



# **МАГНИТОРАЗВЕДКА**

## **Глава 2**

### **«Магнитные свойства горных пород и руд»**

Ver 1.3.

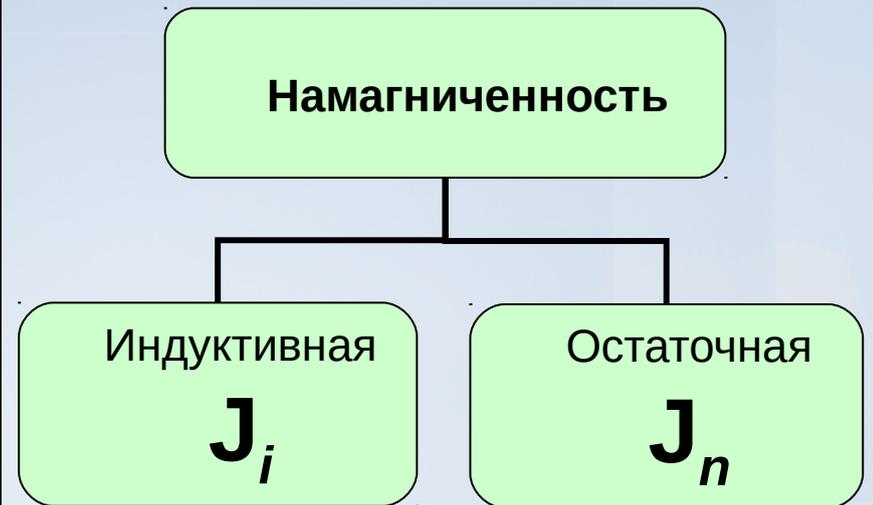
НОВИКОВ К.В. 2011 – 2017 гг.

# 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	4π·10 <sup>-7</sup> Гн/м = 1 СГС
Магнитная восприимчивость	$\chi$	ед. СИ	ед. СГС	1 ед.СИ = 4π ед. СГС

# Связь индукции магнитного поля и свойств среды

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{J}^\Sigma) = \\ &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{J}^{\text{инд}} + \mathbf{J}^{\text{ост}}) = \\ &= \mu_0 (\mathbf{H} + \chi \mathbf{H} + \mathbf{J}^{\text{ост}}) = \\ &= \mu_0 (\mathbf{H}(1 + \chi) + \mathbf{J}^{\text{ост}}) = \\ &= \mu_0 (\mu \mathbf{H} + \mathbf{J}^{\text{ост}}) = \\ &= \mu_0 \mu \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{J}^{\text{ост}} \end{aligned}$$

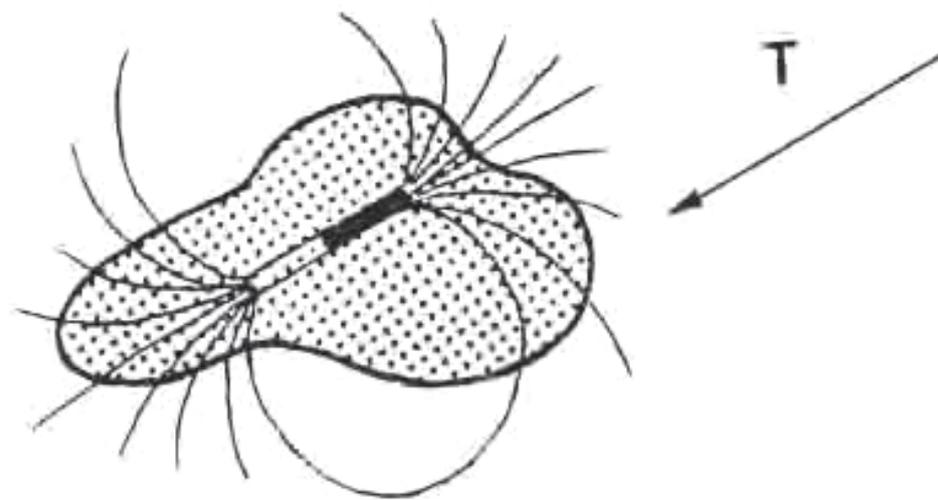


$$\mu = (1 + \chi)$$

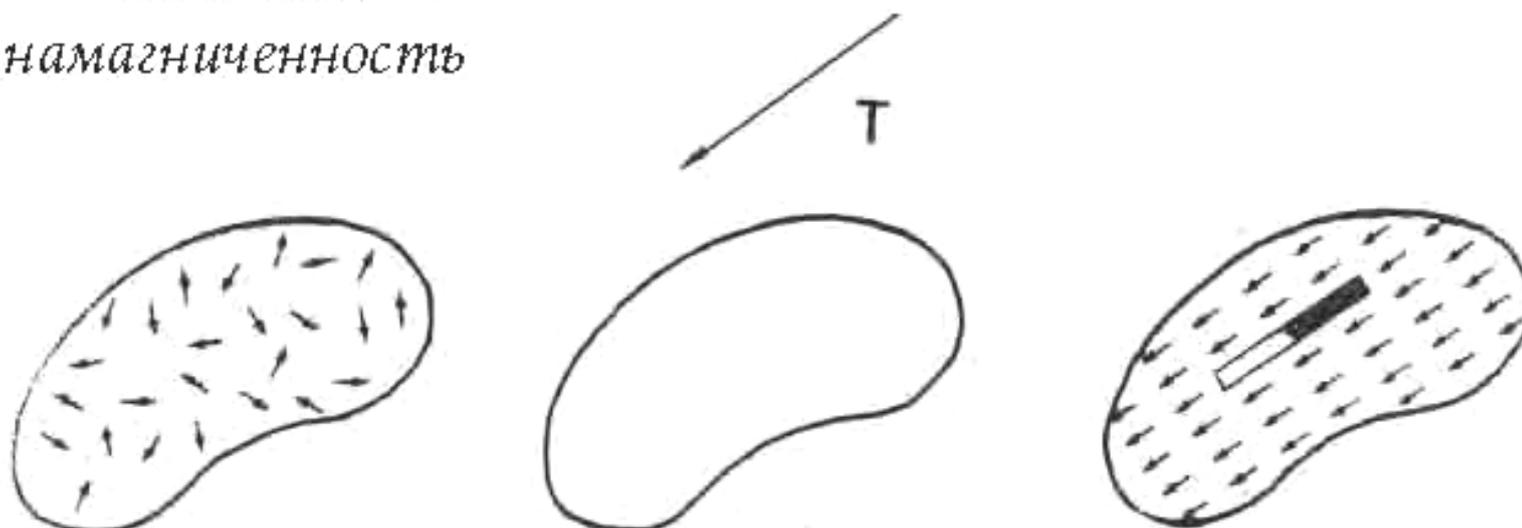
$$\mathbf{J}^{\text{инд}} = \chi \mathbf{H}$$

$$J = \frac{\chi T}{\mu_0} \quad J_Z = \frac{\chi Z}{\mu_0}$$

*Индукцированная  
намагниченность*



*Остаточная  
намагниченность*



heating > 670°C

## 2.1. Магнитные свойства вещества

---

**Магнетизм**

```
graph TD; A[Магнетизм] --- B[Диамагнетизм]; A --- C[Парамагнетизм]; A --- D[Ферромагнетизм]; D --- E[Ферримагнетизм]; D --- F[Антиферромагнетизм];
```

*Диамагнетизм*

*Парамагнетизм*

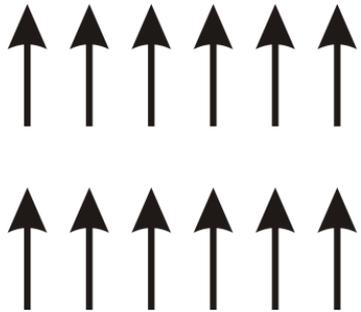
*Ферромагнетизм*

*Ферримагнетизм*

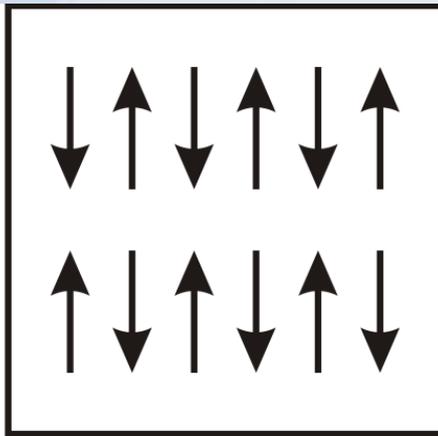
*Антиферромагнетизм*

## 2.1.1 Ферромагнетизм

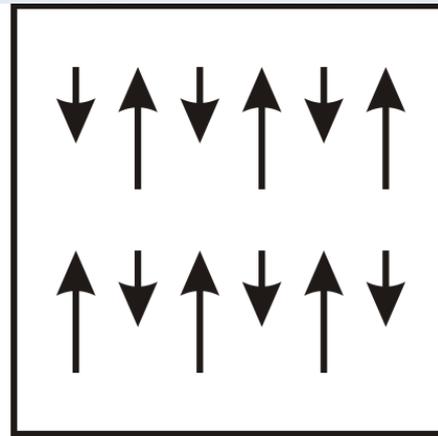
Вещества с параллельным расположением спиновых магнитных моментов называются **ферромагнетиками**, если же магнитные моменты направлены в разные стороны, то такие вещества называются **антиферромагнетиками**. Существуют также разновидности антиферромагнетизма – **ферримагнетизм** и, так называемый, **слабый ферромагнетизм**.



