущественные
направления



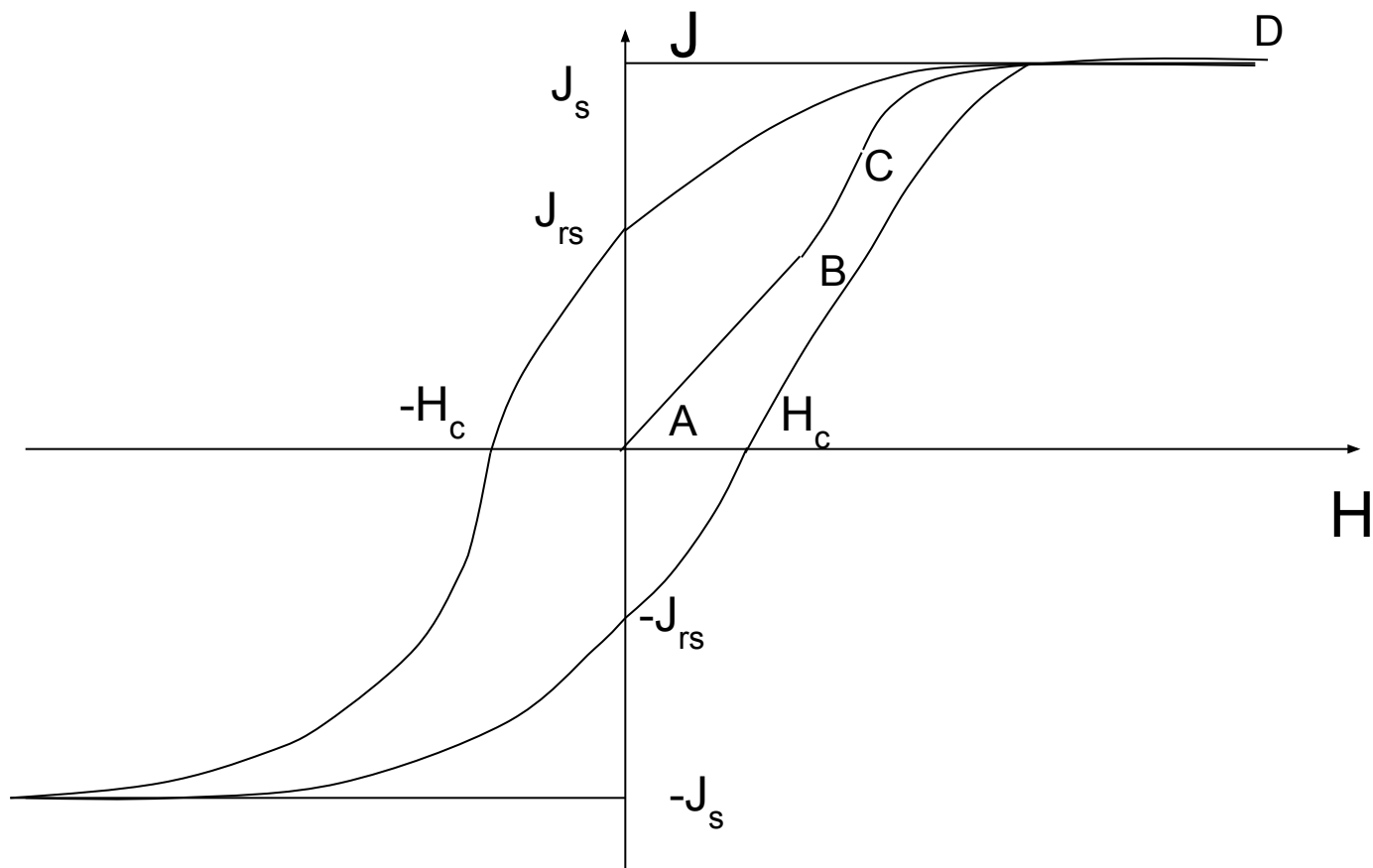
Приложено
поле

Изменение направления магнитного момента зерна требует приложения
значительного поля, однако новое направление является устойчивым

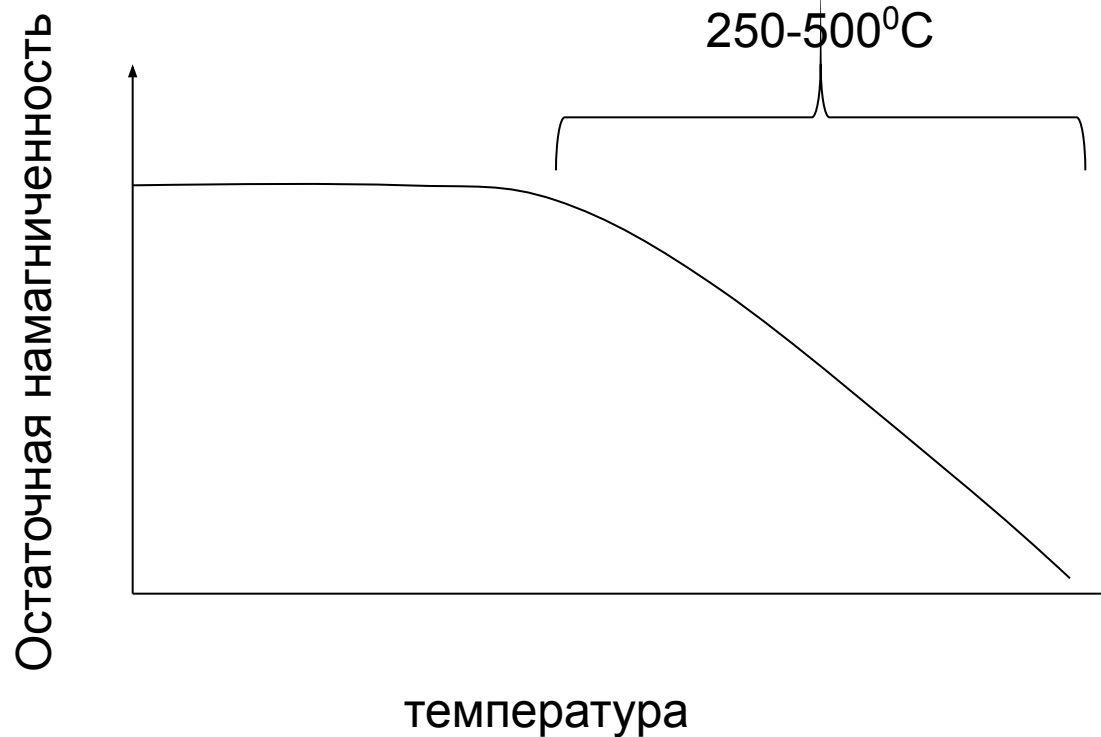
Ферромагнетики: доменная структура



Ферромагнетики: магнитный гистерезис

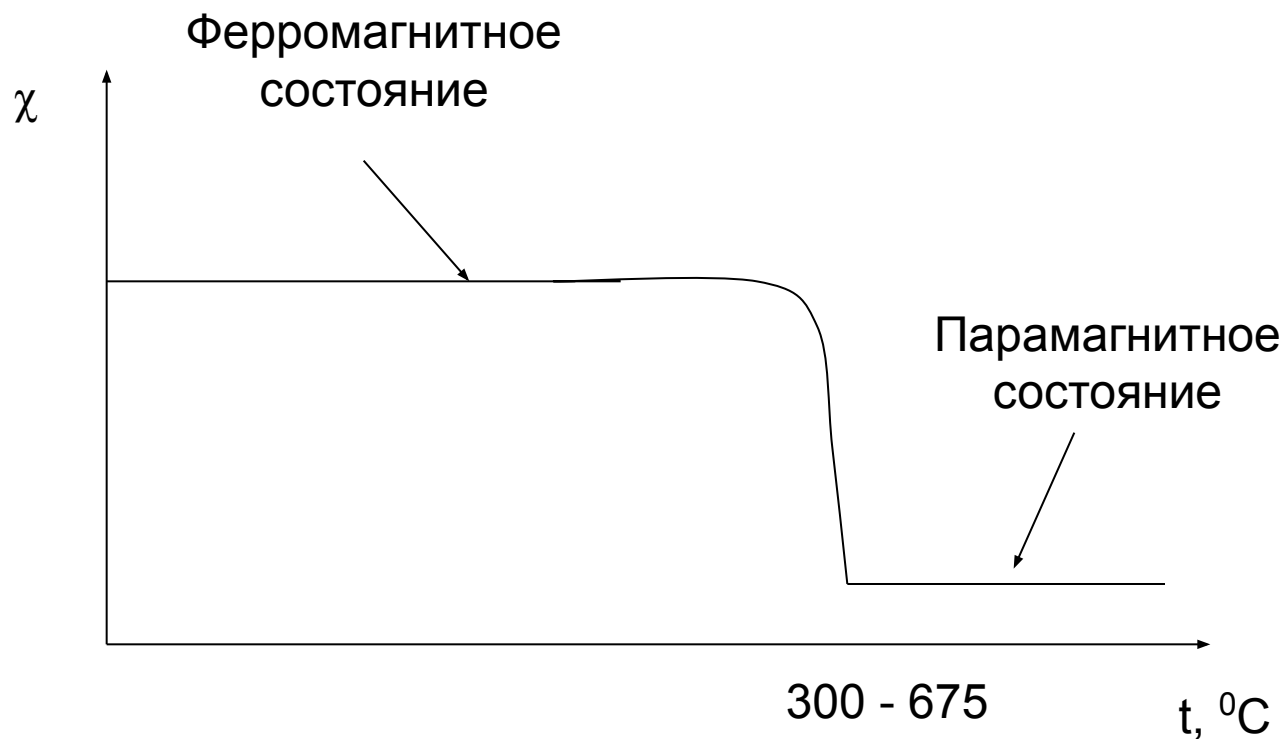


Ферромагнетики: остаточная намагниченность в зависимости от температуры



Поле=0

Исчезновение ферромагнитного эффекта с ростом температуры. Температура Кюри

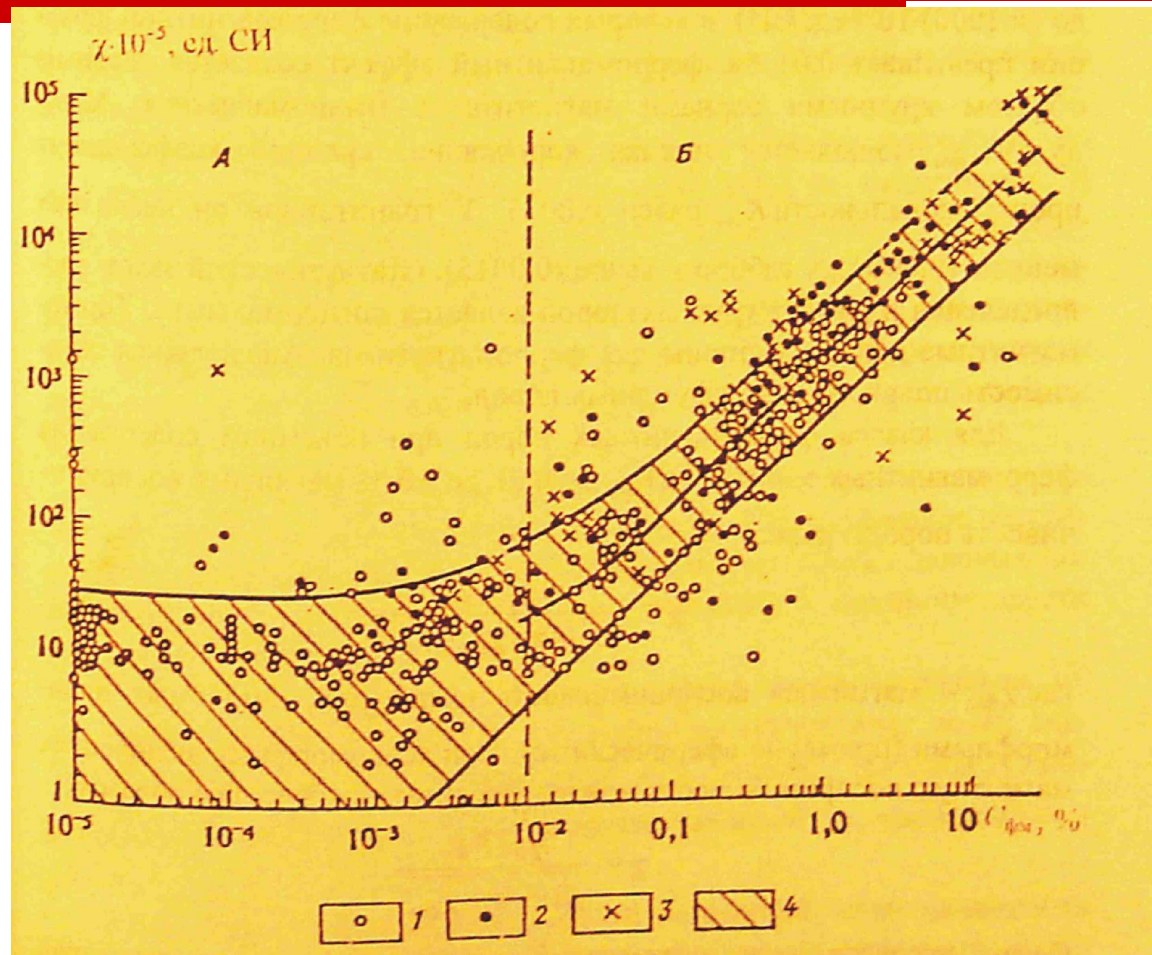


Приложено магнитное поле

Свойства ферромагнитных минералов

Минерал	Формула	χ , СИ	J_s , А/м	t_c , °С
<u>Магнетит</u>	Fe_3O_4	8.8 – 25	$4.9 \cdot 10^5$	578
<u>Титаномагнетит</u>	$x Fe_3O_4(1-x) Ti Fe_2O_4$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$(0.8-4.3) \cdot 10^5$	100-578
Треволит	$NiFe_2O_4$	6.3	$2.4 \cdot 10^5$	590
Якобсит	$MnFe_2O_4$	250	$3.2 \cdot 10^5$	510
Магнезиоферрит	$MgFe_2O_4$	10	$1.4 \cdot 10^5$	310
<u>Маггемит</u>	γFe_2O_3	3.8 – 25	$4.4 \cdot 10^5$	675
<u>Гематит</u>	αFe_2O_3	$(1.3-13) \cdot 10^{-3}$	$(1.5-2.5) \cdot 10^3$	675
<u>Пирротин</u>	FeS_{1+x}	$(0.13 - 1.3) \cdot 10^{-3}$	$(1.7 - 7) \cdot 10^4$	300-325

