



МАГНИТОРАЗВЕДКА

Глава 2

«Магнитные свойства горных пород и руд»

Ver 1.3.

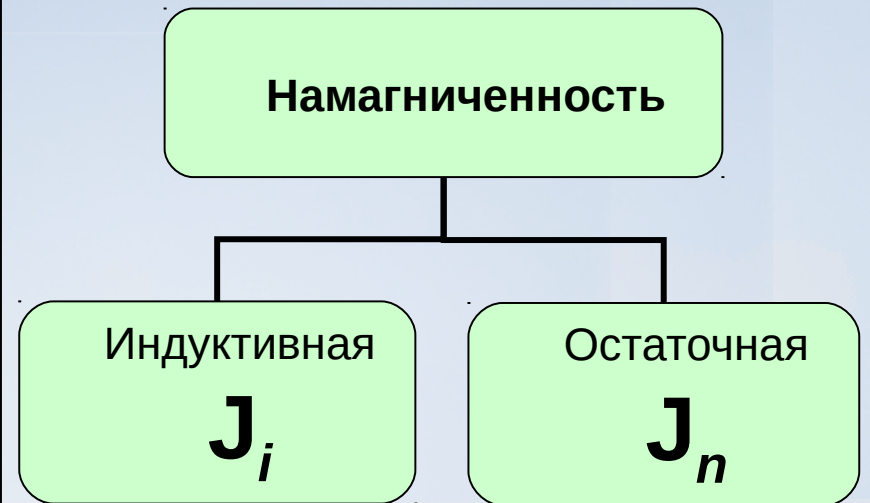
НОВИКОВ К.В. 2011 – 2017 гг.

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 ⁻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	4π·10 ⁻⁷ Гн/м = 1 СГС
Магнитная восприимчивость	χ	ед. СИ	ед. СГС	1 ед.СИ = 4π ед. СГС