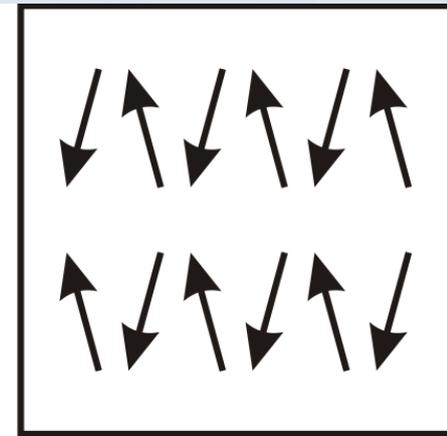
*а*



*б*



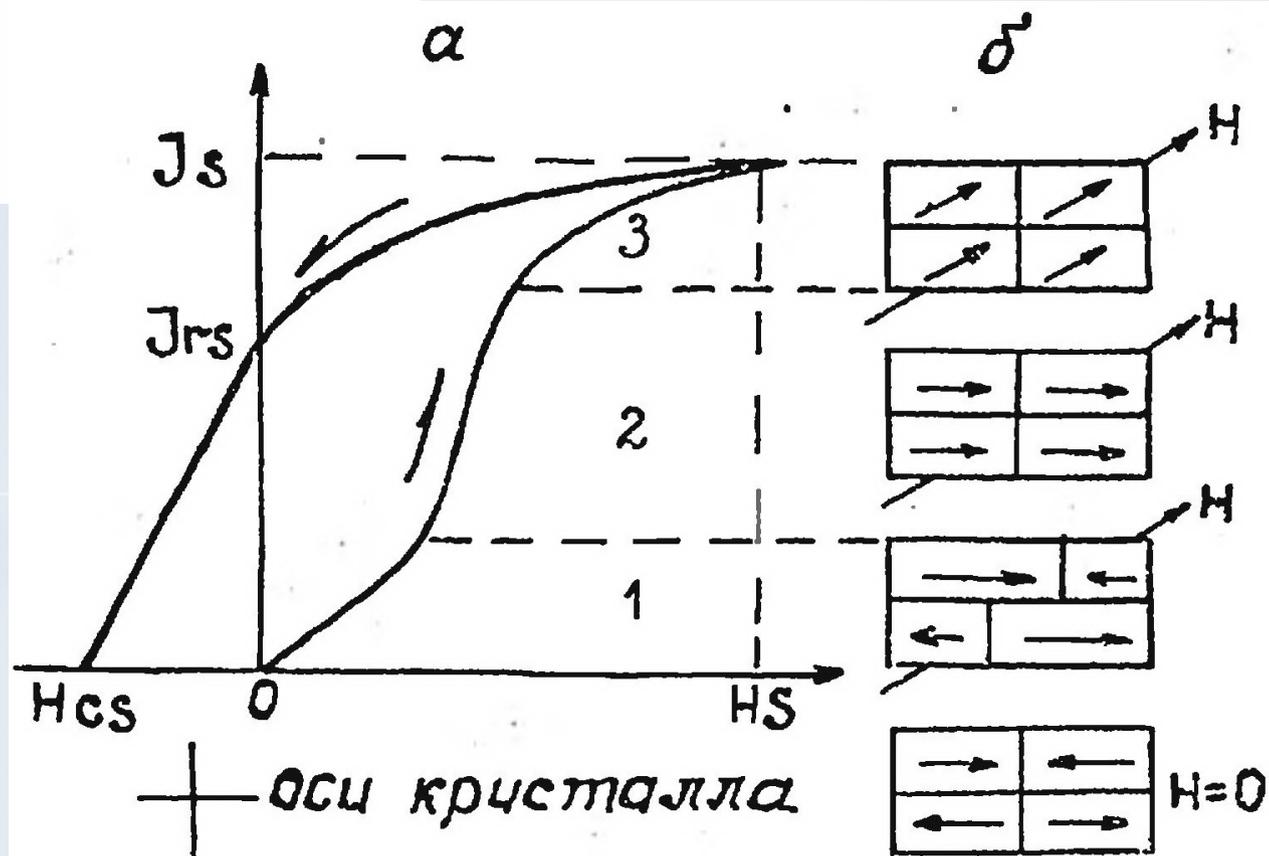
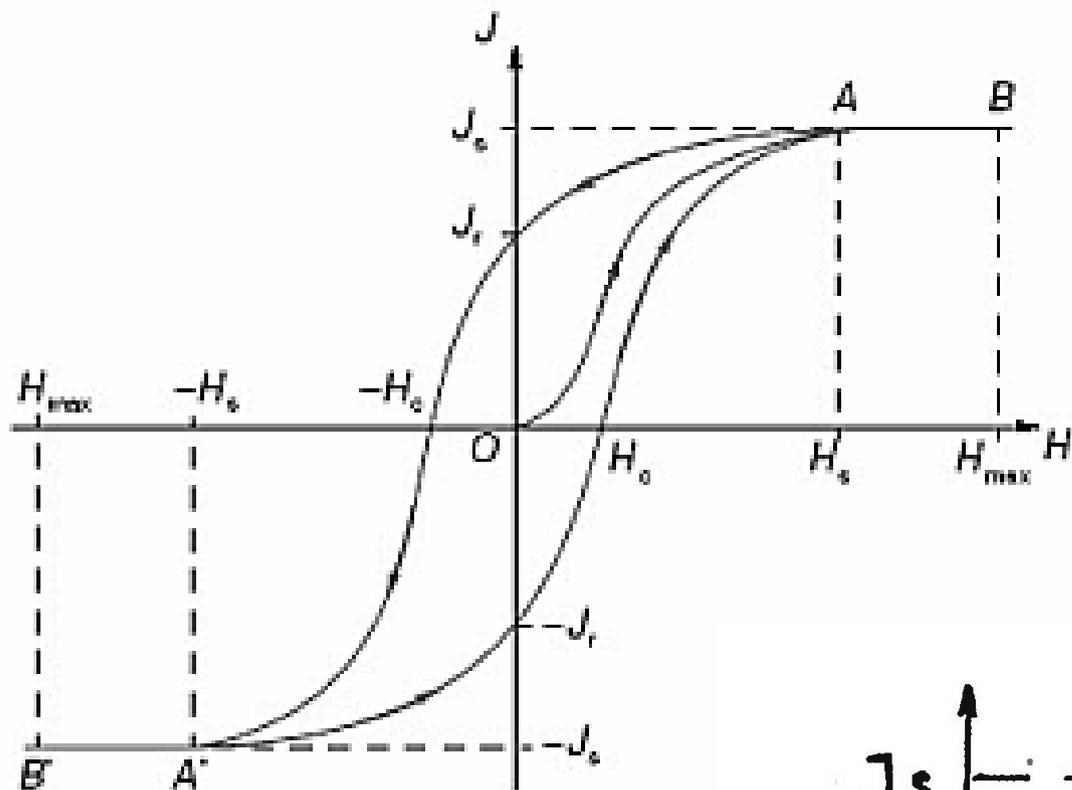
*в*



*г*

Классификация ферромагнитных веществ: а – ферромагнетики; б – антиферромагнетики; в – ферримагнетики; г – слабые ферромагнетики.

# Намагничивание ферромагнетиков (гистерезис)

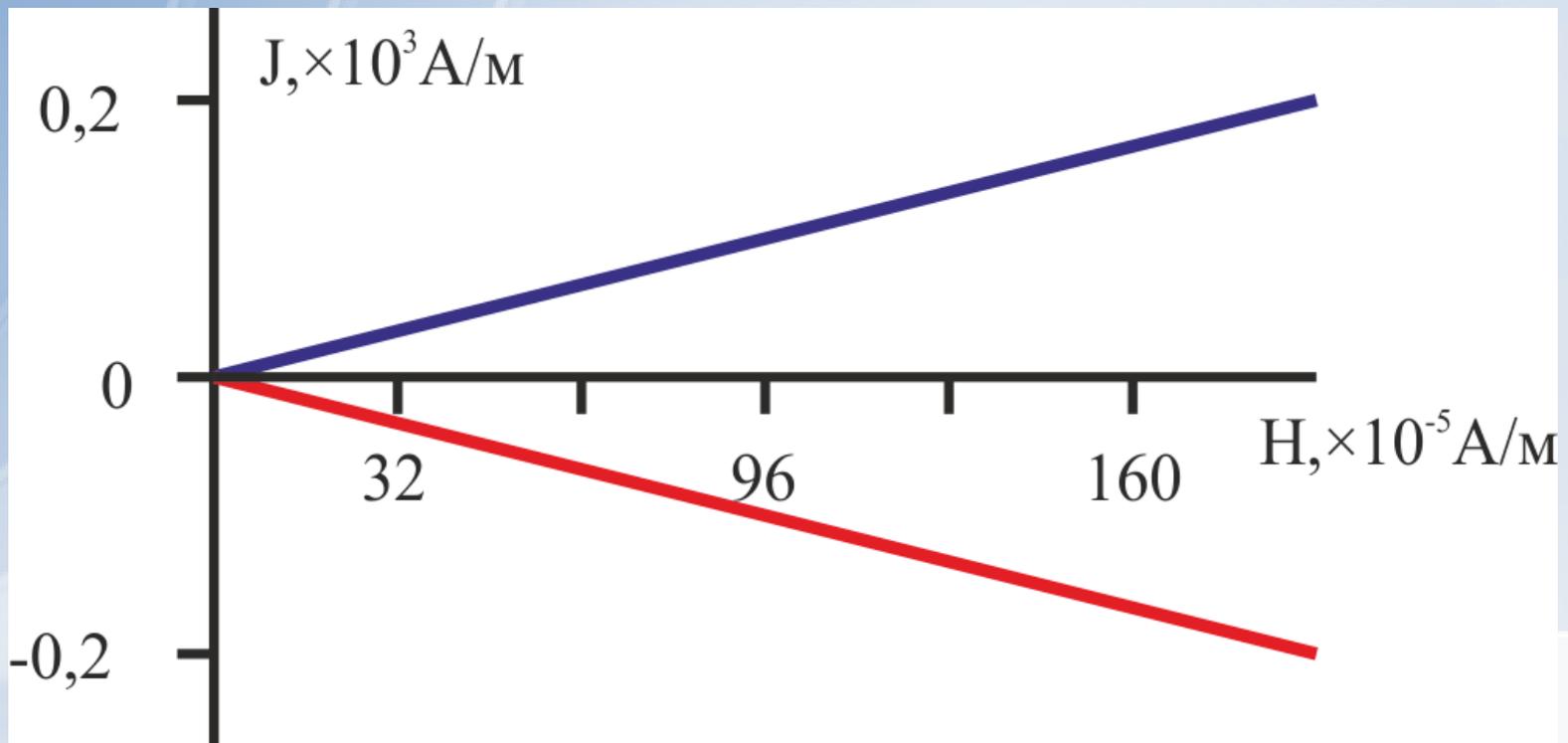


## Магнитные свойства ферромагнитных минералов

Минерал	Формула	$\chi$ , ед.СИ
Магнетит	$\text{FeFe}_2\text{O}_4$	8,8–25
Титаномагнетит	$x\text{-FeFe}_2\text{O}_4(1-x) \text{TiFe}_2\text{O}_4$	$10^{-5}$ –1
Маггемит	$y\text{-Fe}_2\text{O}_3$	3,8–25
Магнезиоферрит	$\text{MgFe}_2\text{O}_4$	10
Гематит	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$(1,3\text{--}13) \cdot 10^{-3}$
Пирротин	$\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$	0,13–1,3
Якобсит	$\text{MnFe}_2\text{O}_4$	250
Треволит	$\text{NiFe}_2\text{O}_4$	6,3
Гетит	$\alpha\text{FeOOH}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Сидерит	$\text{FeCO}_3$	$(2,7\text{--}7,5) \cdot 10^{-3}$