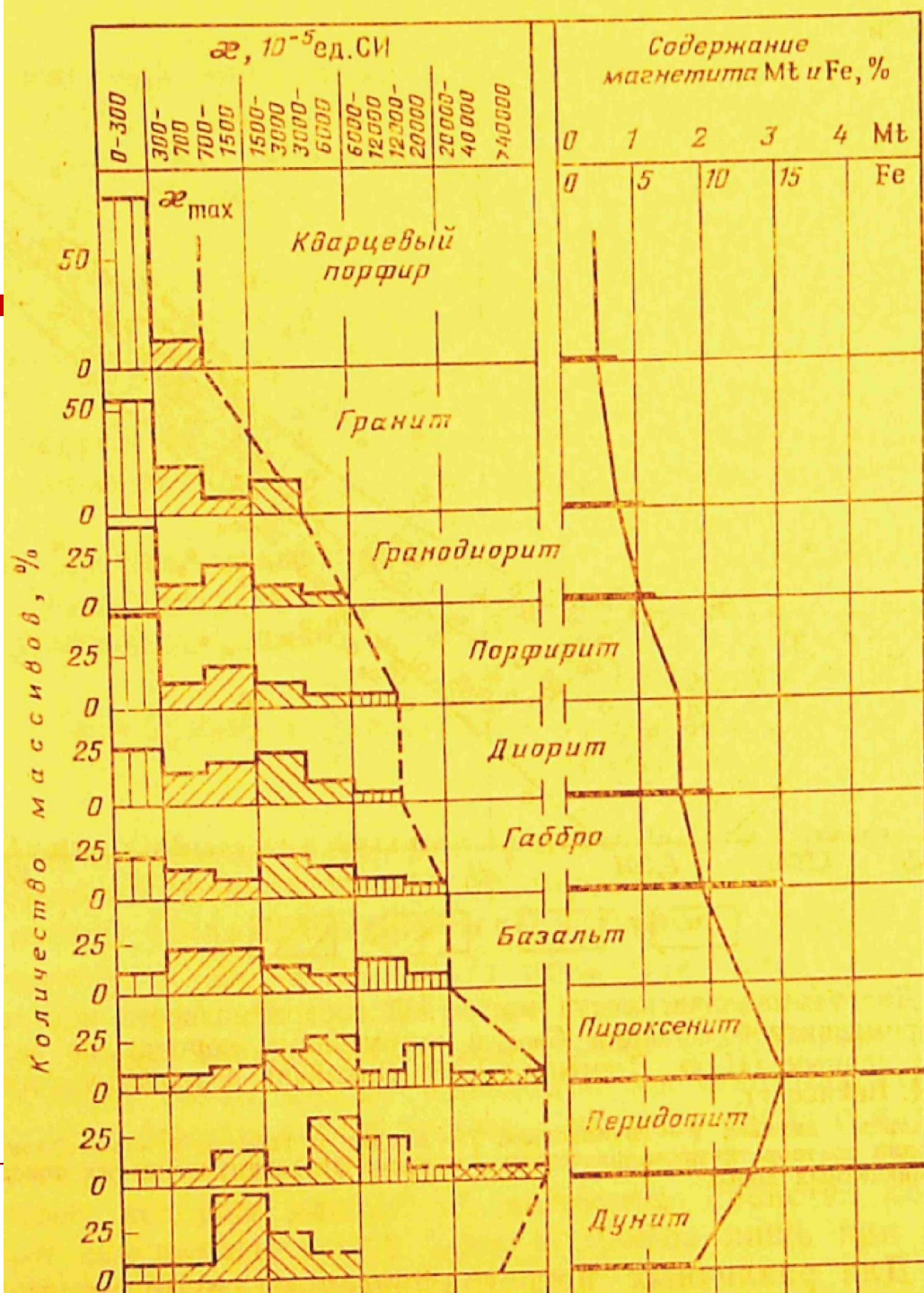
Магнитные свойства горных пород



$C_{\text{ф}}$

Зависимость магнитной восприимчивости от содержания ферромагнитных минералов

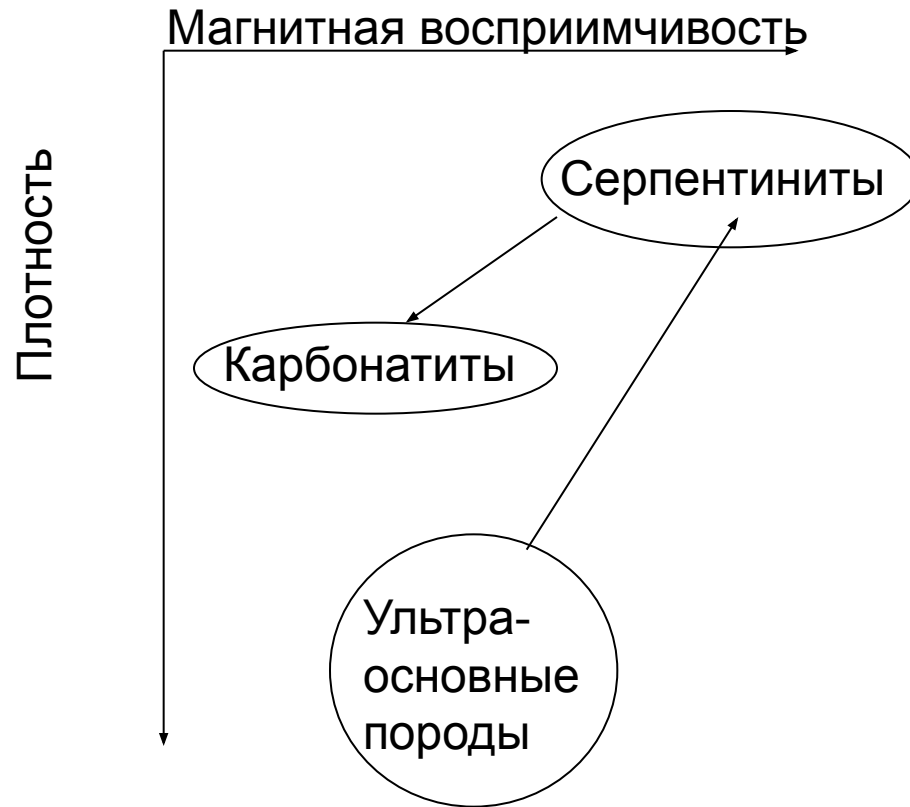
Магматические породы



Осадочные породы

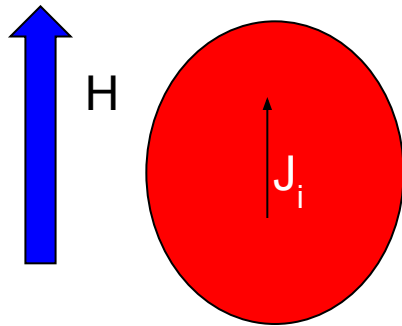
- Диапазон изменения магнитной восприимчивости составляет $(5-10) \cdot 10^{-5}$ ед.СИ, а для карбонатных пород χ обычно не превышает $4 \cdot 10^{-5}$ ед.СИ.
 - Относительно повышенные значения χ , в пределах $(30-100) \cdot 10^{-5}$ ед.СИ, свойственны терригенным породам, особенно накопившимся вблизи областей древнего размыва.
-

Метаморфические породы: первичные породы, характер изменений

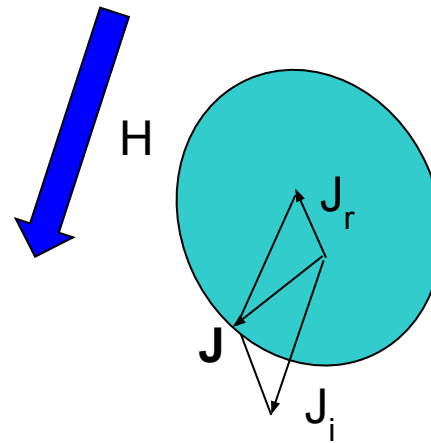


Изменение магнитной восприимчивости при аутометаморфизме

Индукцированная и остаточная намагниченность



Образование породы

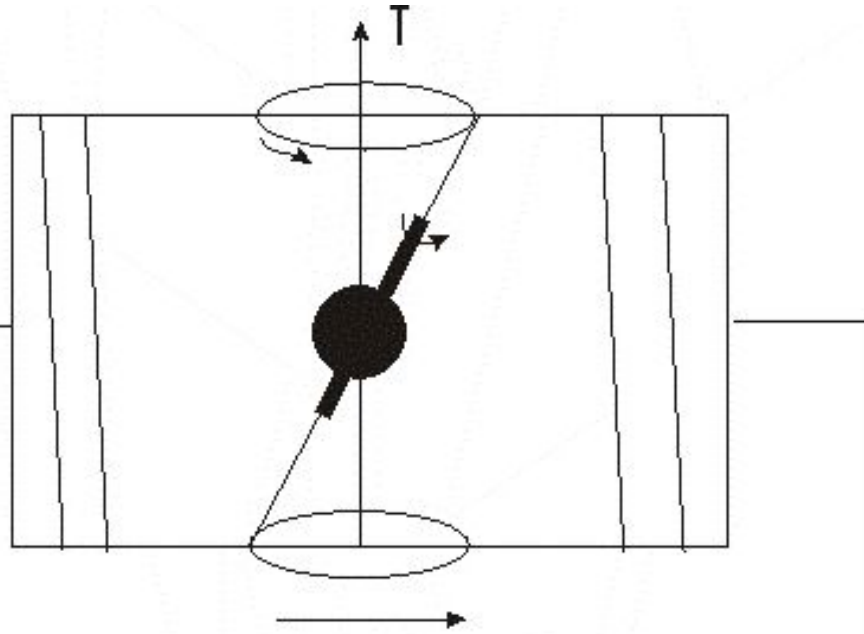


- Порода остыла
- Переместилась
- Магнитное поле изменило направление

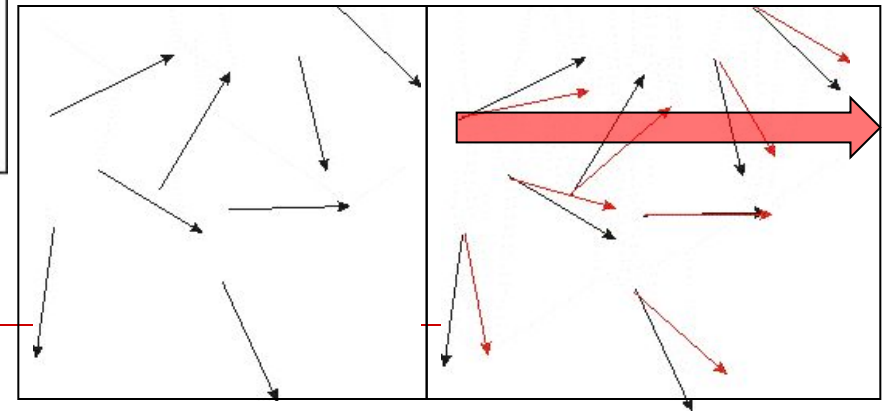
$$Q = |J_r| / |J_i|$$

Параметр Кенигсбергера – мера интенсивности остаточной намагниченности

6.6 Измерение магнитного поля: а. Принцип протонного магнитометра



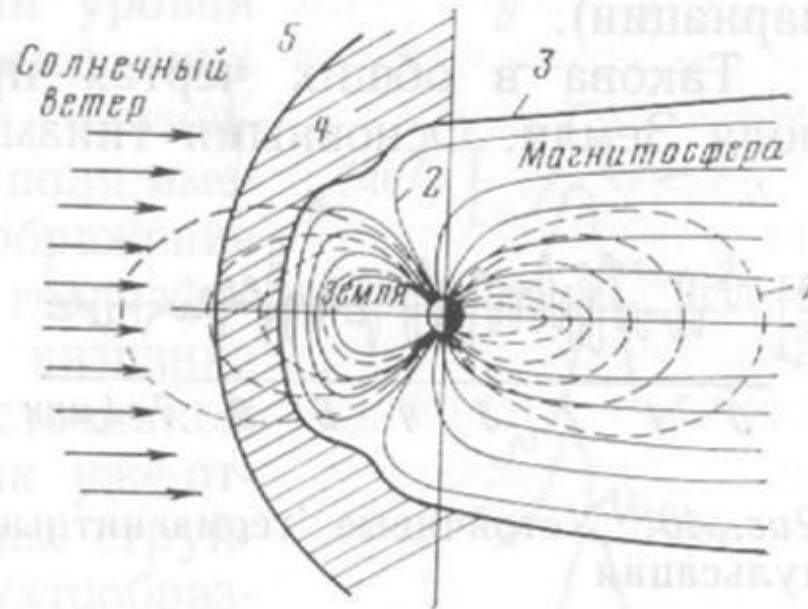
Источник тока
или
измеритель частоты
 $T \sim f$