Связь индукции магнитного поля и свойств среды

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

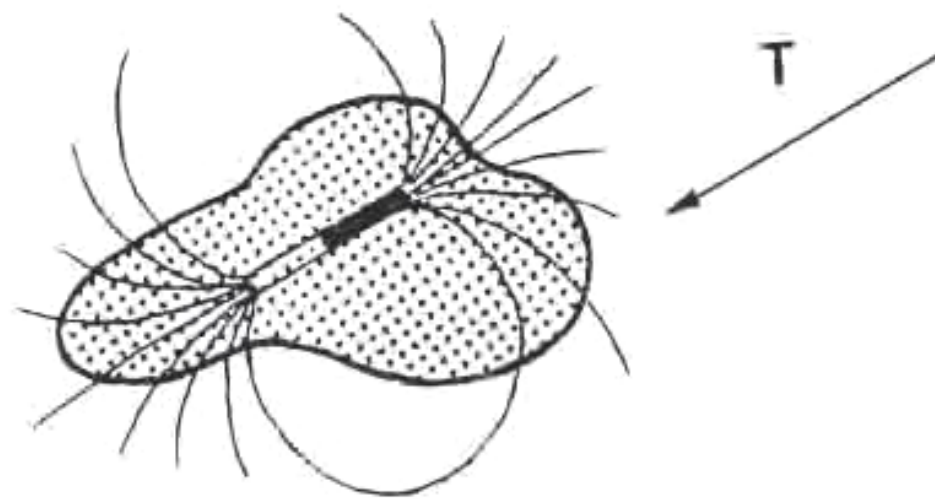


$$\mu = (1 + \chi)$$

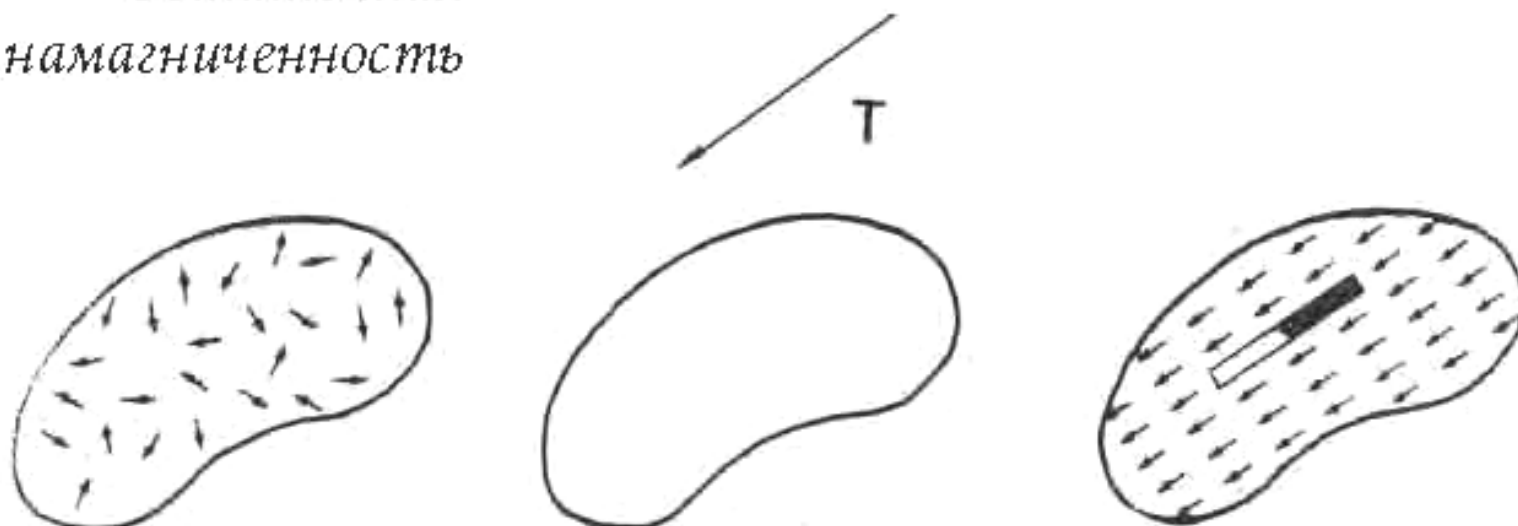
$$\mathbf{J}^{\text{инд}} = \chi \mathbf{H}$$

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

*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

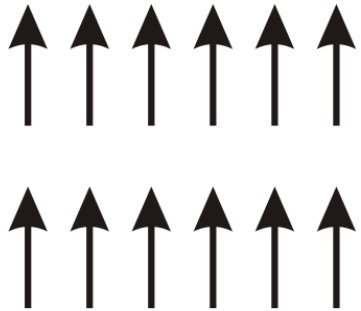
Ферромагнетизм

Ферримагнетизм

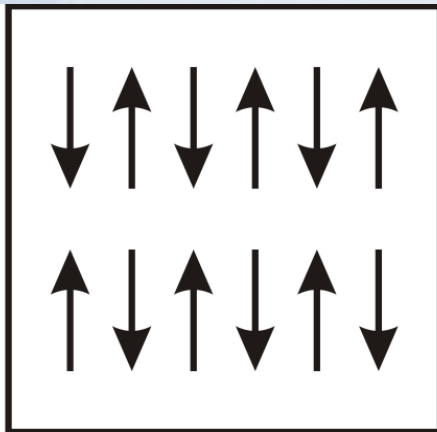
Антиферромагнетизм

2.1.1 Ферромагнетизм

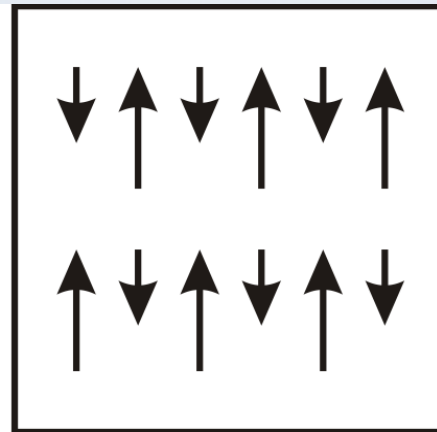
Вещества с параллельным расположением спиновых магнитных моментов называются **ферромагнетиками**, если же магнитные моменты направлены в разные стороны, то такие вещества называются **антиферромагнетиками**. Существуют также разновидности антиферромагнетизма – **ферримагнетизм** и, так называемый, **слабый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