## 2.1.2. Диамagnetизм и парамагнетизм

---



**Графики намагничивания парамагнетиков и диамagnetиков [Добрынин, 1991].**

# Магнитная восприимчивость парамагнитных минералов [по Дортман, 1982]

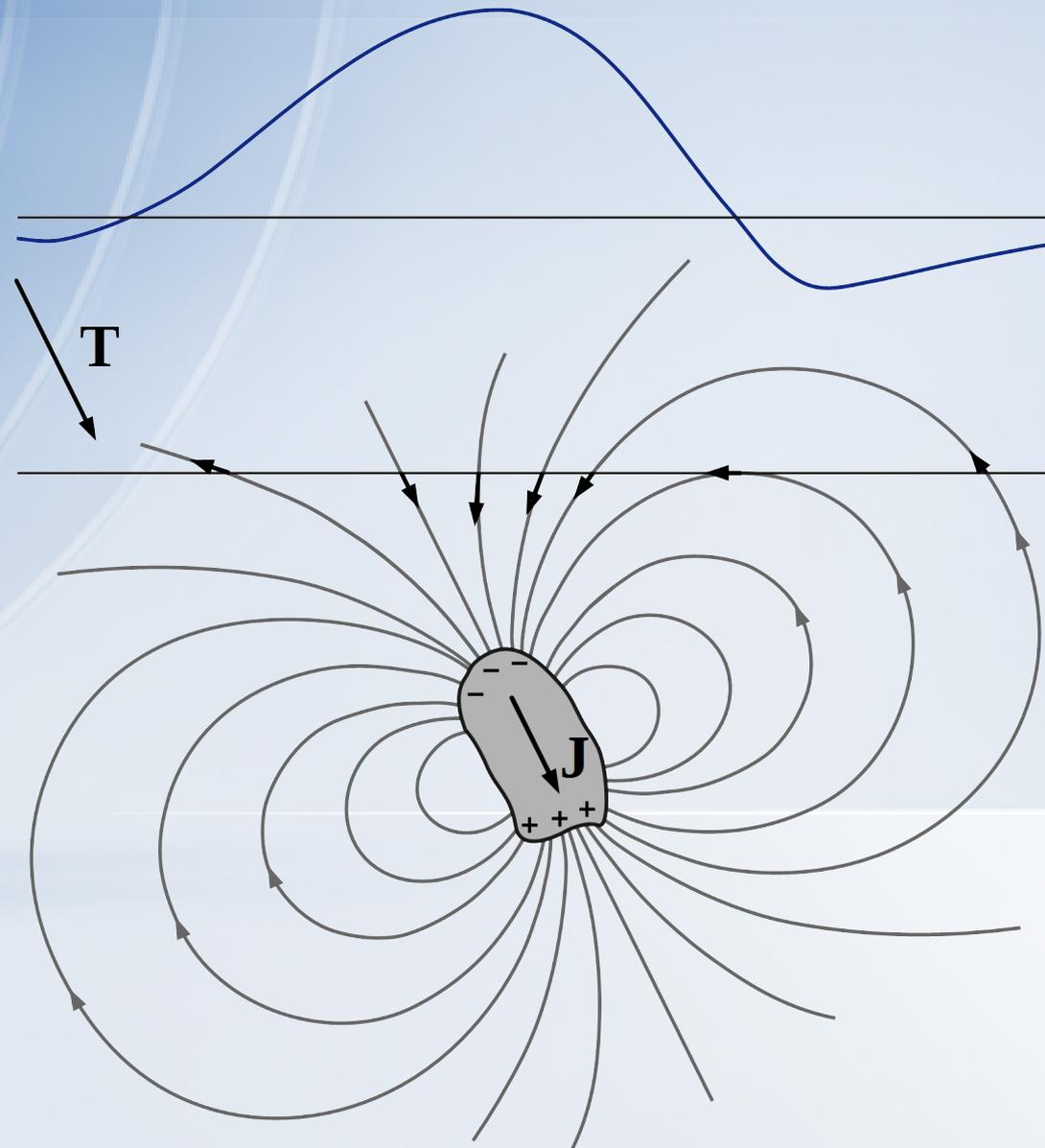
Минерал	Формула	$\chi$ , $\cdot 10^{-5}$ ед.СИ
1	2	3
Безжелезистые		
Альбит	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	0
Микроклин	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	0
Мусковит	$\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}] [\text{OH}]_2$	4–21
Топаз	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F}, \text{OH})$	1,9
Корунд	$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,8
Рутил	$\text{TiO}_2$	10,6
Шпинель	$\text{MgAl}_2\text{O}_4$	2,8
Железосодержащие		
Биотит	$\text{K} (\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] [\text{OH}, \text{F}]_2$	(10–100)/30
Флагопит	$\text{KMg}_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] \cdot [\text{F}, \text{OH}]$	(25–100)/50
Амфиболы	-	(10–140)/60
Пироксены	-	(30–450)/80
Оливин	-	1–2000

# Магнитная восприимчивость диамагнитных минералов [Ерофеев и др., 2006]

Минерал	Формула	$\chi$ , $\cdot 10^{-5}$ ед.СИ
Кварц	$\text{SiO}_2$	-1,6
Ортоклаз	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	-0,6
Циркон	$\text{Zr}[\text{SiO}_4]$	-1,2
Галенит	$\text{PbS}$	-3,3
Касситерит	$\text{SnO}_2$	-2,0
Ковелин	$\text{CuS}$	-1,2
Флюорит	$\text{CaF}_2$	-1,2
Барит	$\text{BaSO}_4$	-1,8
Сфалерит	$\text{ZnS}$	- 6,5
Апатит	$\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3$	- 10,3
Графит	$\text{C}$	-0,5

## 2.2. Индуктивная намагниченность

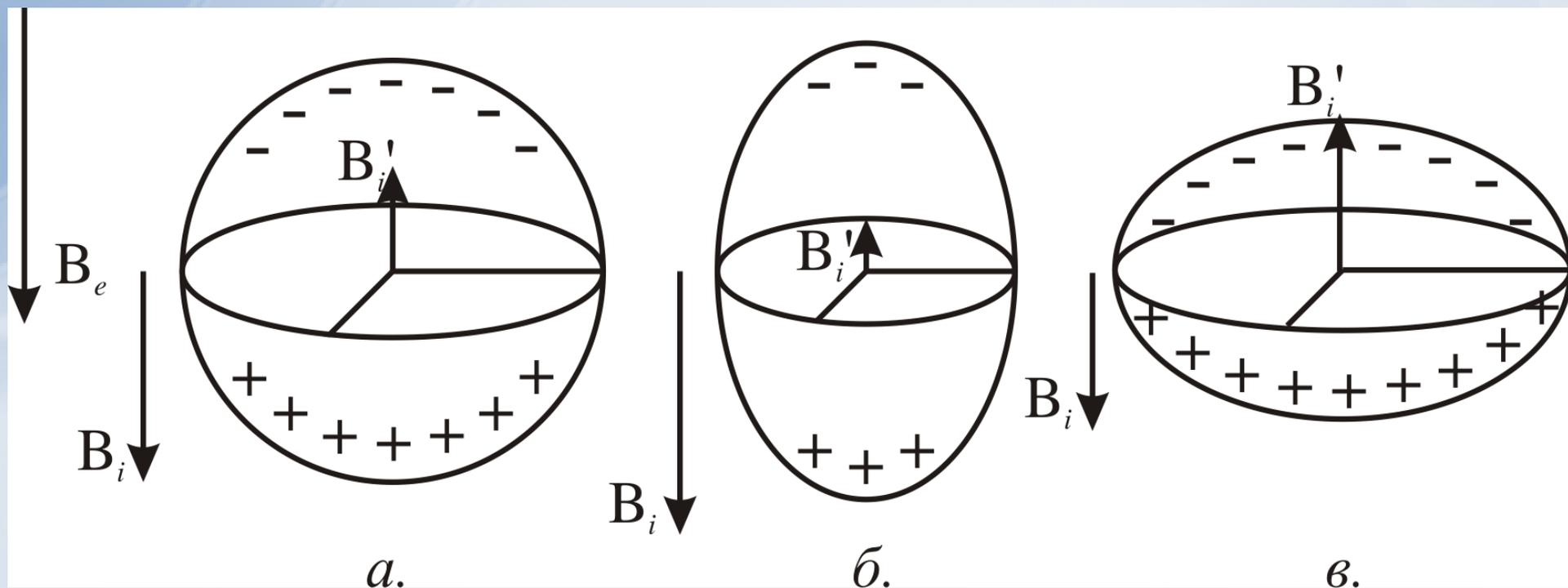
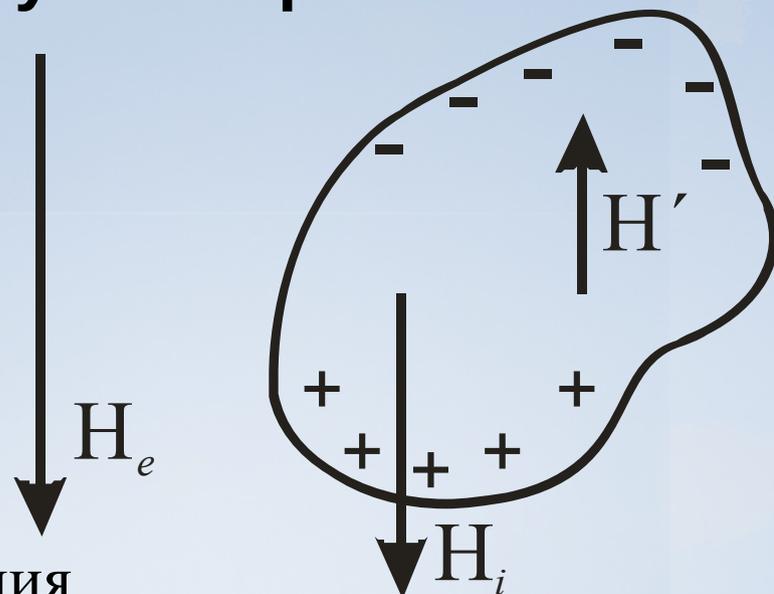
---



# Намагниченность объекта с учетом размагничивания

$$J = \frac{\chi H}{1 + \chi N}$$

где,  $N$  – коэффициент размагничивания



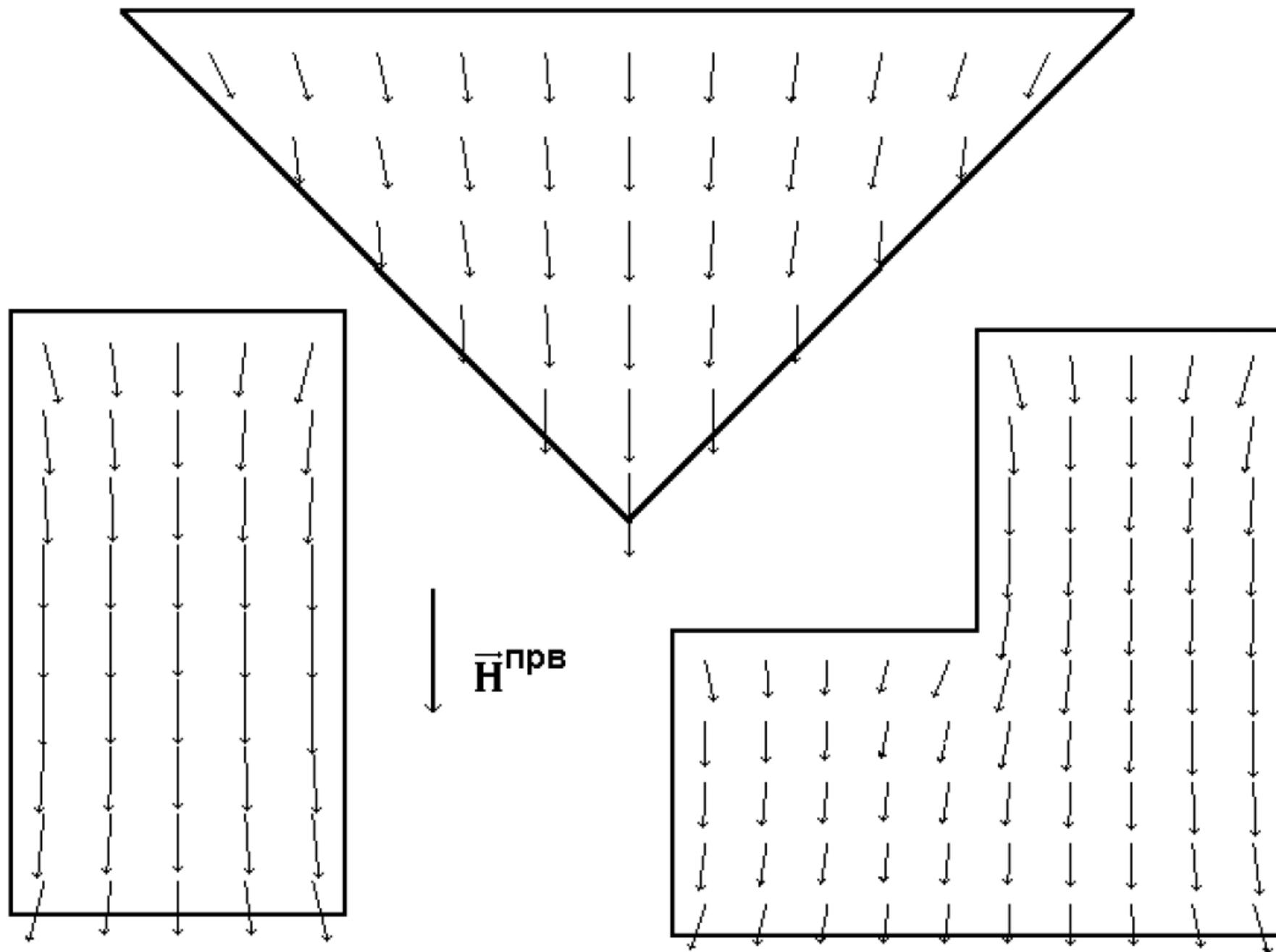


Рис. 4. Намагниченность однородных моделей с  $\kappa=2$  СИ, полученная в однородном вертикальном поле под влиянием размагничивания [Блох, 1993]

# Коэффициент размагничивания

Коэффициент  $N$  зависит только от формы тела и изменяется в пределах от 0 до 1 в ед. СИ (0 до  $4\pi$  в ед. СГС,  $N_{\text{СГС}}=4\pi N_{\text{СИ}}$ ).