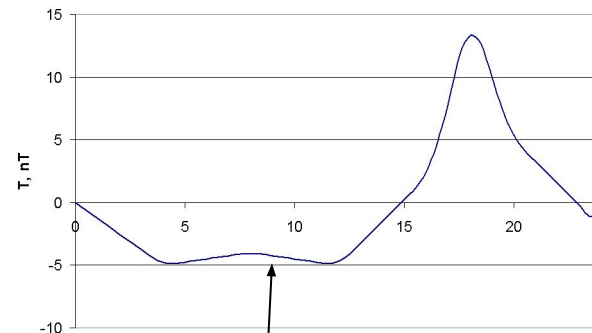
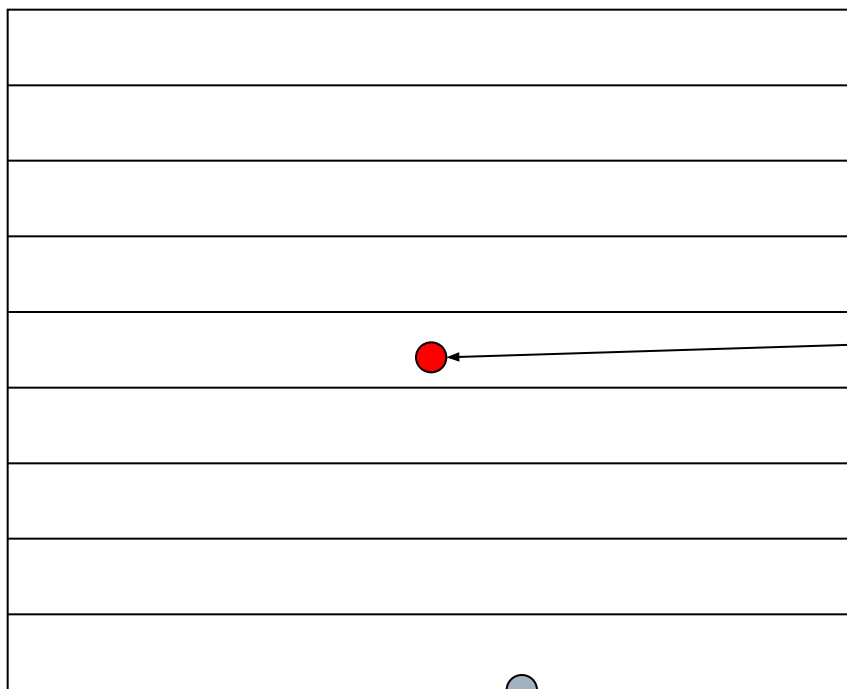
Напоминание о вариациях

Рис. 39. Магнитосфера Земли:

1 — силовые линии магнитного поля диполя;
2 — силовые линии геомагнитного поля; 3 —
граница магнитосферы; 4 — переходная зо-
на; 5 — область, занятая солнечным ветром



6. Учет вариаций



Temps, heures

δT

Вариационная станция

Полевой магнитометр

T

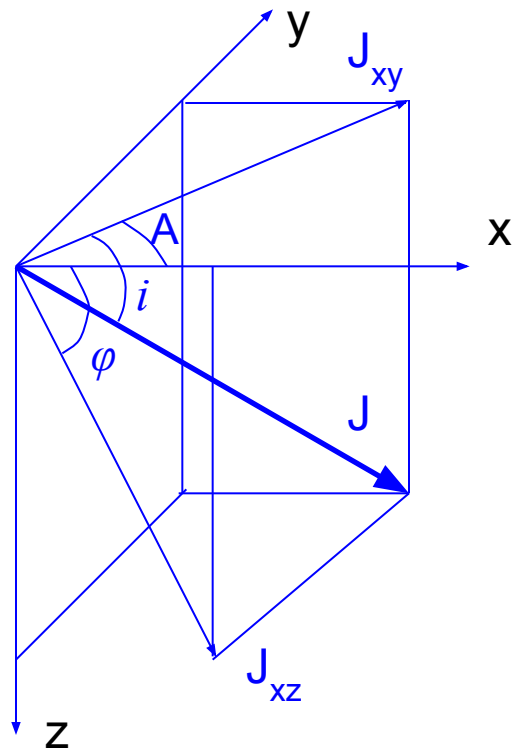
$$\Delta T = T - \delta T - T_0$$

Поправка, учитывающая вариации.

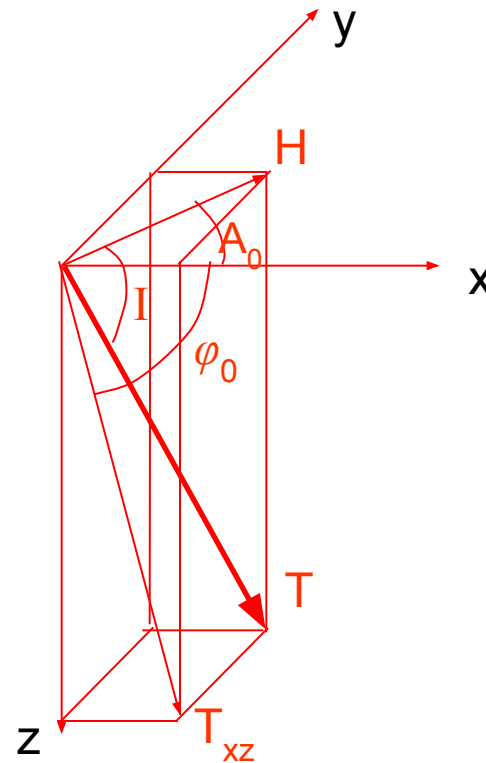
6.7 Магнитное поле тел простой формы

- Шар – Горизонтальный цилиндр – Пласт малой мощности безграничный и ограниченный на глубину – уступ
 - Тела произвольной формы - подбор
-

Обозначения



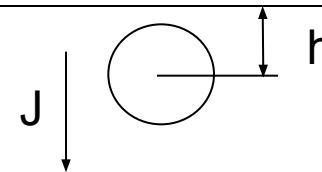
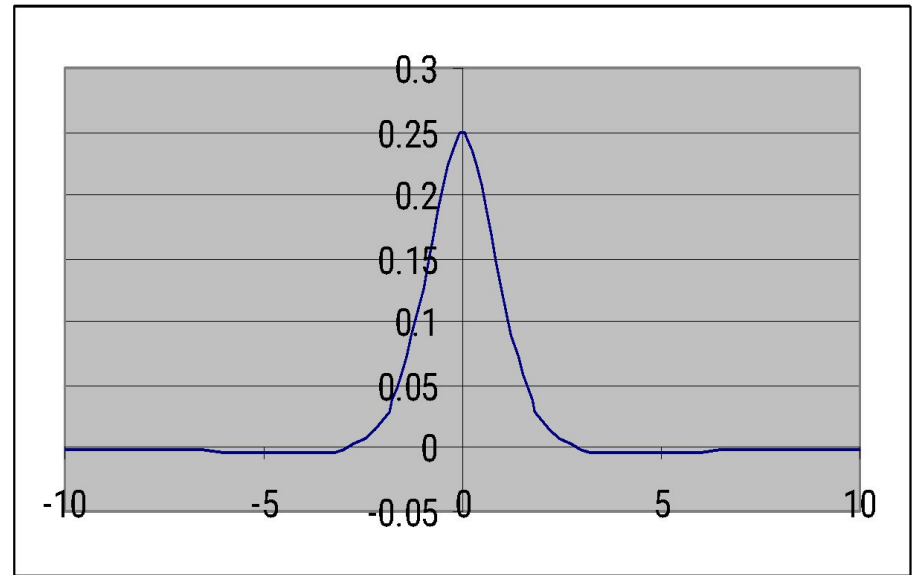
$$\operatorname{ctg}\varphi = \operatorname{ctg}i \cos A$$



$$\operatorname{ctg}\varphi_0 = \operatorname{ctg}I \cos A_0$$

Шар – магнитный диполь (частный случай вертикальной намагниченности)

$$\Delta T = \frac{\mu_0 M}{4\pi} \frac{2h^2 - x^2 - y^2}{(x^2 + y^2 + h^2)^{5/2}}$$



Пласт малой мощности (ПММ) безграничный по падению

$$\Delta T = \frac{\mu_0 J b}{\pi} \frac{h_1 \cos \varepsilon - x \sin \varepsilon}{h_1^2 + x^2} \sin \alpha \frac{\sin I}{\sin \varphi_0}$$

$$\varepsilon = 90 + \alpha - \varphi - \varphi_0$$

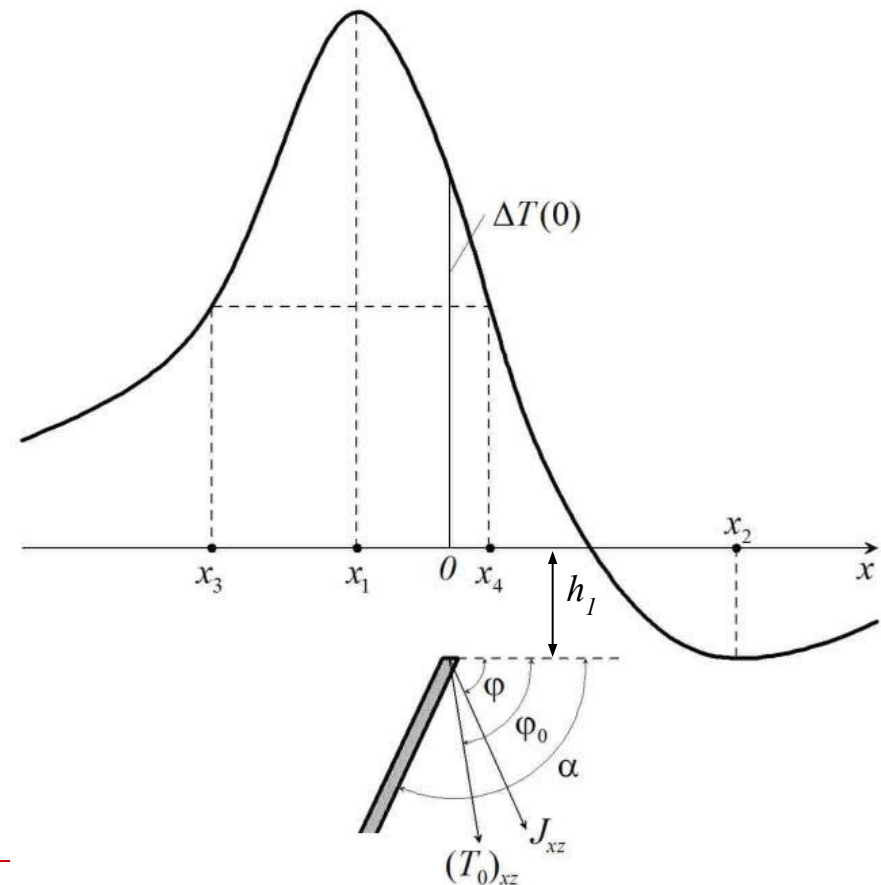
$$\Delta T(0) = \Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}$$

$$\cos \varepsilon = \frac{\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}}{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}$$

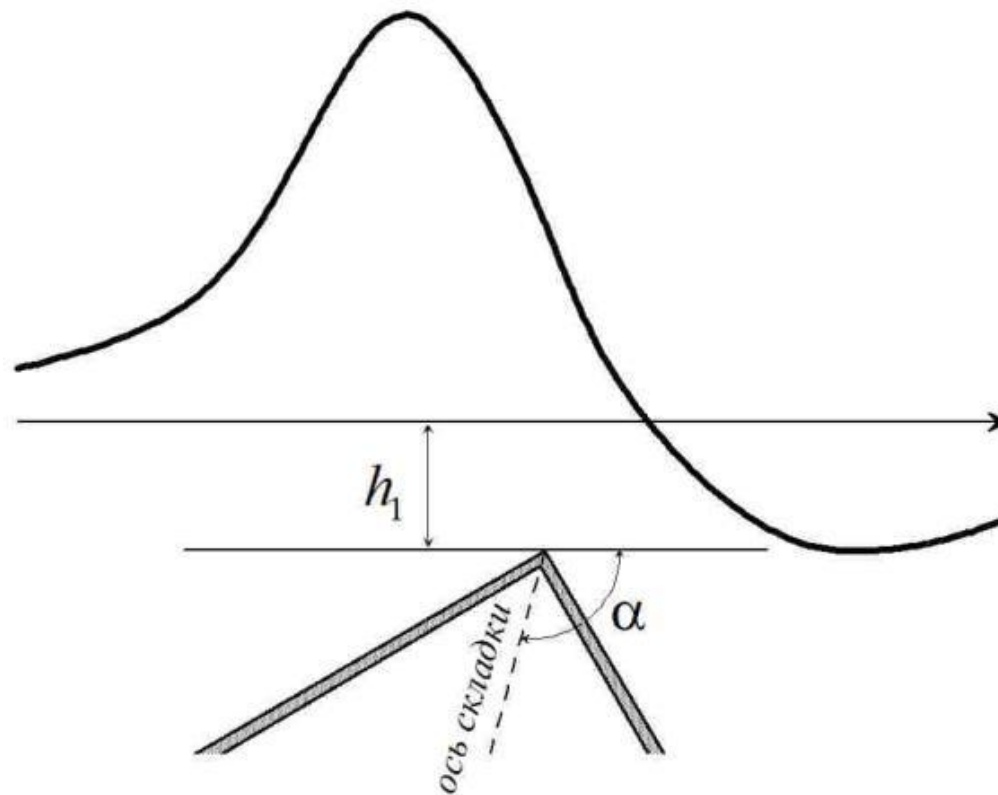
$$\operatorname{ctg} \varphi_0 = \operatorname{ctg} \alpha \cos A_0$$

$$h_1 = \frac{|x_1 - x_2|}{2} \sin \varepsilon = \frac{|x_3 - x_4|}{2} \cos \varepsilon$$