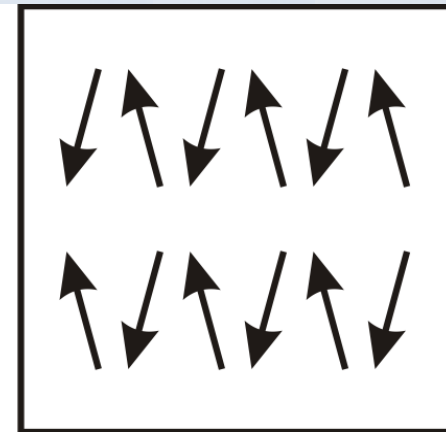
а



б



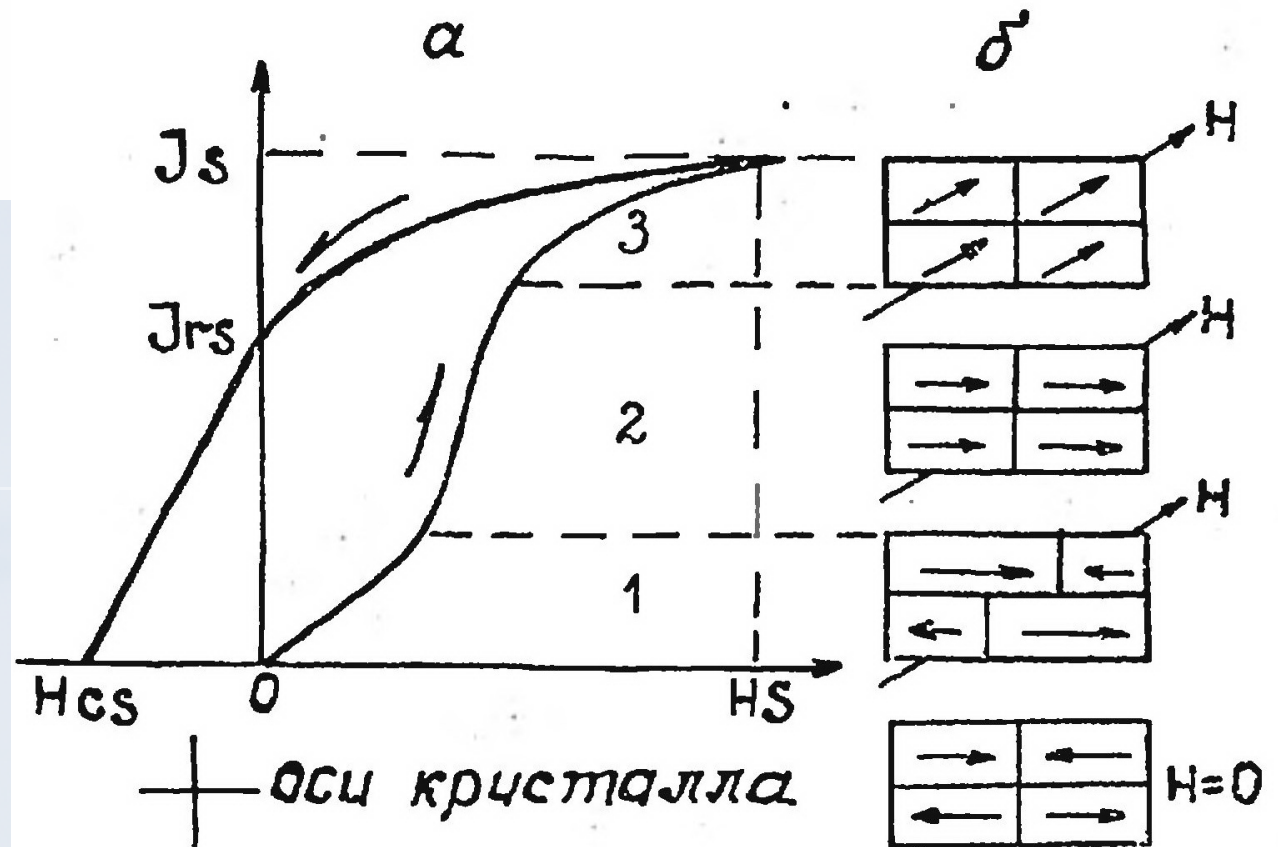
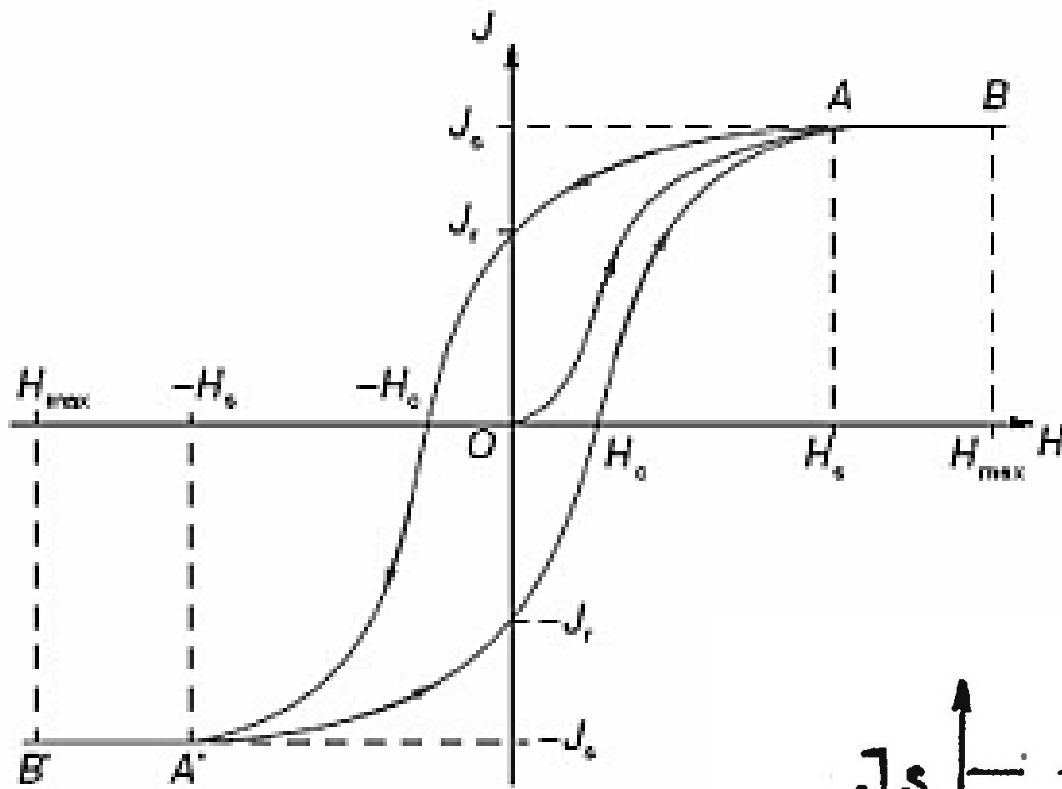
в