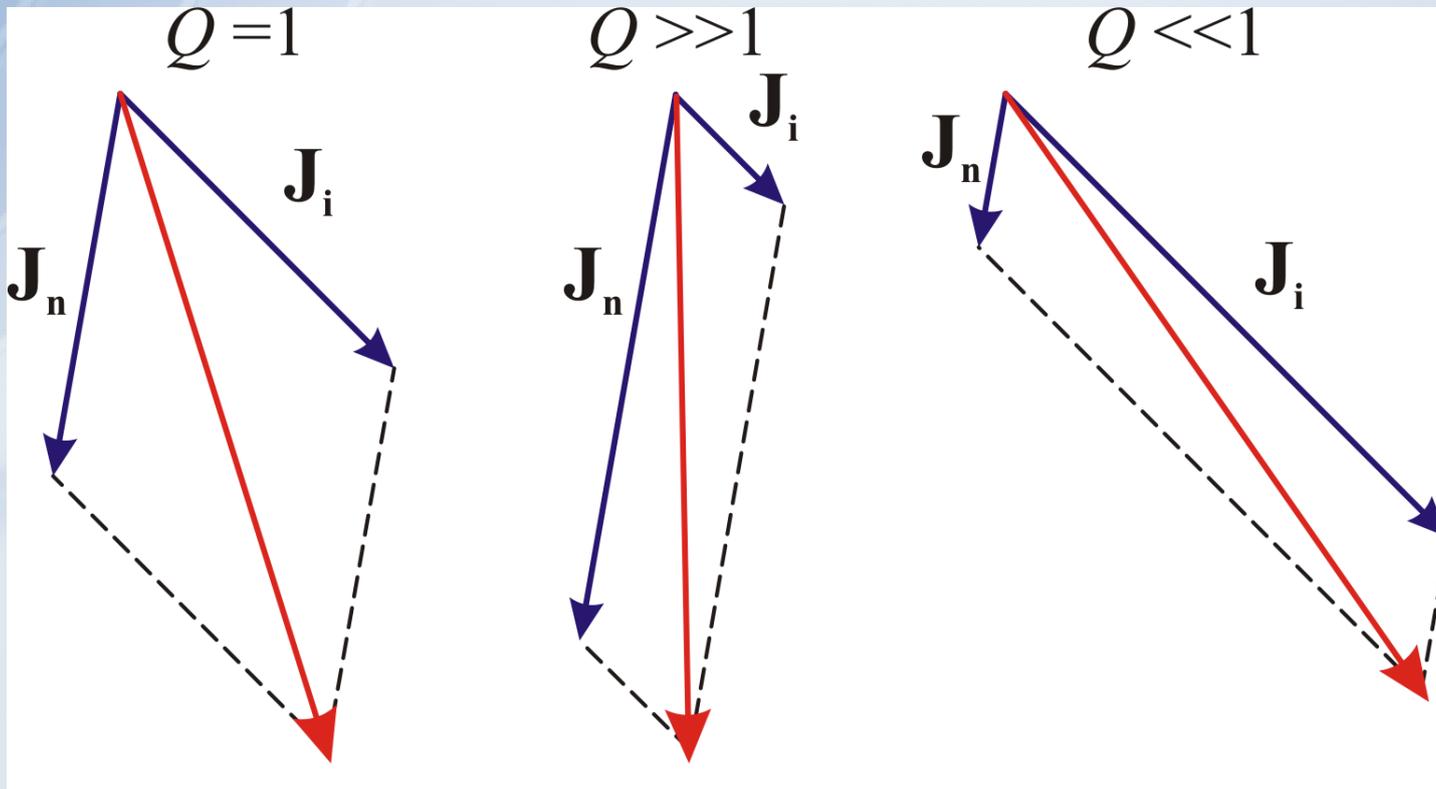
Коэфф. размагничивания $N$ , ед. СИ	Форма тела
1	Бесконечно тонкая пластинка, намагничивающее поле перпендикулярно к ее плоскости (полюсные поверхности сближены на бесконечно малое расстояние).
1/2	Круговой цилиндр, намагничиваемый перпендикулярно к его образующей.
1/3	Шар.
$a/(a + b)$	Эллиптический цилиндр, намагничиваемый перпендикулярно к его образующей и параллельно оси $a$ , где $a$ и $b$ – главные оси эллипса сечения.
0	Бесконечно длинный тонкий стержень, намагничиваемый параллельно его длине (полюсы разнесены на бесконечно большое расстояние).

## 2.3. Естественная остаточная намагниченность (ЕОН)



# Коэффициент Кенигсбергера

$$Q = \frac{J_n}{J_i}$$



## 2.4. Намагниченность горных пород

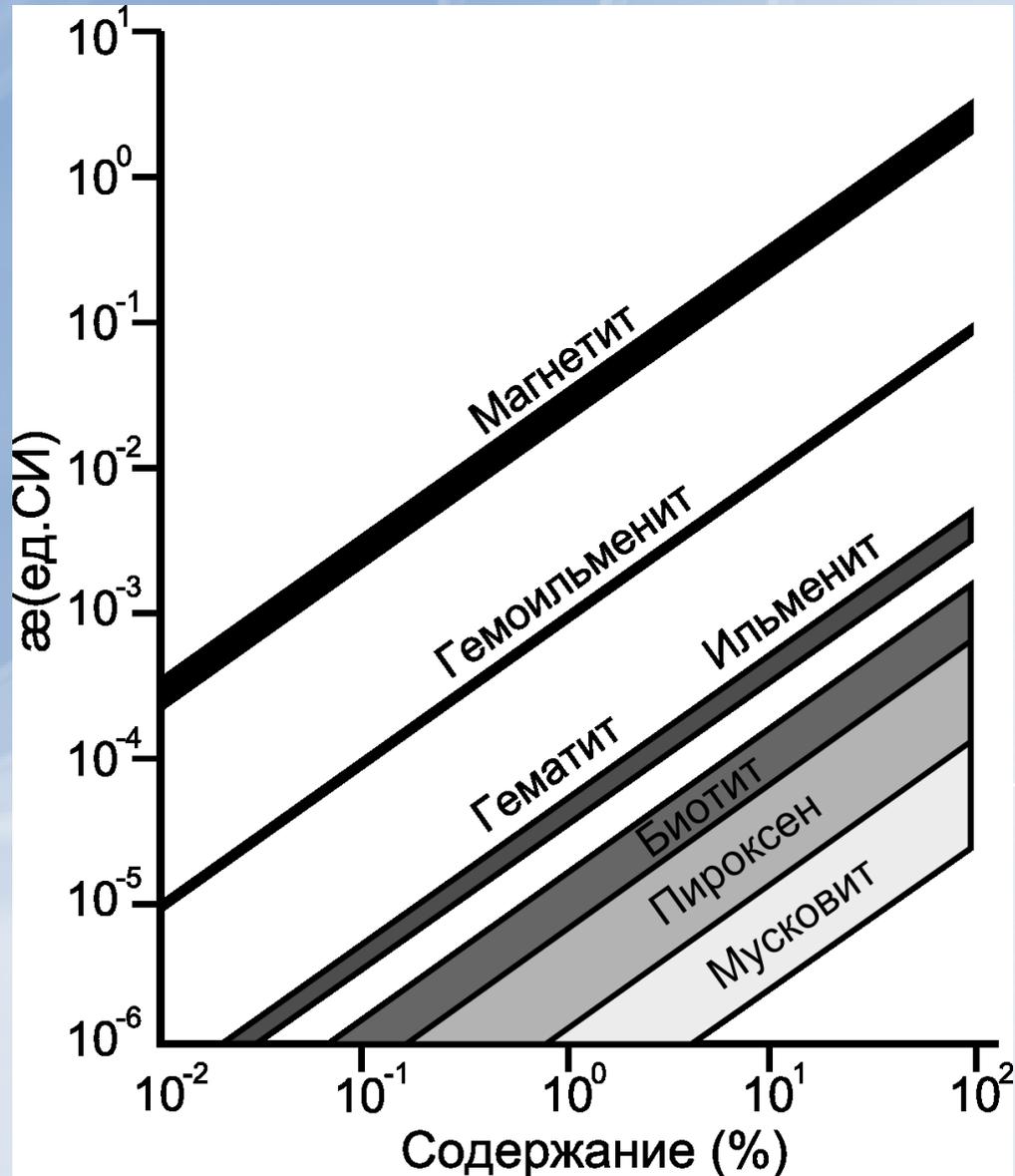


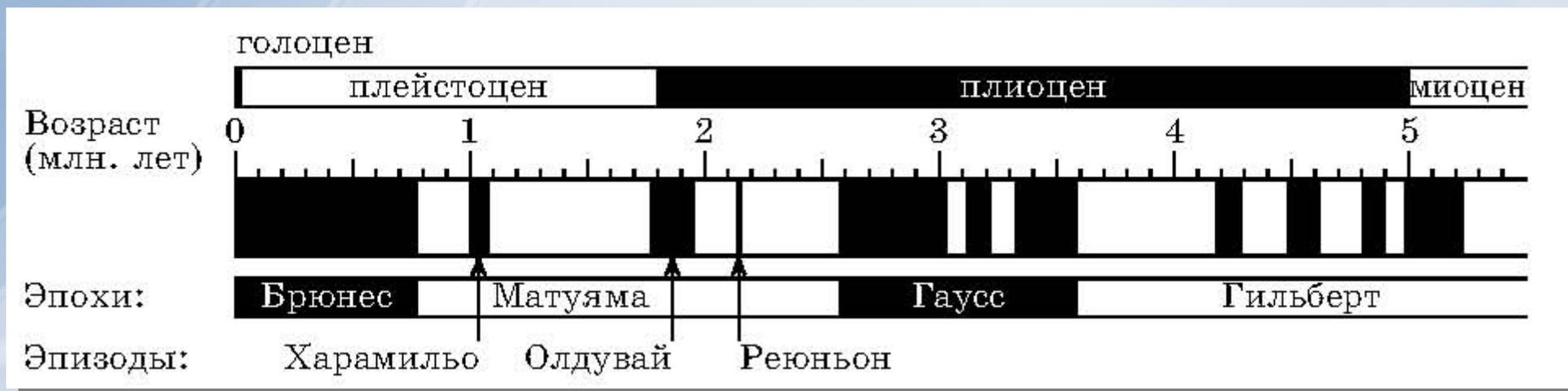
Диаграмма зависимости магнитной восприимчивости горных пород от концентрации ферромагнитных минералов.