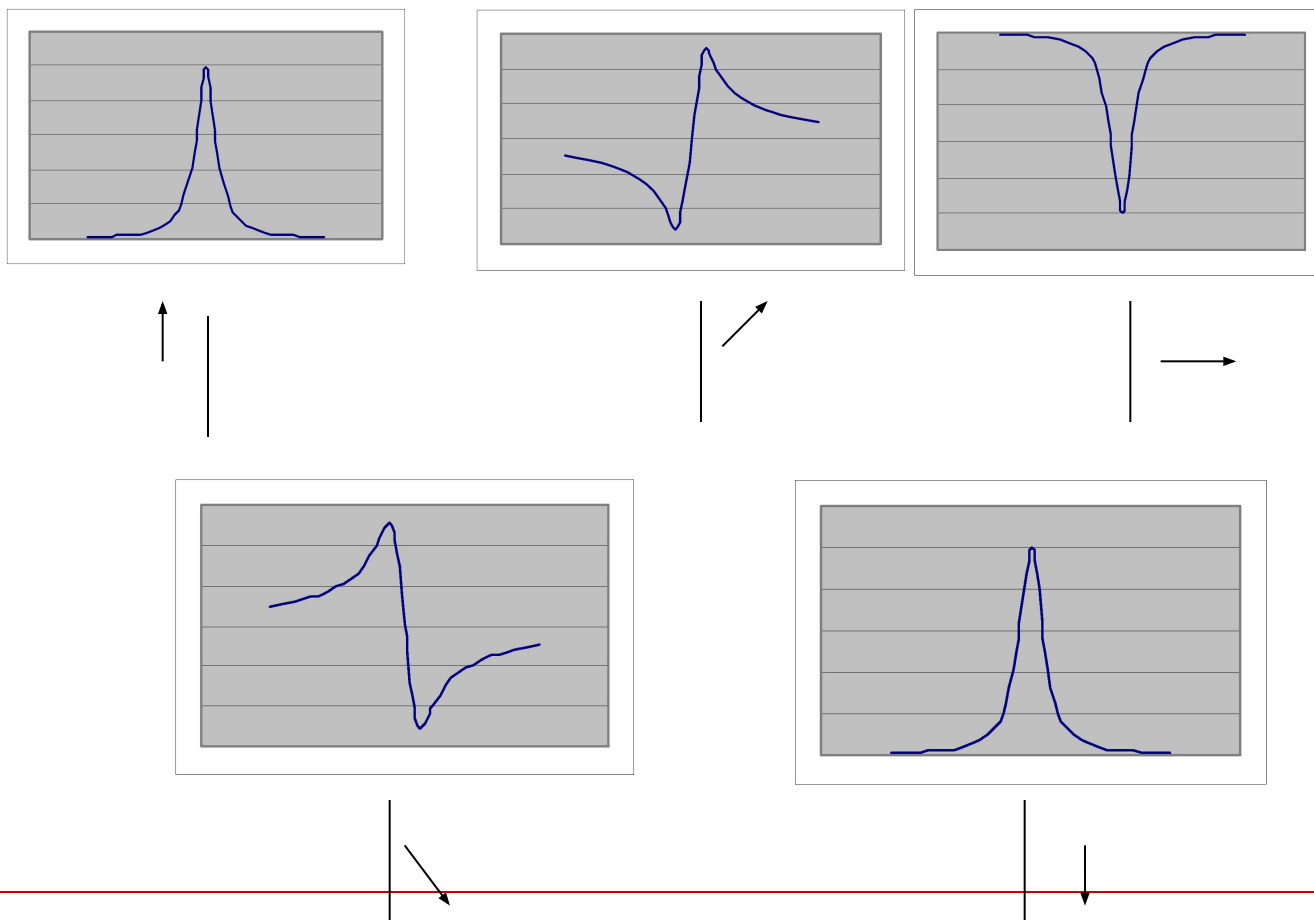
$$J \cdot 2b = \frac{2\pi}{\mu_0} \Delta T(0) h \sec \alpha \cos \varepsilon \frac{\sin \varphi_0}{\sin I}$$



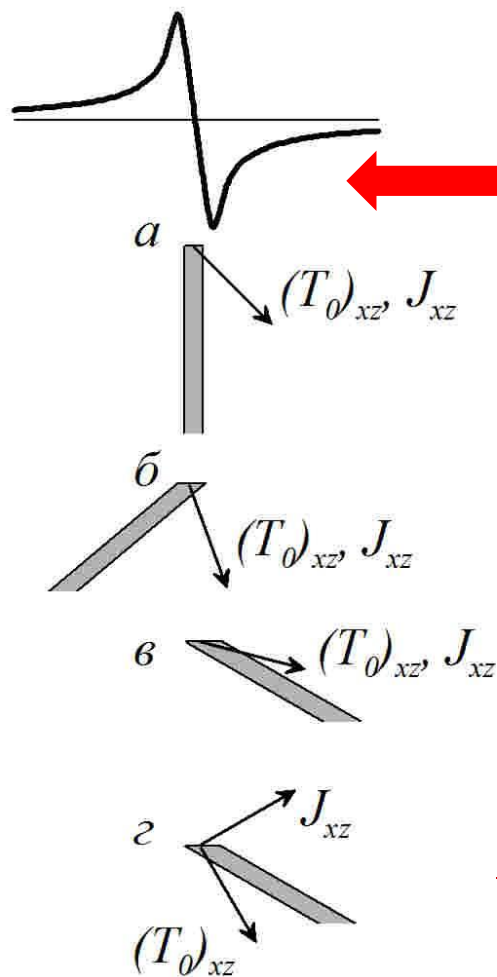
Эквивалентные модели: ПММ и антиклинальная складка



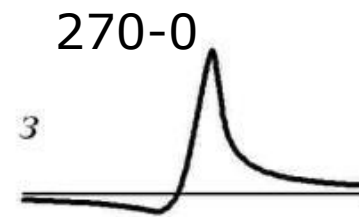
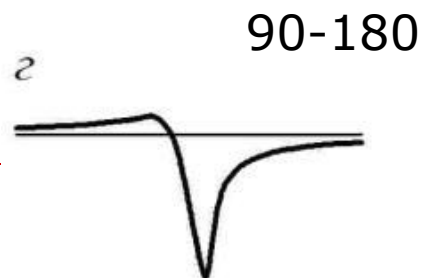
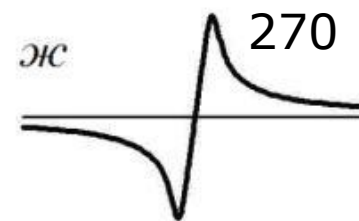
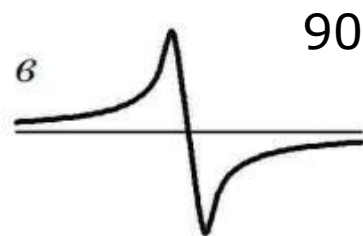
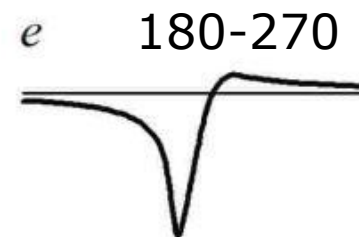
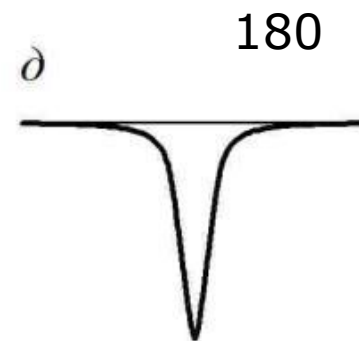
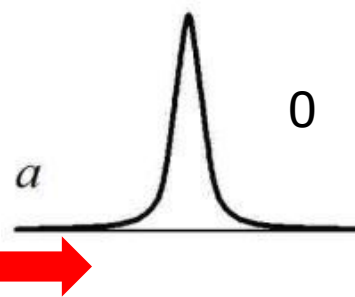
Зависимость поля вертикального ПММ от широты: то, чего не было в гравитационном поле



Зависимость поля ПММ от разностного угла ε



$\varepsilon=90$: все модели эквивалентны по полю

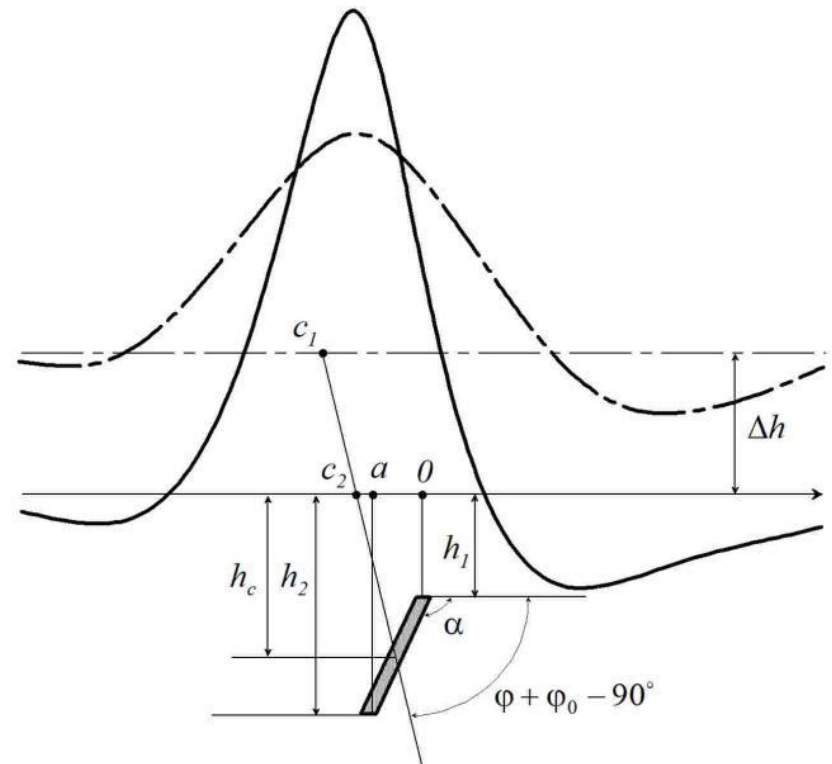


Пласт малой мощности, ограниченный по падению: суперпозиция пласта и "антипласта"

$$\Delta T = \frac{\mu_0 J b}{\pi} \left(\frac{h_1 \cos \varepsilon - x \sin \varepsilon}{h_1^2 + x^2} - \frac{h_2 \cos \varepsilon - (x - a) \sin \varepsilon}{h_2^2 + (x - a)^2} \right) \sin \alpha \frac{\sin I}{\sin \varphi_0}$$

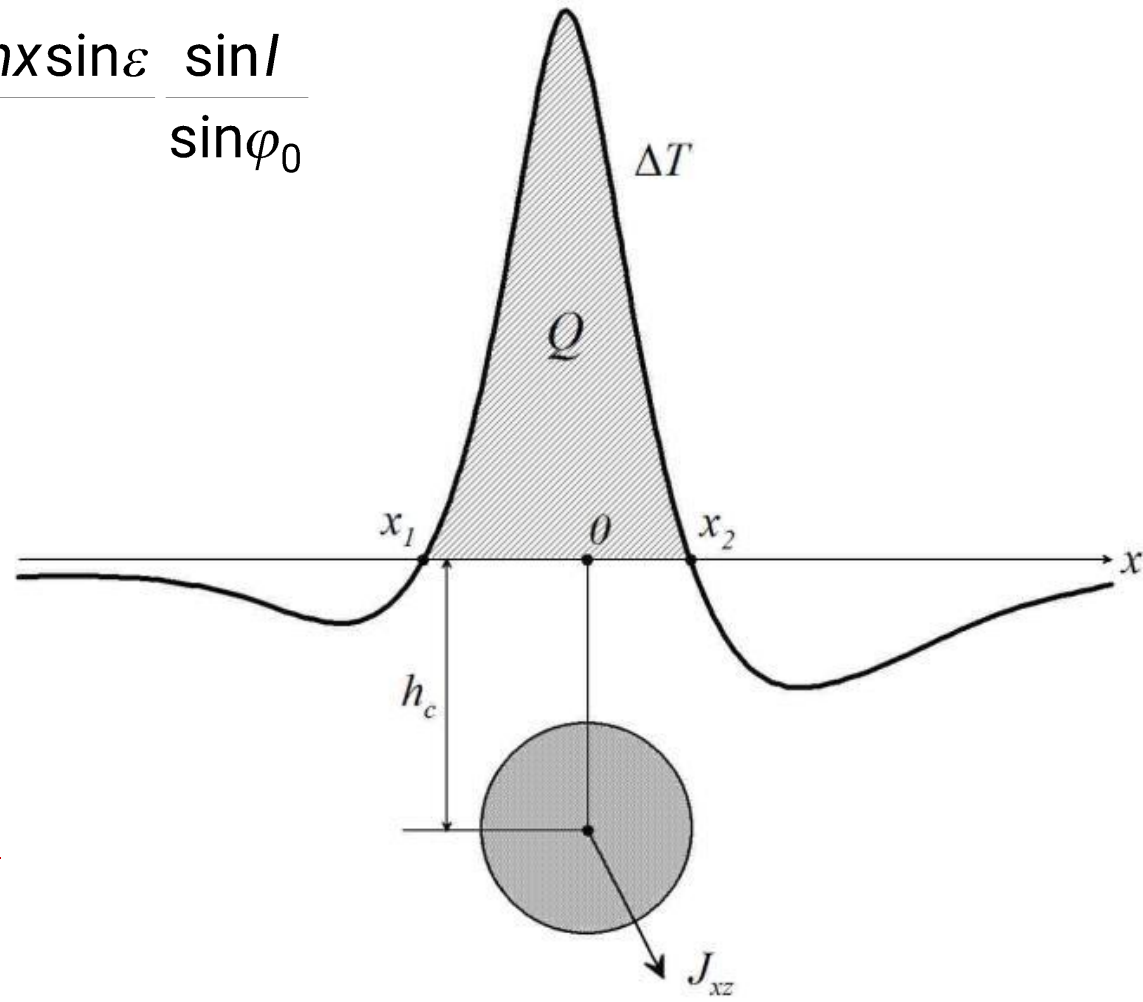
ПММ1 (x, h1, J)