г

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

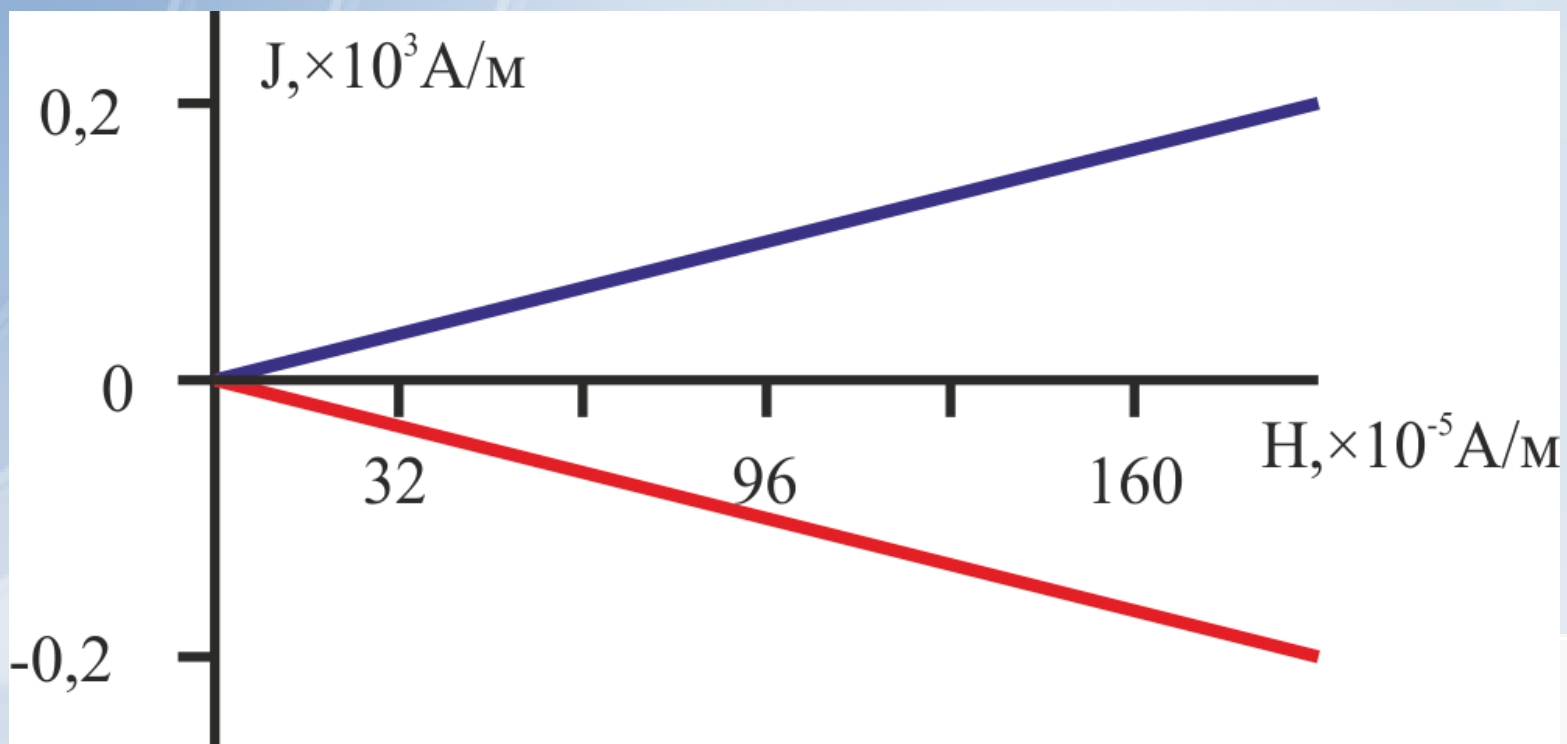
Намагничивание ферромагнетиков (гистерезис)



Магнитные свойства ферромагнитных минералов

Минерал	Формула	χ , ед.СИ
Магнетит	FeFe_2O_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	MgFe_2O_4	10
Гематит	Fe_2O_3	$(1,3\text{--}13) \cdot 10^{-3}$
Пирротин	$\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$	0,13–1,3
Якобсит	MnFe_2O_4	250
Треволит	NiFe_2O_4	6,3
Гетит	αFeOOH	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Сидерит	FeCO_3	$(2,7\text{--}7,5) \cdot 10^{-3}$

2.1.2. Диамagnetизм и парамагнетизм



Графики намагничивания парамагнетиков и диамagnetиков [Добрынин, 1991].