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

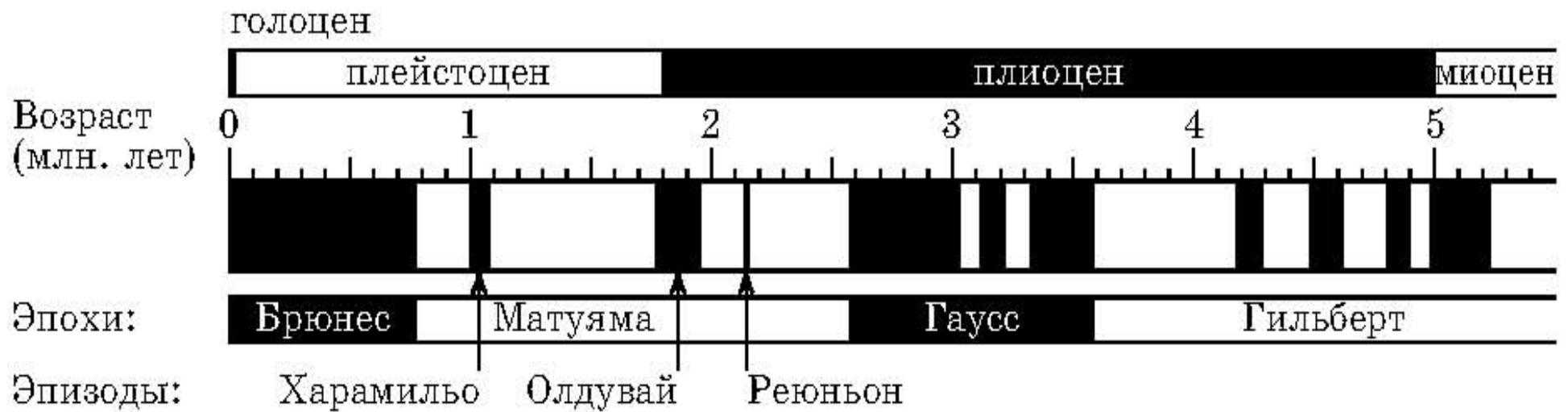
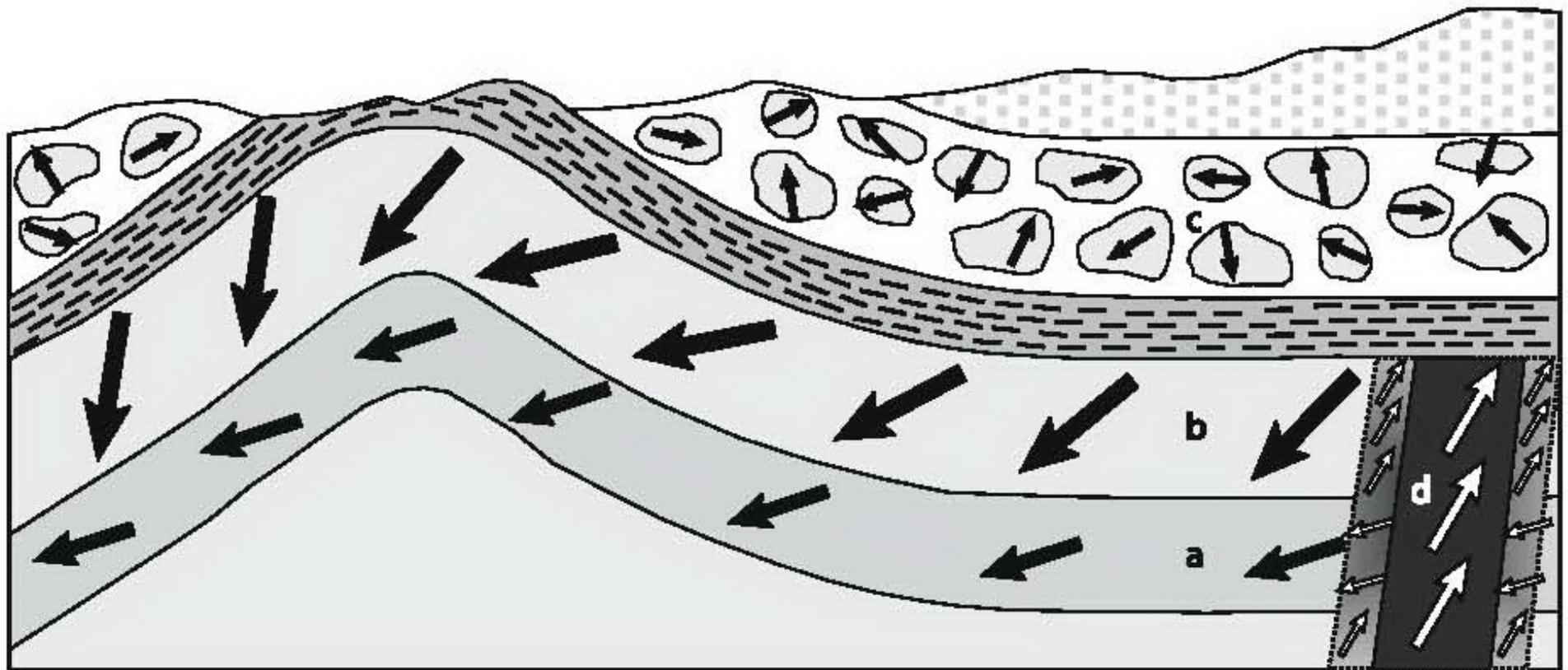
	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10	100
Железо									<b>железо</b>
Окиси железа				гематит	шлак	магнетит			
Вулканические породы				базальт					
				керамика					
				гранит					
				горелая почва					
				габбро					
				диорит					
Метаморфические породы			кварцит						
			песчаник						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

[Смекалова и др, 2007]

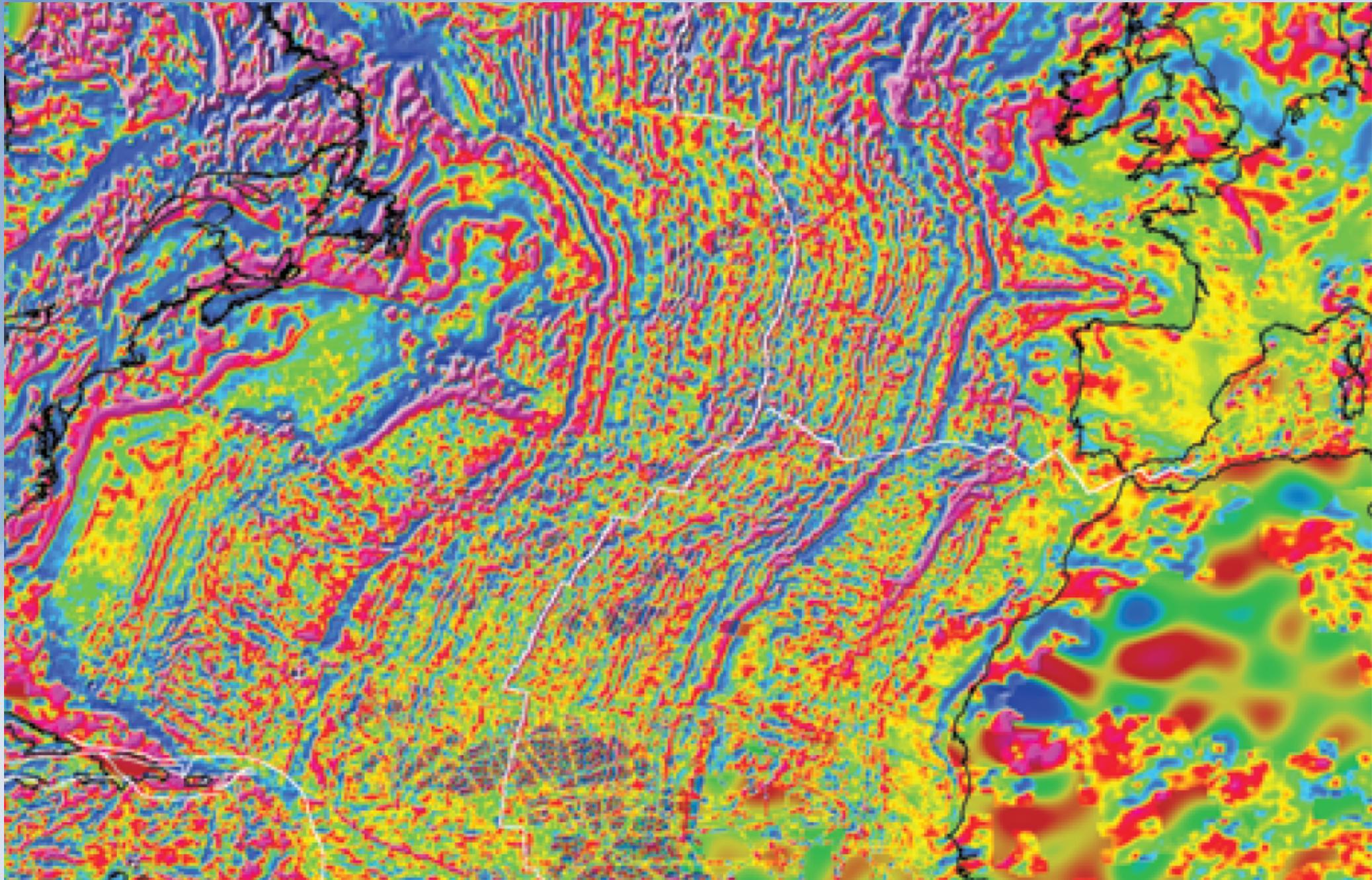
## 2.5. Палеомагнетизм.