ПММ2 ((x-a), h2, -J)

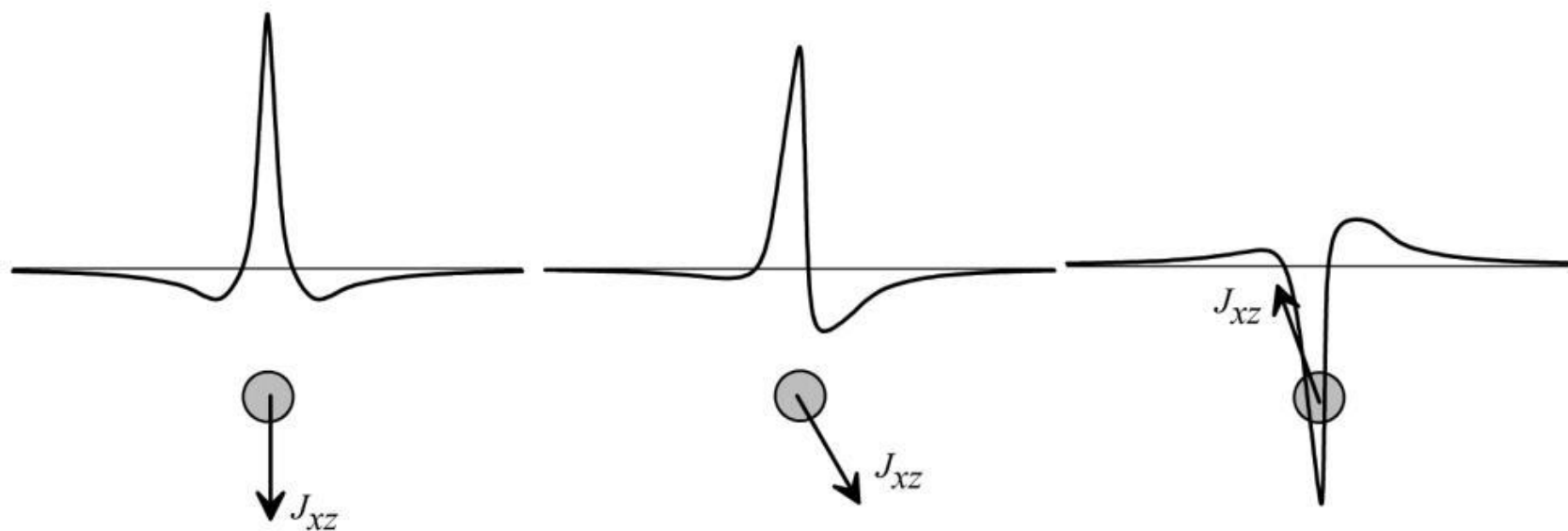


Горизонтальный цилиндр: яркий пример объекта, ограниченного на глубину: три экстремума

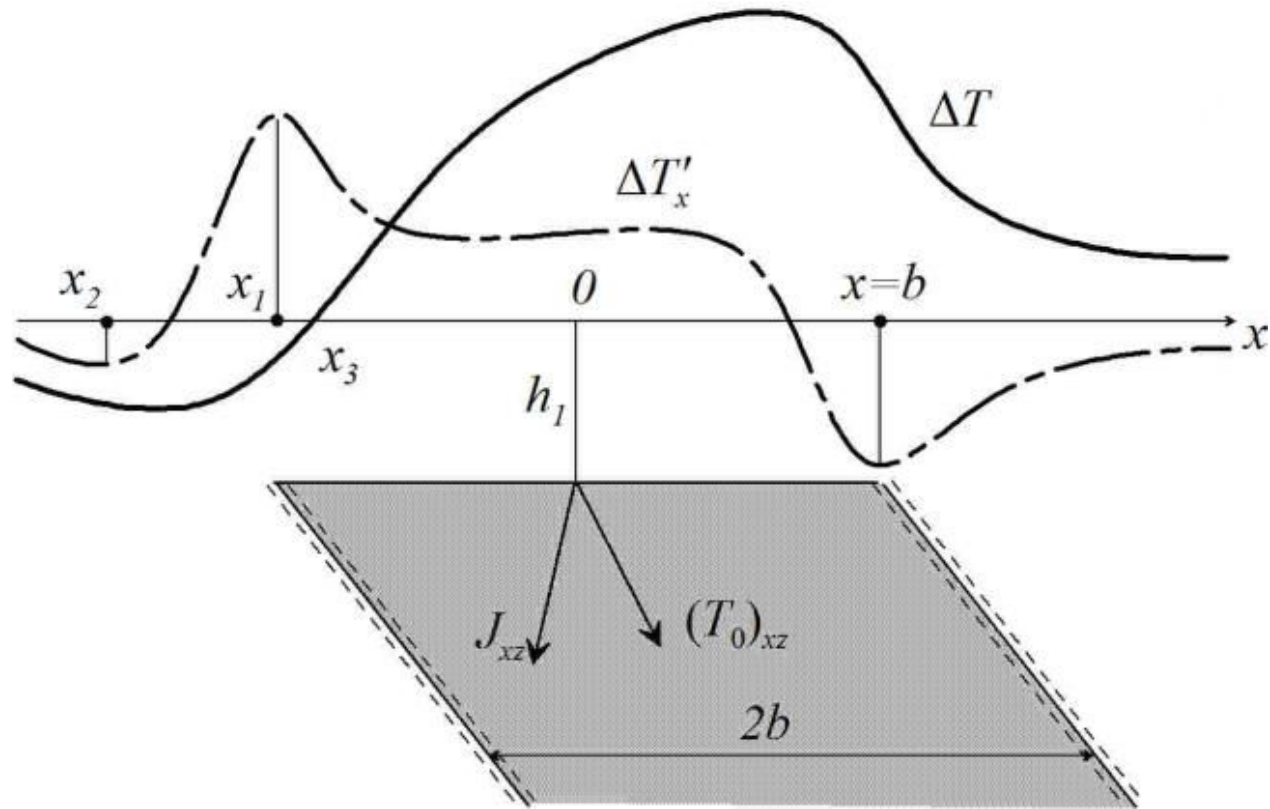
$$\Delta T = \frac{\mu_0 M}{2\pi} \frac{(h^2 - x^2) \cos \varepsilon - 2hx \sin \varepsilon}{(h^2 + x^2)^2} \frac{\sin I}{\sin \varphi_0}$$



Зависимости поля цилиндра от направления намагничивания

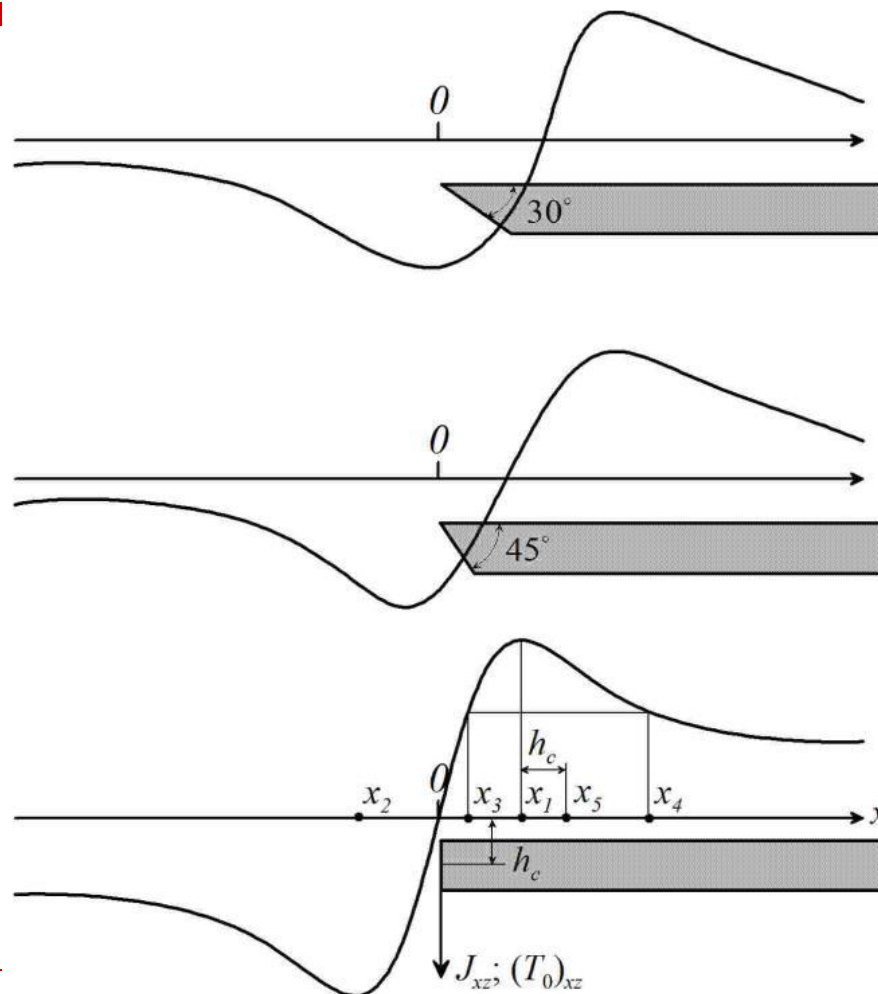


Пласт большой мощности: интеграл от ПММ в конечных пределах



Уступ: интеграл от ПММ с одним бесконечным пределом

В чем отличие гравитационного и магнитного поля уступа?

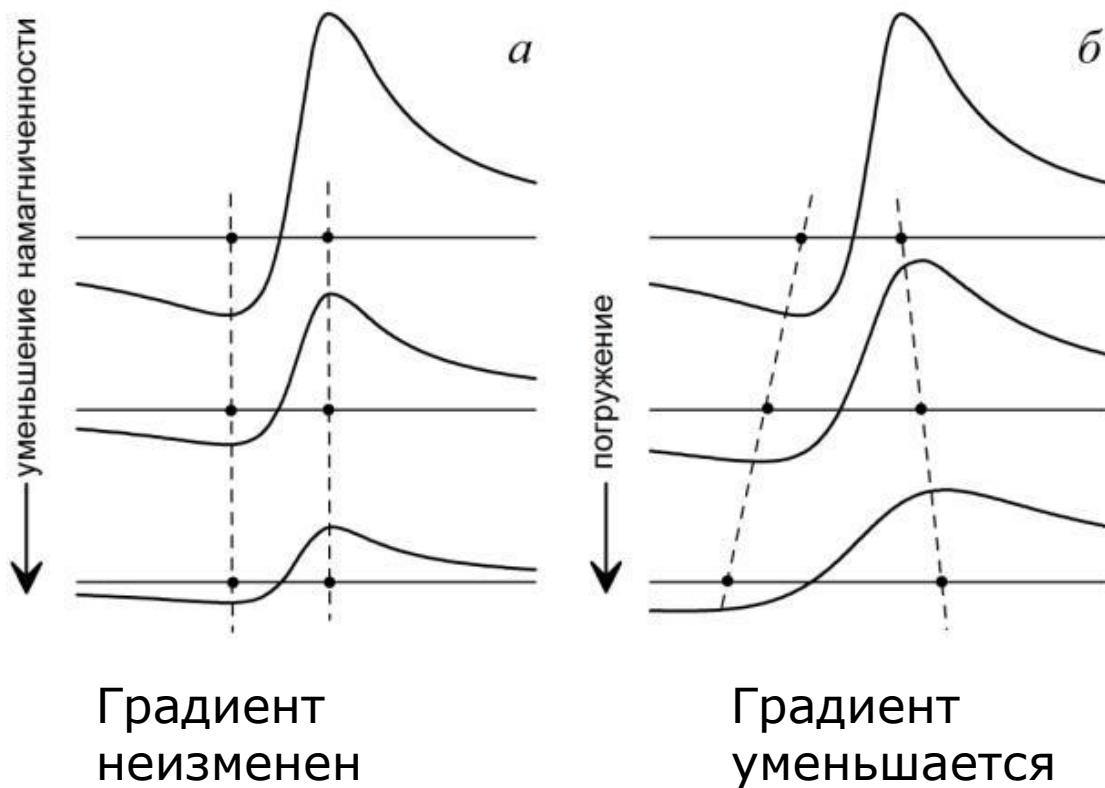


Выводы

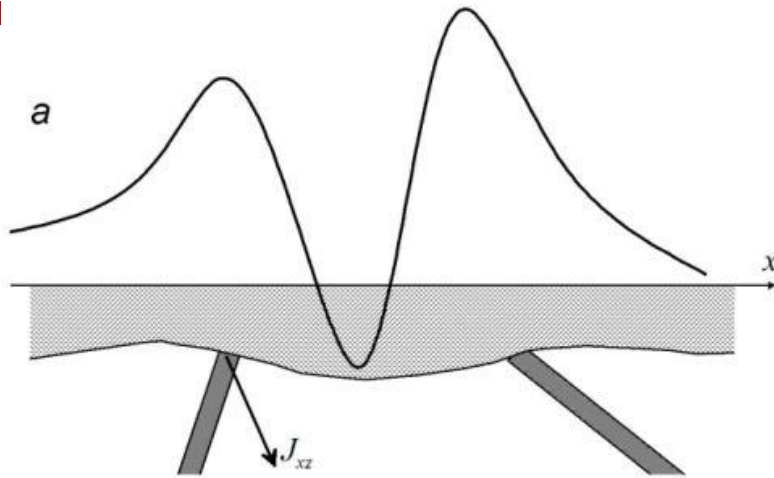
- Ширина аномалии (т.е. горизонтальный градиент) связана с глубиной залегания объекта
- Ограничение объекта в направлении падения приводит к появлению дополнительного экстремума
- ПММ – объект в котором $h_1 \gg 2b$, поэтому по магнитному полю невозможно определить его мощность

В чем отличие гравитационного и магнитного поля уступа?

6.8 Качественная интерпретация магнитных аномалий

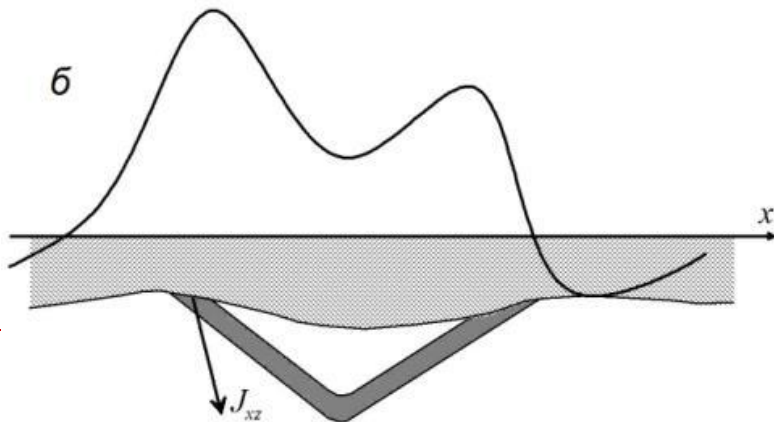


Аномалии над складками

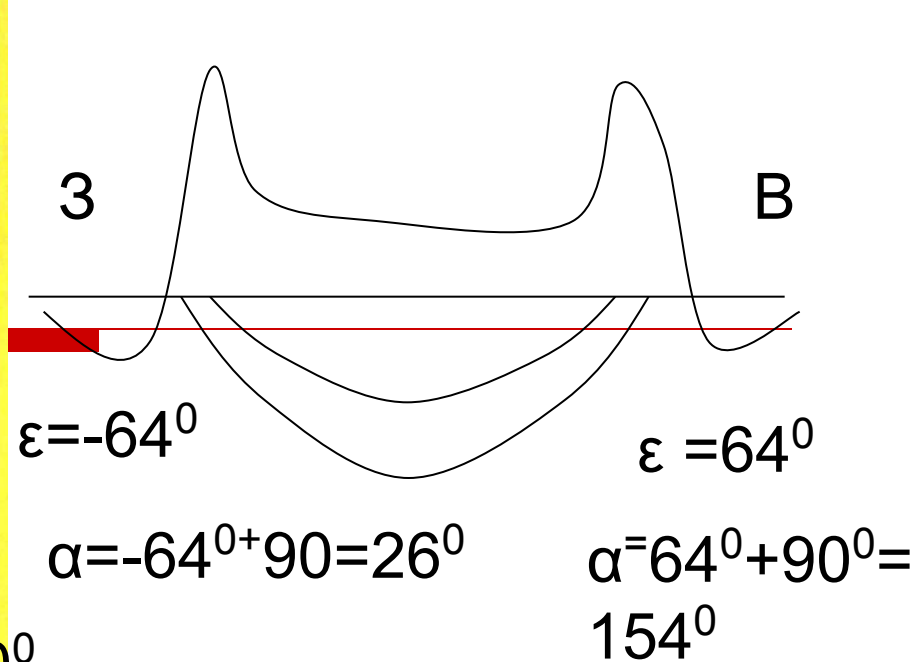
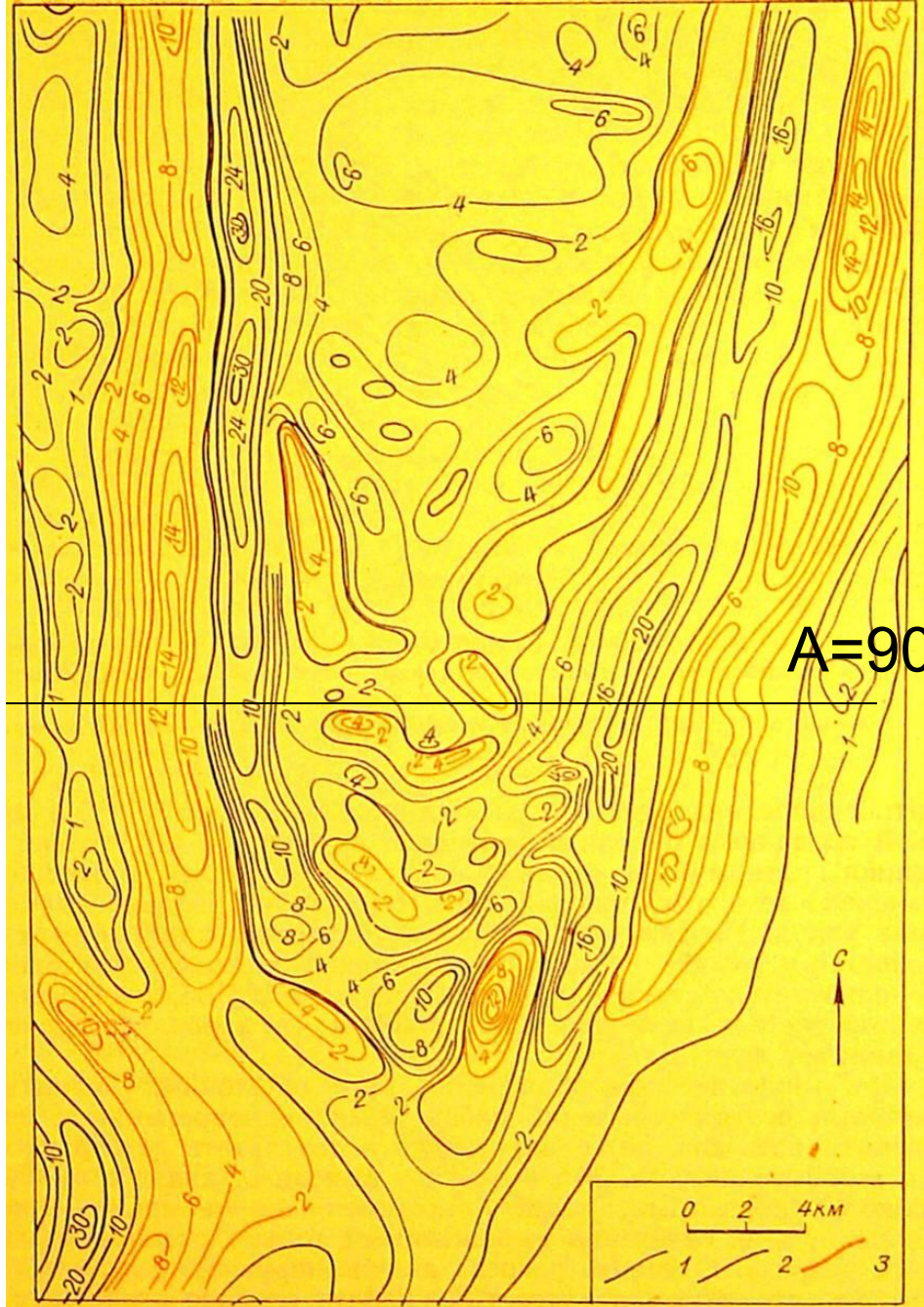


Отрицательные значения
над ядром антиклинали

И



положительные в центре
синклинали



$A = 90^\circ$

$$T_{\text{макс}} = 20 \text{ нТ}, T_{\text{мин}} = -8 \text{ нТ}$$

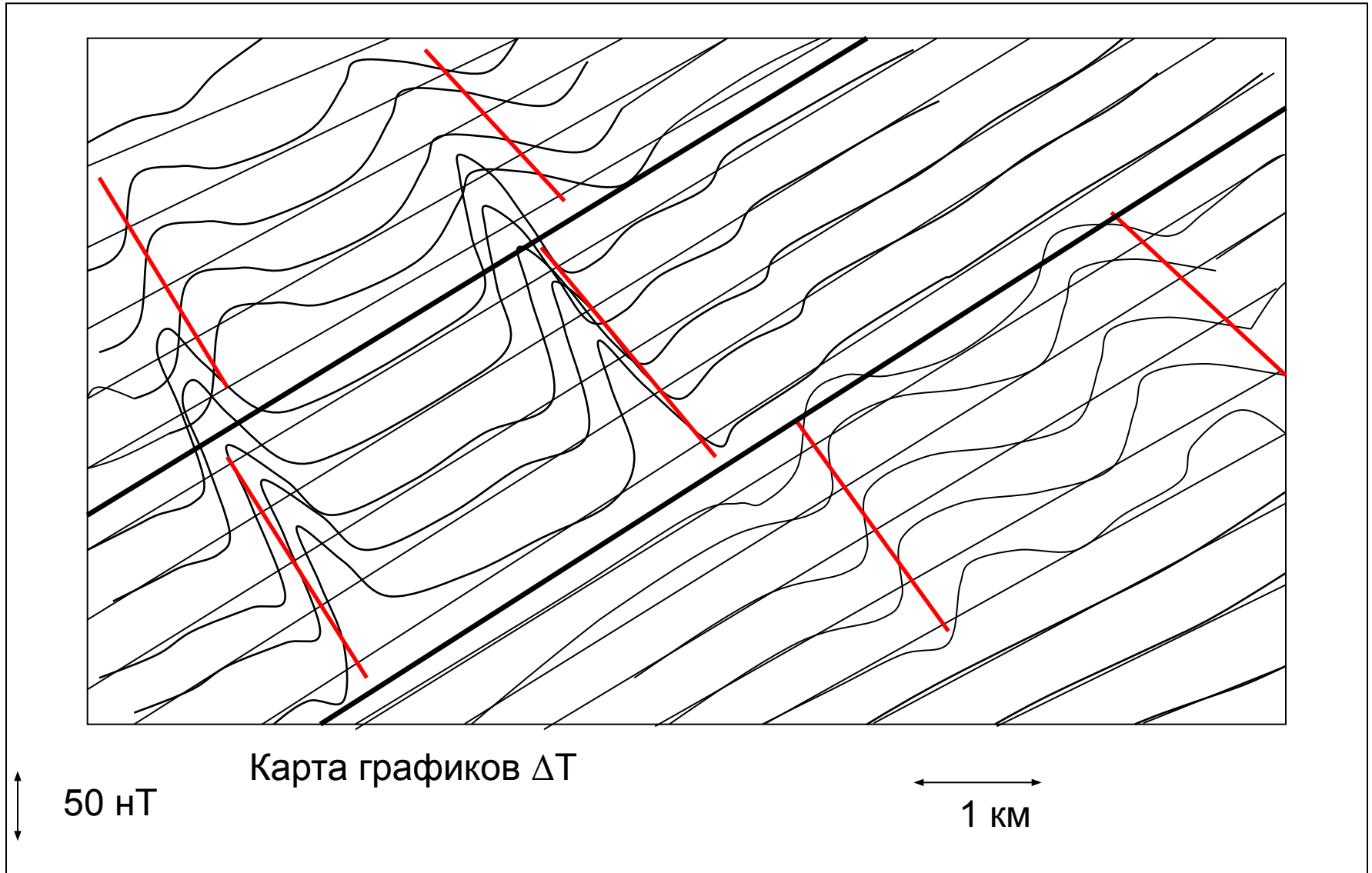
$$\cos \varepsilon = 12/28 = 0.43$$

Косью-Роговская мегасинклиналь (Гряда Чернышева-Полярный Урал)

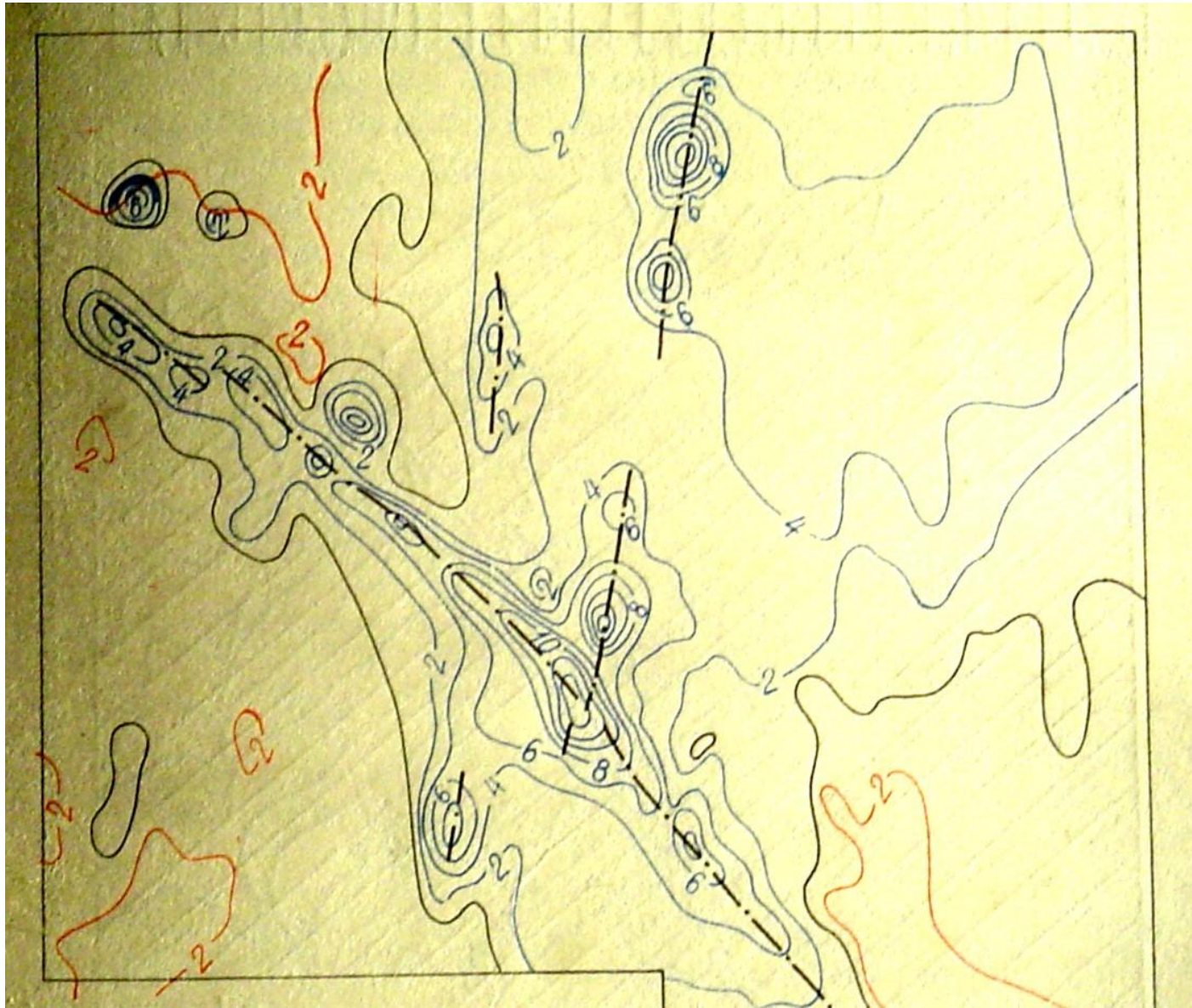
Признаки разрывных нарушений

- Смещение осей корреляции
 - Изменение горизонтального градиента
 - Цепочки локальных аномалий
 - Изменение картины поля
-