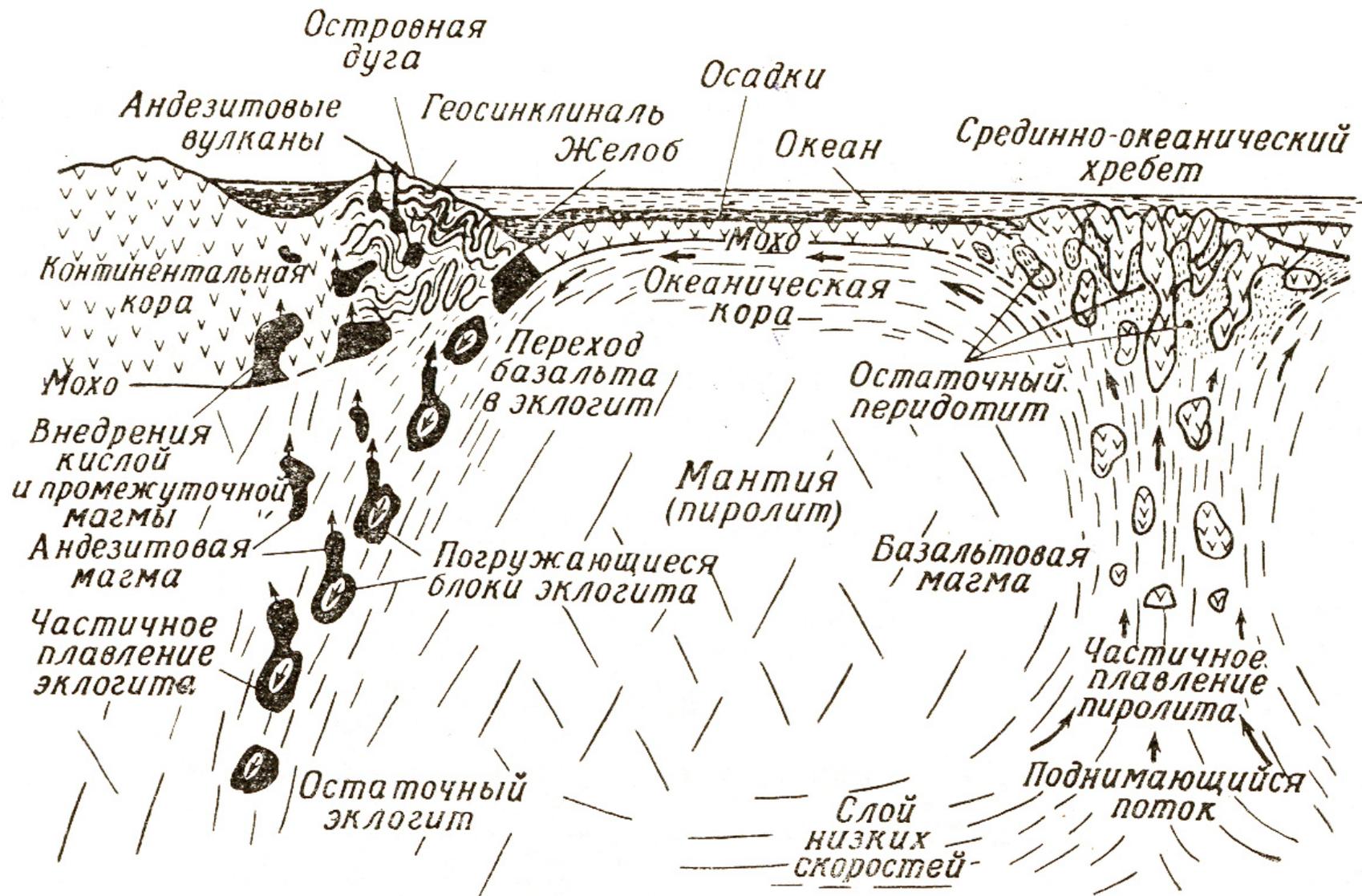
# Палеомагнетизм и магнитостратиграфия

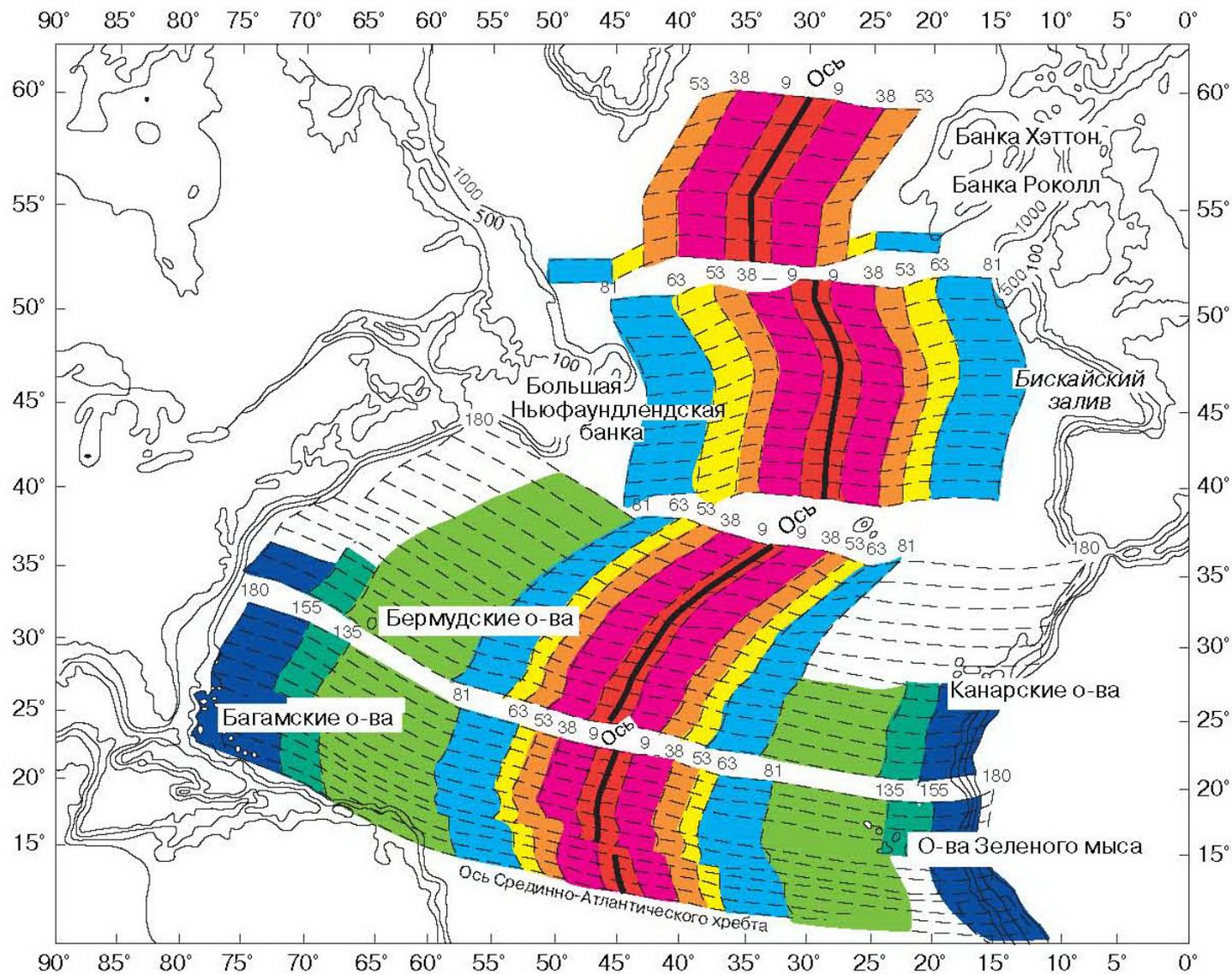


**Полосовые аномалии в Атлантическом океане.  
World Digital Magnetic Anomaly Map.**



# Полосовые аномалии возникают в зонах спрединга при образовании молодой коры





Карта возраста 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. [Короновский, 1997]

## 2.6. Магнитная анизотропия горных пород



Анизотропия магнитной восприимчивости оценивается по формуле:

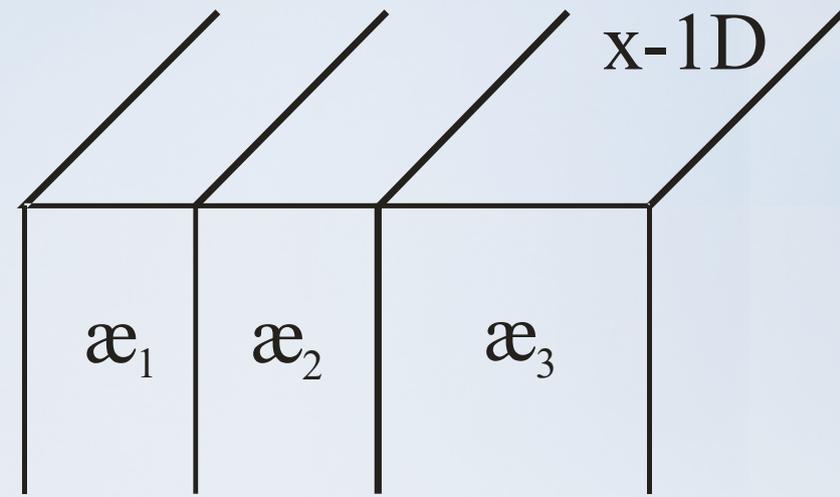
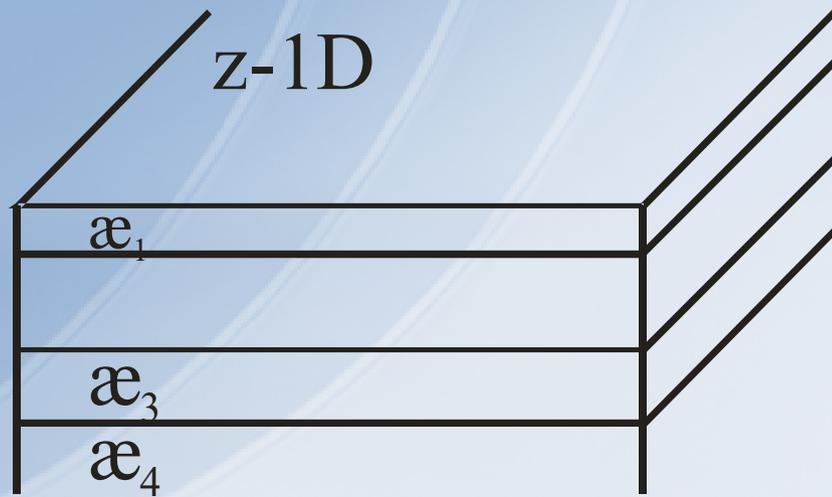
$$\lambda_{\text{a}} = \frac{\alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{min}}}{2\bar{\alpha}} = \frac{\alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{min}}}{\alpha_{\text{max}} + \alpha_{\text{min}}} \quad \text{или} \quad A_{\text{a}} = \frac{\alpha_{\text{max}}}{\alpha_{\text{min}}}$$

$$\lambda_{\text{a}} = \frac{1 - A_{\text{a}}}{1 + A_{\text{a}}}$$

$$A_{\text{a}} = \frac{1 - \lambda_{\text{a}}}{1 + \lambda_{\text{a}}}$$

## 2.7. Физикогеологические модели (ФГМ)

---



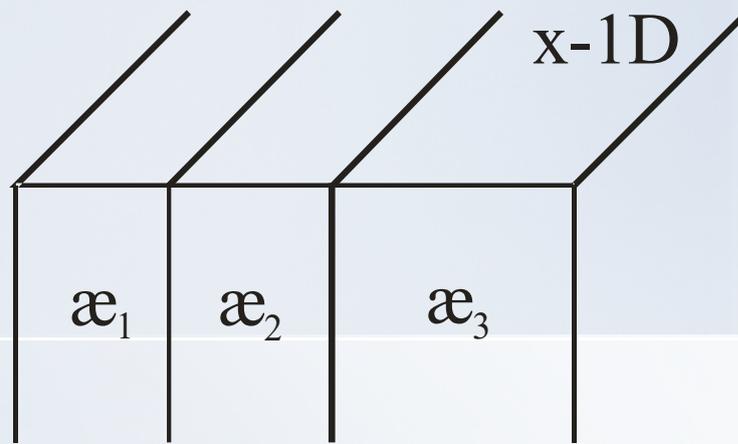
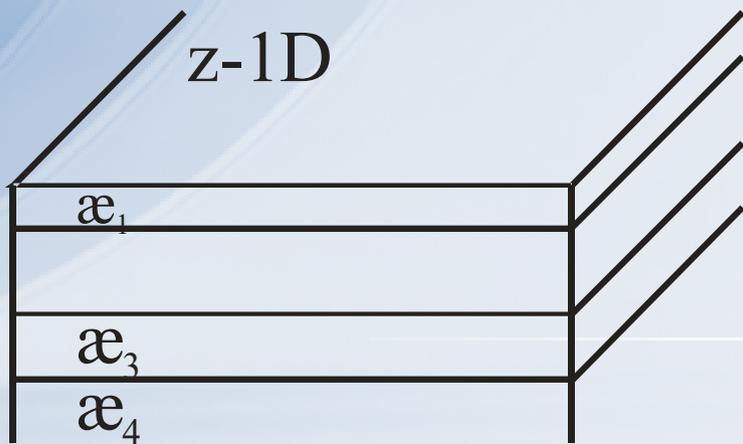
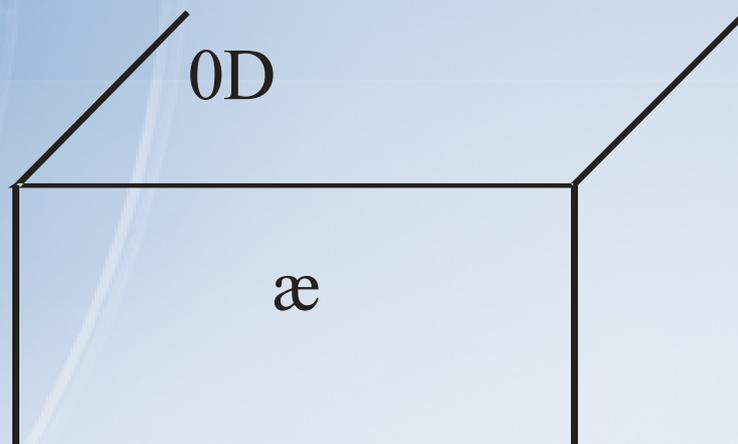
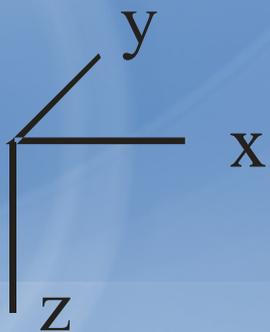
**Физико-геологическая модель (ФГМ)** – это совокупность упрощений геометрических и петрофизических свойств геологического разреза.



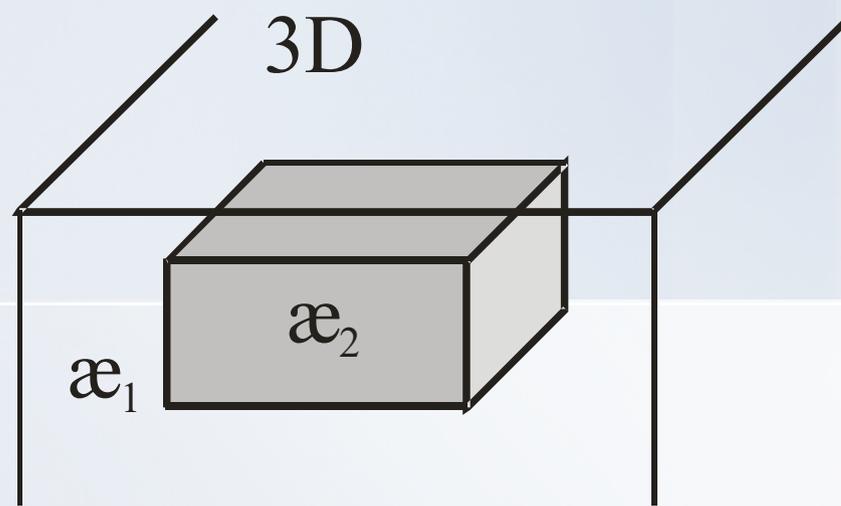
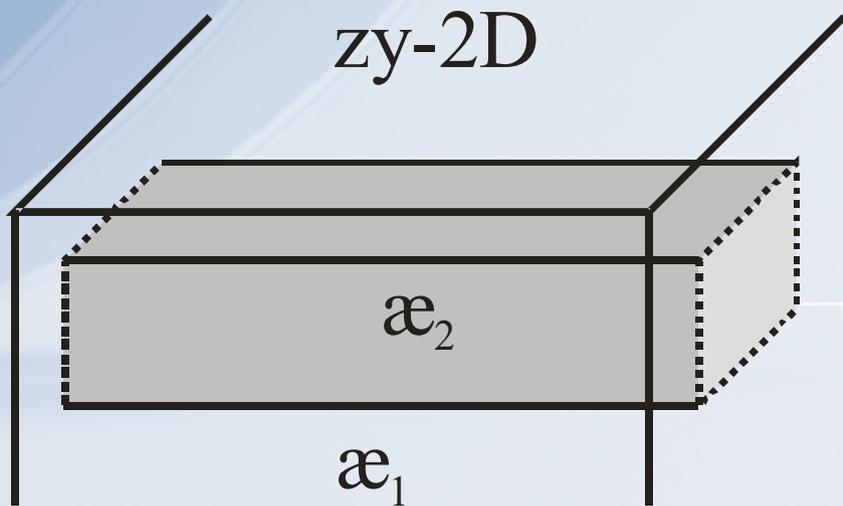
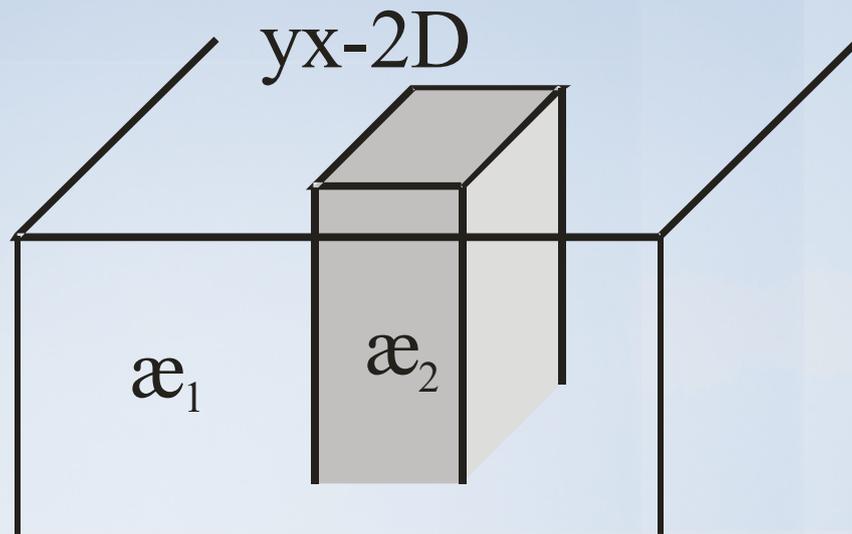
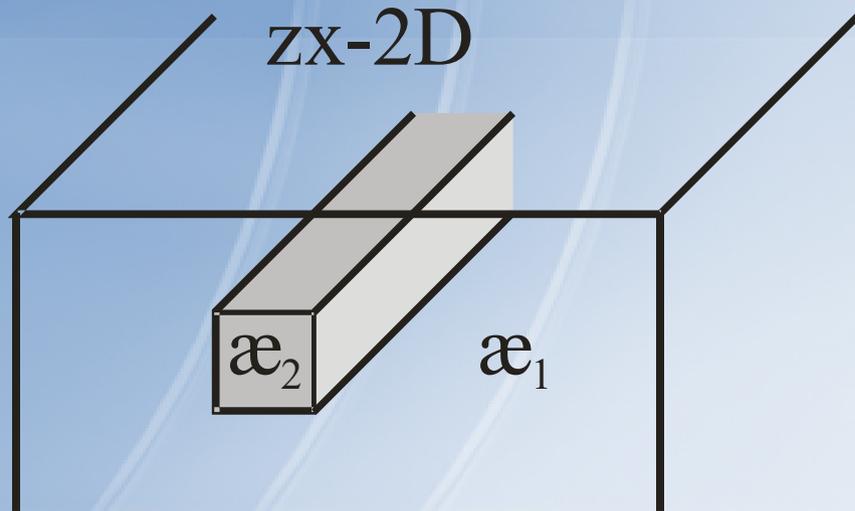
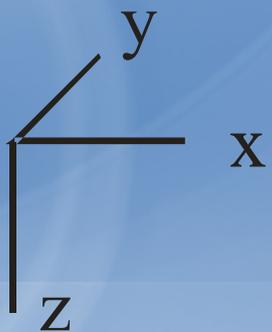
## Упрощения размерности моделей [по Блох, 2009 и Roy, 2007]

Размерность	Изменения свойств среды	Описание модели
0D	Не изменяются во всех направлениях.	Однородное изотропное пространство и полупространство
1D	Только в одном направлении	Горизонтально слоистая среда, вертикально-слоистая среда.
2D	По двум направлениям	Бесконечный горизонтальный цилиндр произвольной формы (длина более чем в 5 раз больше ширины)
2,5D	По двум направлениям	Конечный горизонтальный цилиндр произвольной формы. Частные случаи трехмерных тел.
2 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> D		
3D	По трем направлениям	Любые трехмерные объекты.
4D (3Dt)	По трем направлениям и во времени.	Учитывают изменение источников во времени.