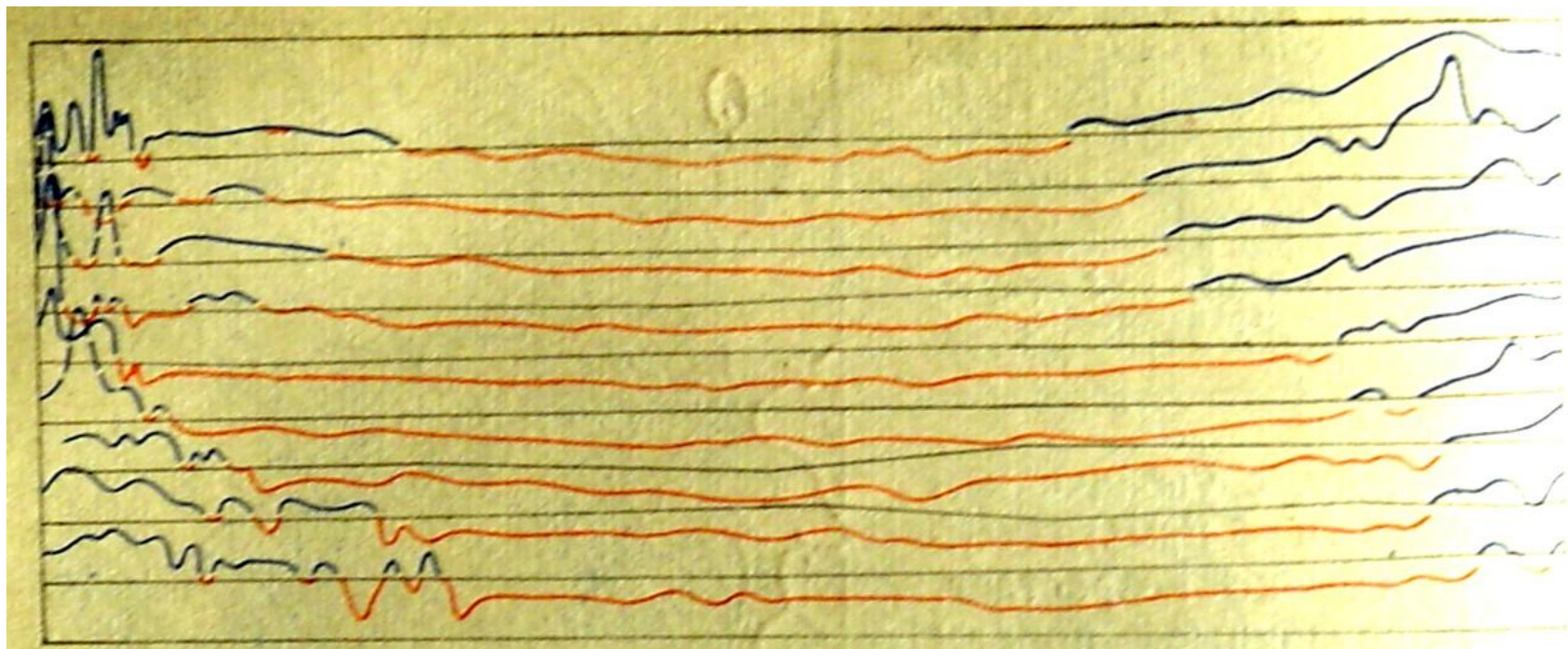
Выделение разрывных нарушений: смещение осей корреляции и изменение горизонтального градиента



Картирование разрывного нарушения залеченного дайками диабазов и габбро-амфиболитов

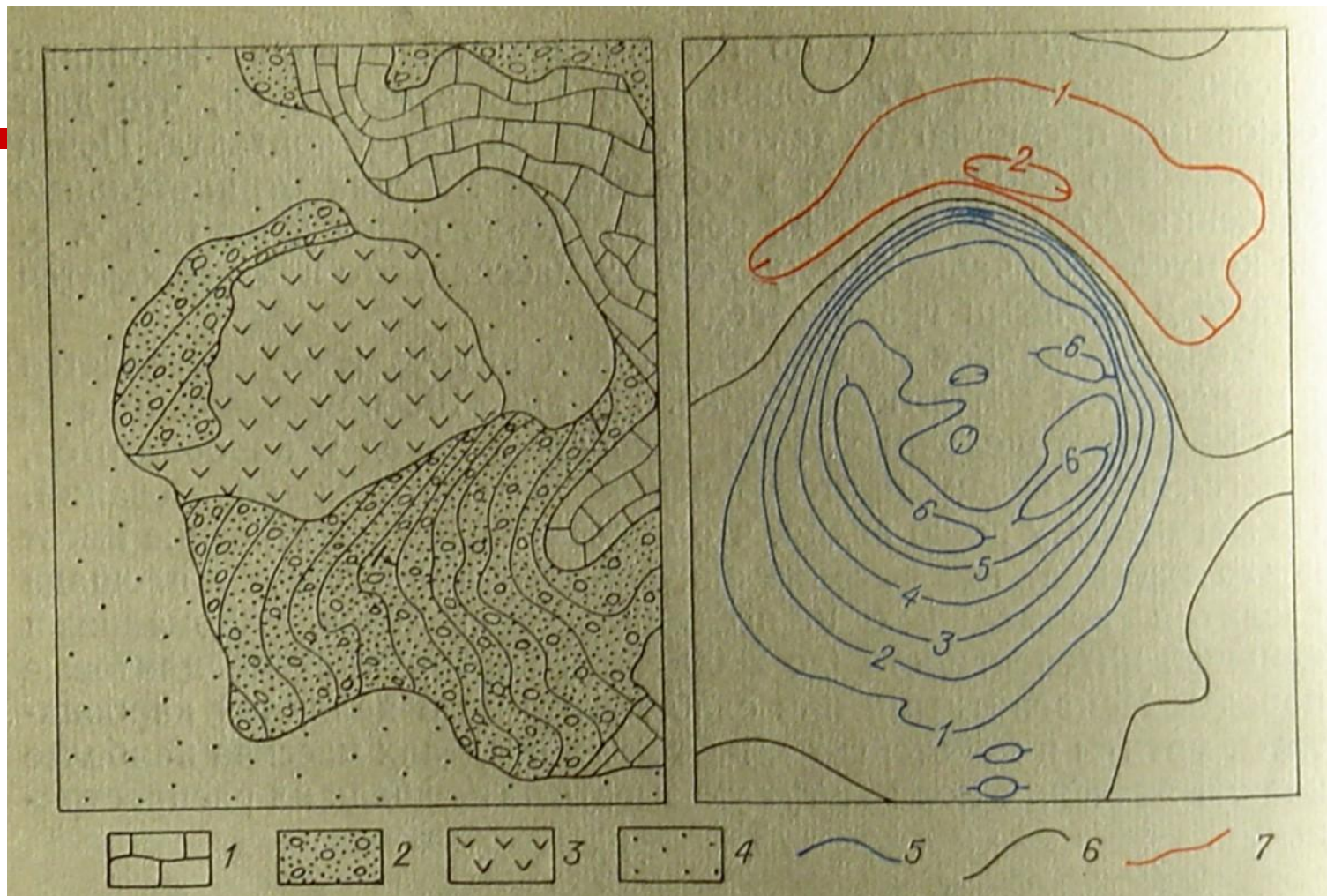


Картирование интрузивных тел



Картирование интрузии гранитов по спокойному пониженному полю (Восточное Приладожье)

Магнитное поле над интрузией граносиенитов (Казахстан)

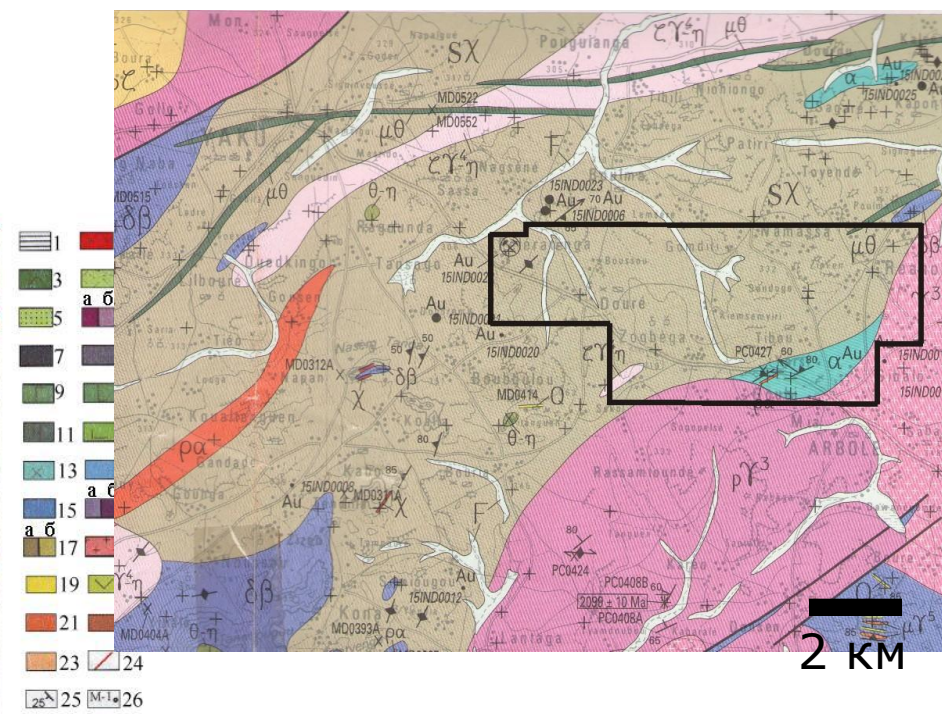
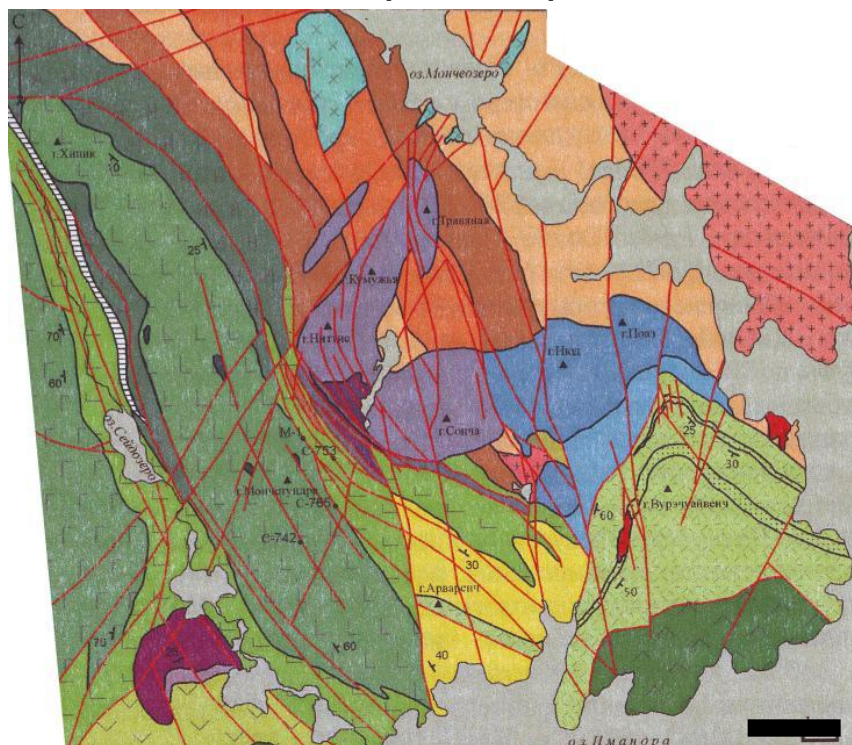


известняки песчаники граносиениты Рыхлые
образования

Как магнитная съемка помогает геологическому картированию: африканский пример

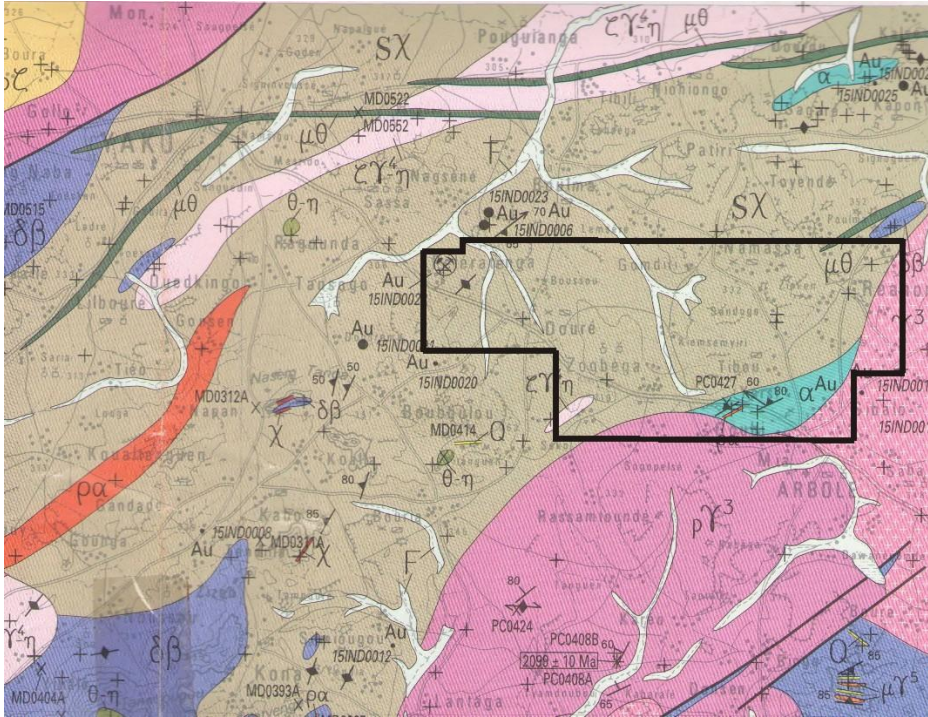
Участок в Буркина-Фасо

Мончегорский район

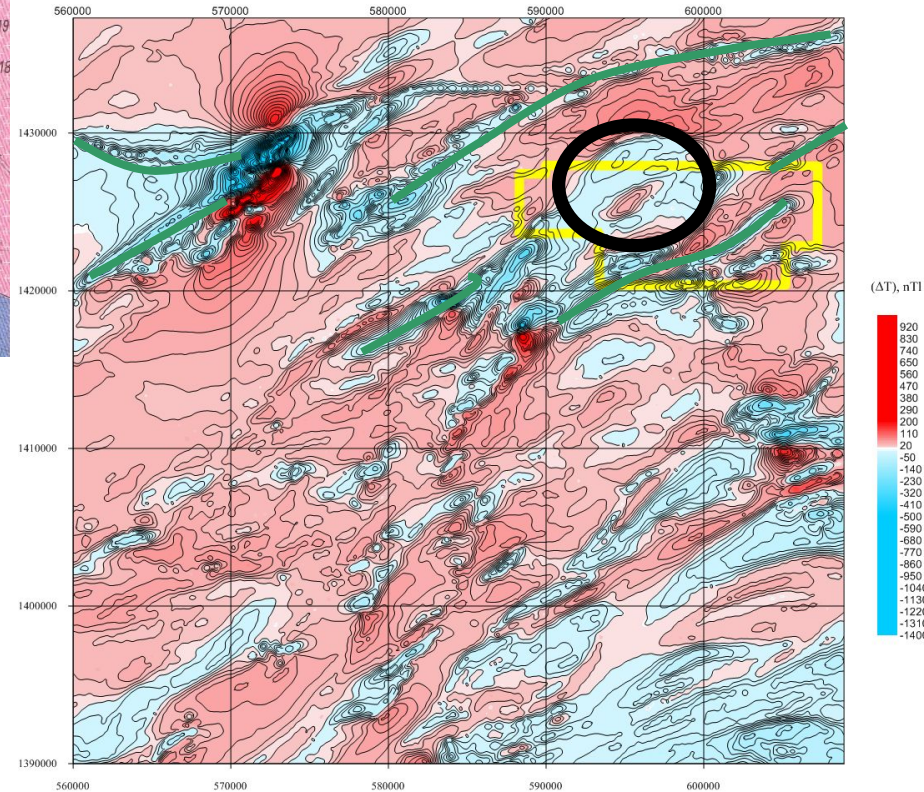


Сравните степень детальности этих двух геологических карт одного масштаба (на обеих картах – древние докембрийские породы возрастом более 1.5 млрд. лет)

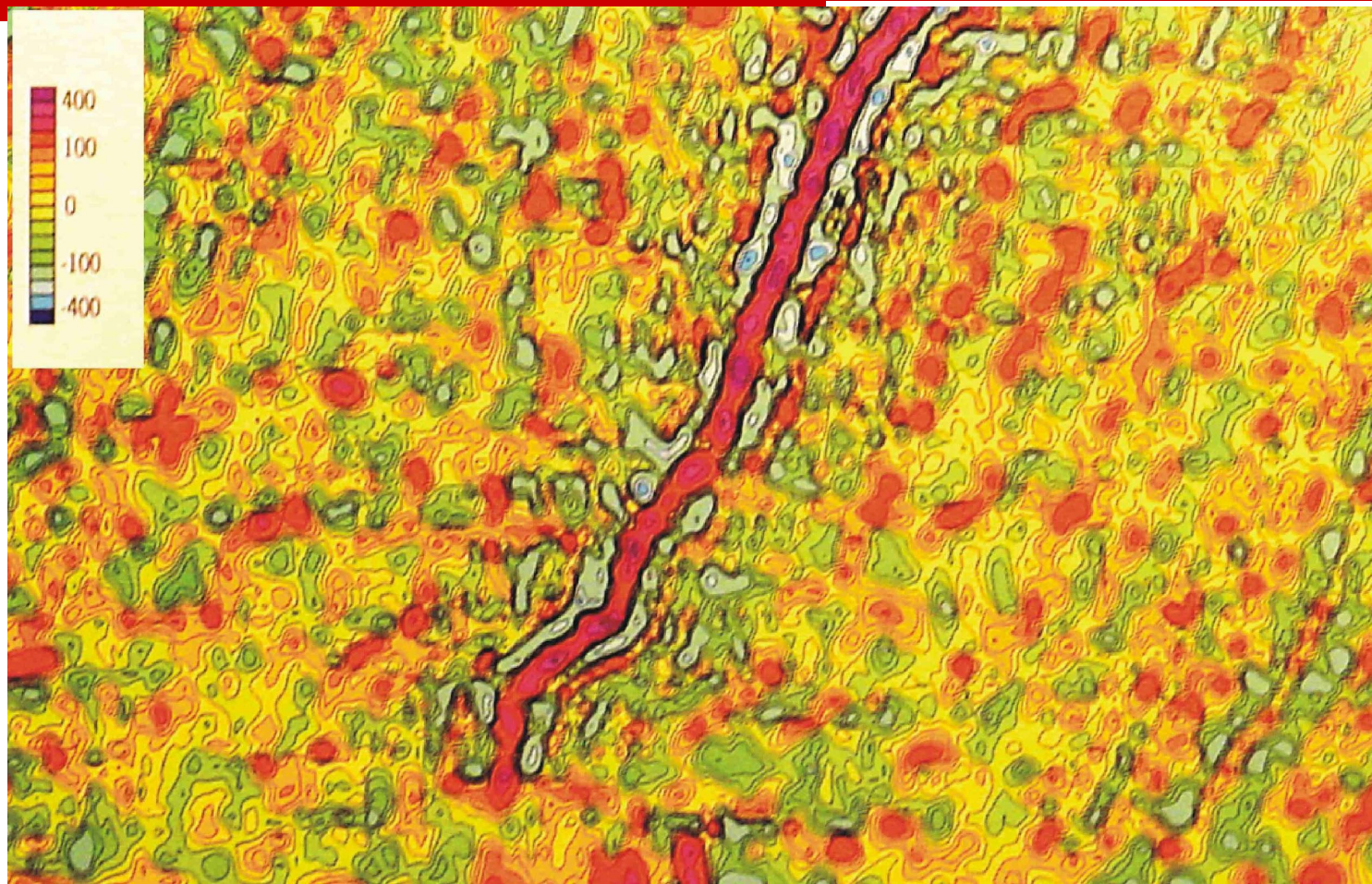
Геологическая карта

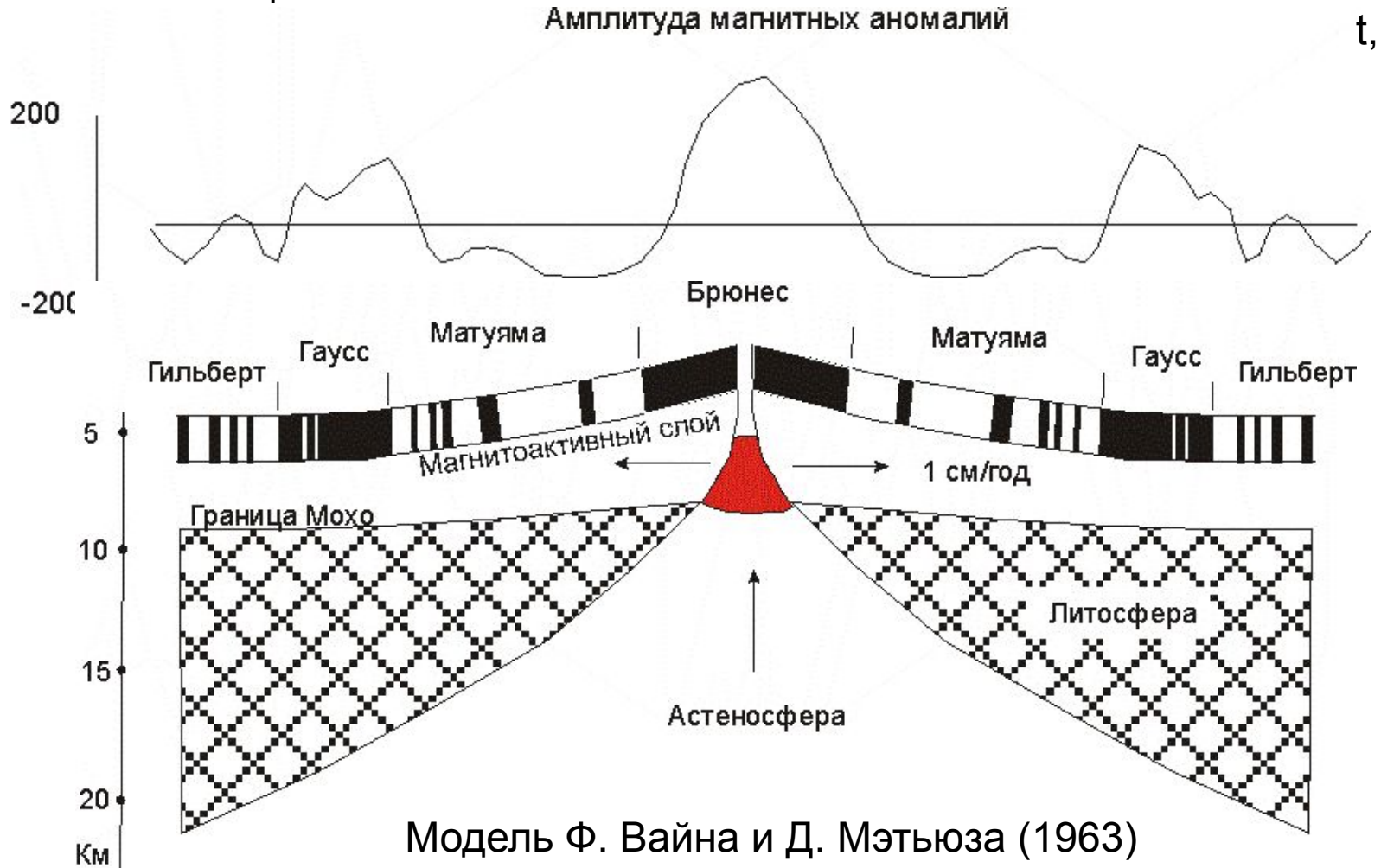
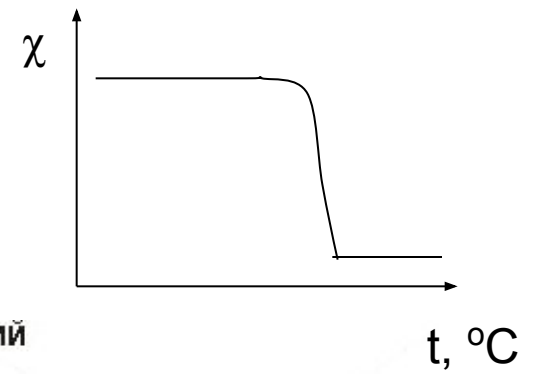
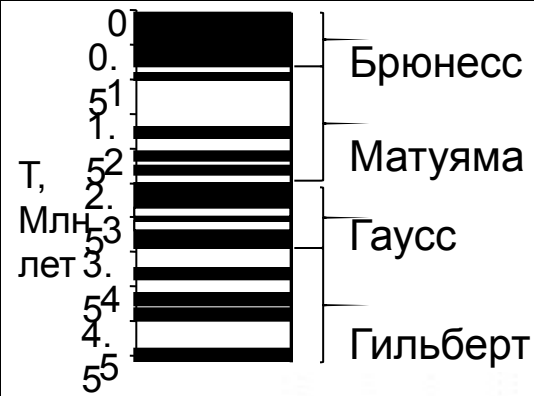


И магнитное поле



6.9 Магнитные аномалии в океанах





Палеомагнитная реконструкция Южной Атлантики



Выводы - вопросы

- На что похож источник магнитного поля Земли?
 - Чем отличаются магнитные и геомагнитные полюса?
 - Что такое аномальное поле
 - Какие породы наиболее (наименее) намагничены?
 - Когда остаточная намагниченность полезна для практики, а когда – создает помеху?
 - Чем отличаются магнитные и гравитационные аномалии?
 - О каких элементах залегания и параметрах простых тел можно судить по магнитным аномалиям? Какие параметры нельзя определить?
 - Области применения магниторазведки?
-