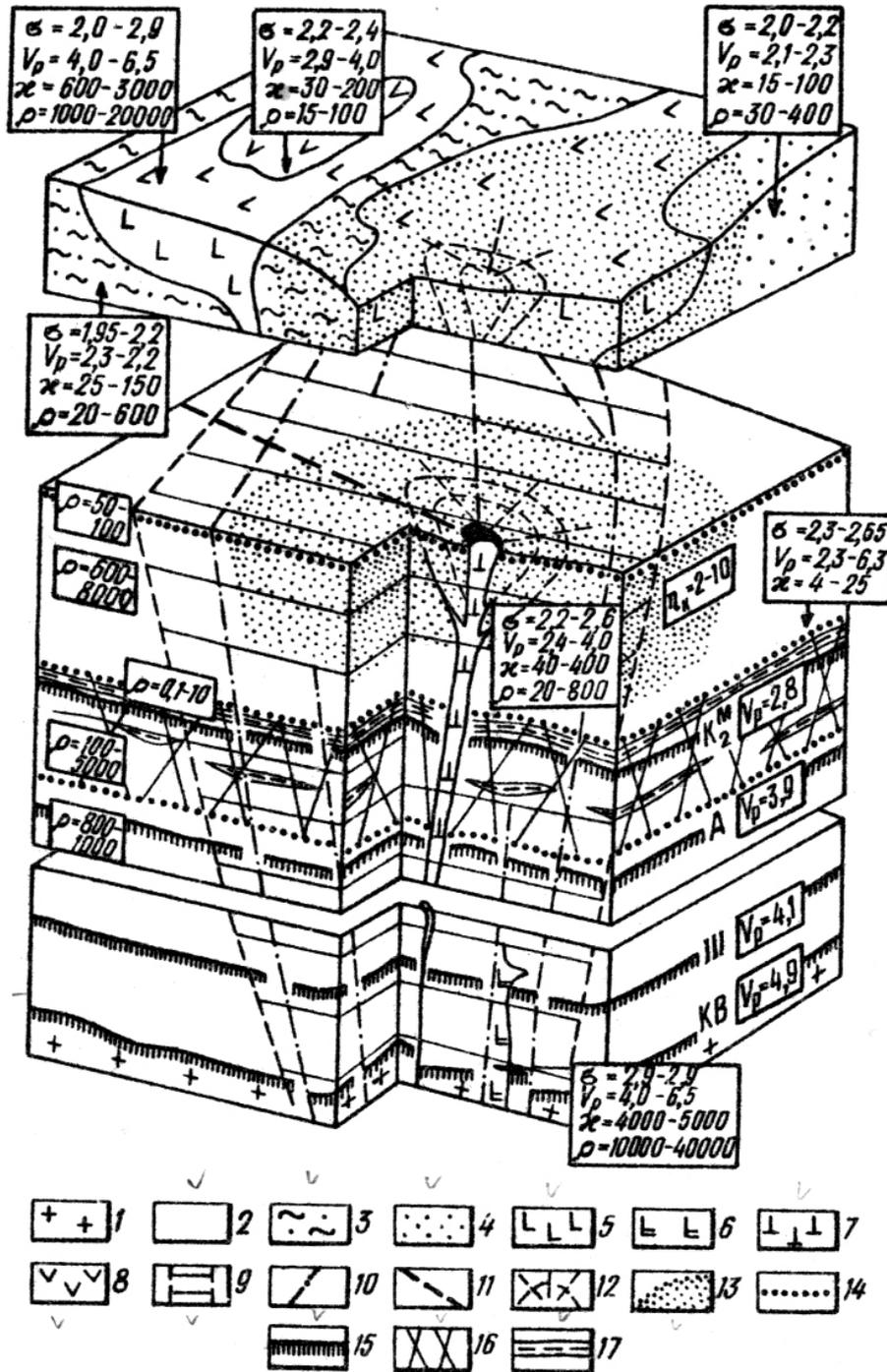
# 0D и 1D модели



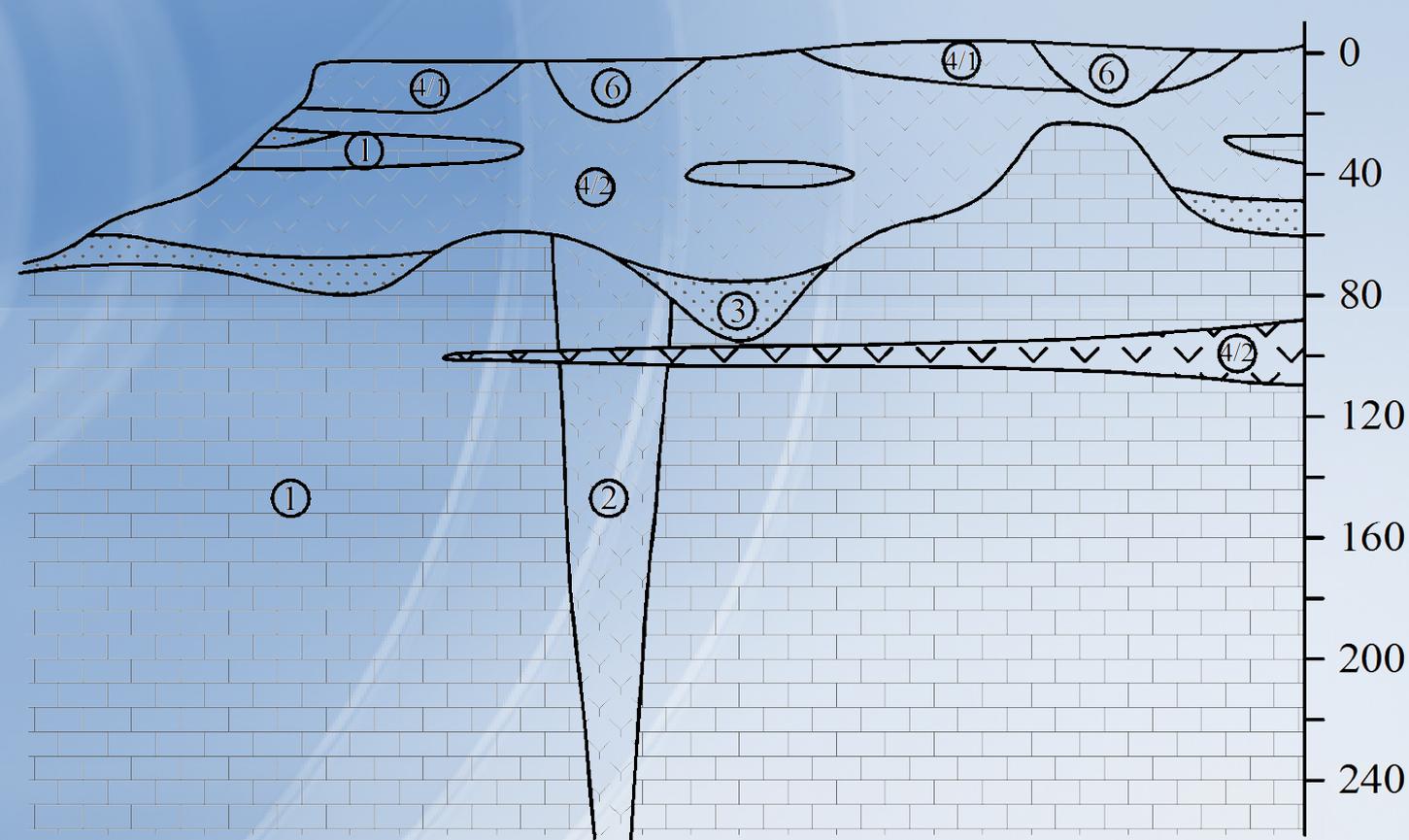
# 2D и 3D модели



# Геолого-геофизическая модель кимберлитовой трубки и околотрубочного пространства Якутской алмазоносной провинции (по Л.А. Богданову и др.).



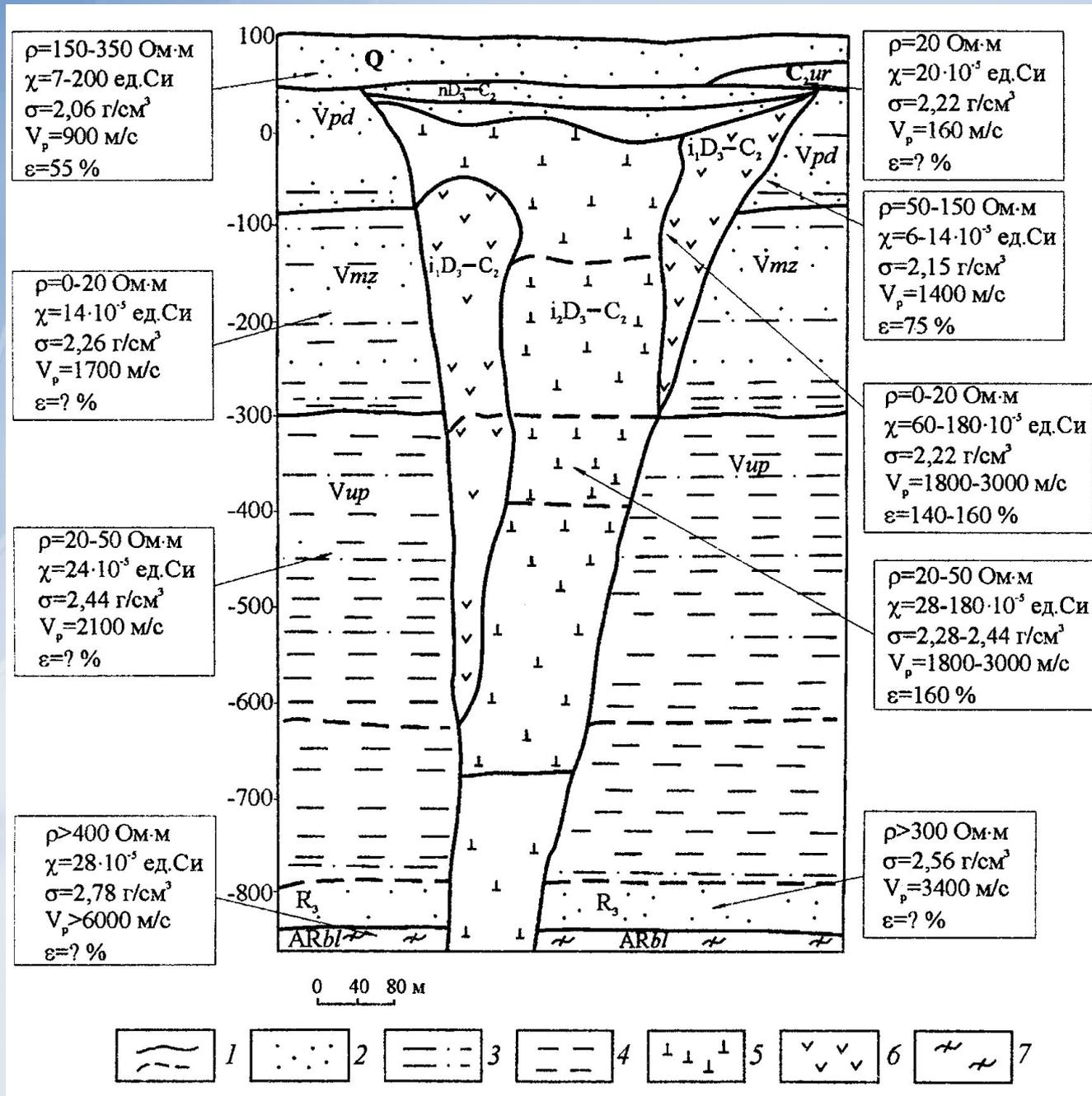
1 – докембрийский кристаллический фундамент; 2 – палеозойская карбонатная толща; 3 – юрские терригенные отложения; 4 – терригенные отложения пермо-карбона; 5 – траппы среднепалеозойские; 6 – траппы пермо-триаса; 7 – кимберлиты; 8 – туфогенные образования пермо-триаса; 9 – зона регионального разлома; 10 – элементарные разрывные нарушения в структуре регионального разлома; 11 – разрывные нарушения, секущие региональный разлом; 12 – радиально-концентрическая трещиноватость в околотрубочном пространстве; 13 – область изменения свойств вмещающих и перекрывающих трубку пород, приводящего к возникновению аномалий  $\eta_k$  (ореолов ВП); 14 – границы слоев различного удельного сопротивления  $\rho_k$ ; 15 – отражающие горизонты в сейсморазведке; 16 – горизонт карбонатных пород метегерской и ичерской свит повышенной трещиноватости и водонасыщенности; 17 – высокоминерализованные пластовые воды.  $\sigma$  – плотность пород, г/см<sup>3</sup>;  $V_p$  – скорость распространения упругих колебаний, км/с;  $\kappa$  – магнитная восприимчивость,  $\times 10^{-5}$  СИ;  $\rho_k$  – кажущееся удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  $\eta_k$  – поляризуемость, %.



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, $J_n$	Отношение $Q = J_n/J_i$	Суммарная намагничённость, $\cdot 10^{-2}$ 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	—

# Обобщенная физико-геологическая модель для Архангельской алмазоносной провинции [Кутинов, Чистова, 2001]





**Конец главы 2**