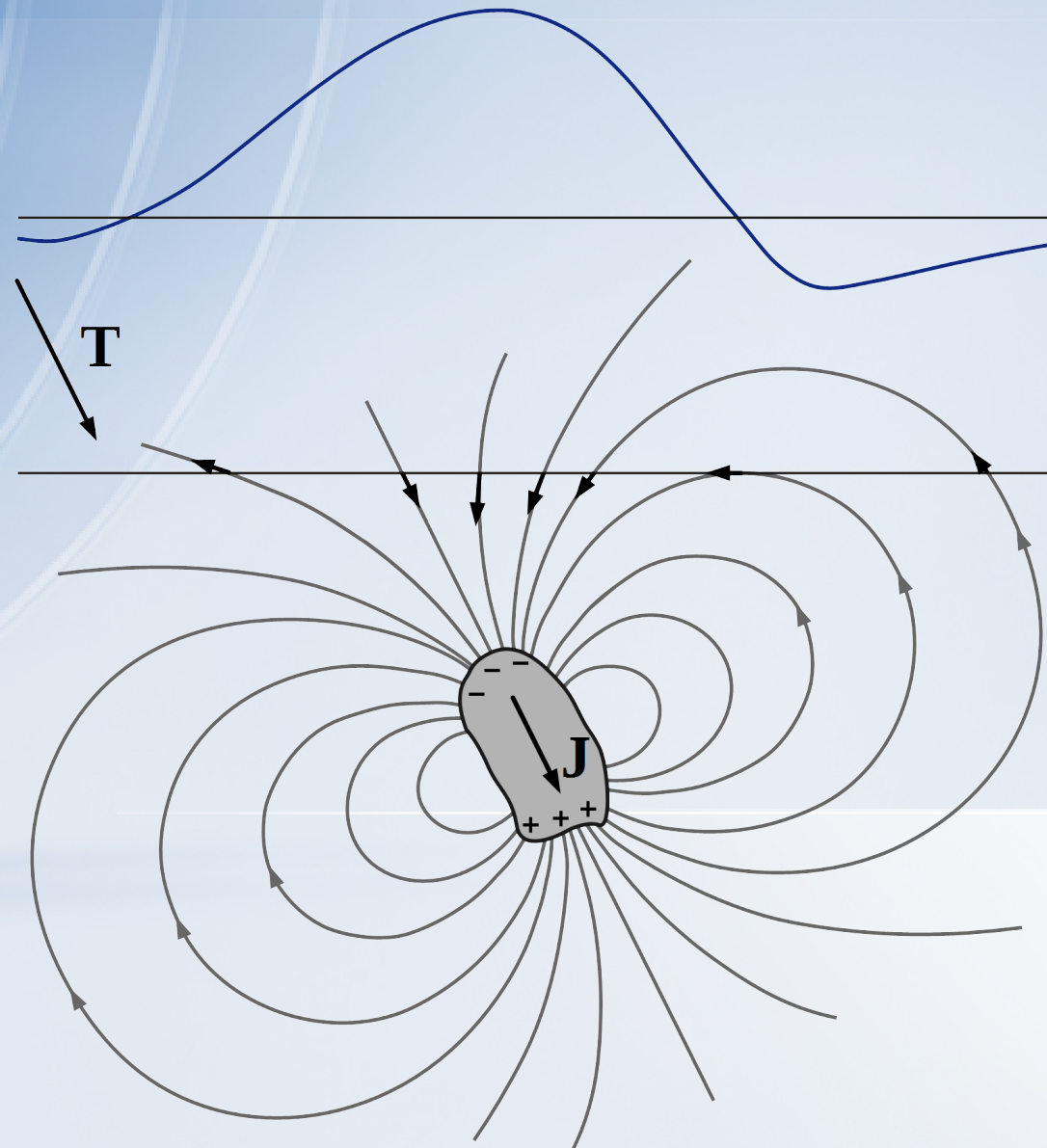
Магнитная восприимчивость парамагнитных минералов [по Дортман, 1982]

Минерал	Формула	χ , $\cdot 10^{-5}$ 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	Al_2O_3	1,8
Рутил	TiO_2	10,6
Шпинель	MgAl_2O_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	χ , $\cdot 10^{-5}$ ед.СИ
Кварц	SiO_2	-1,6
Ортоклаз	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	-0,6
Циркон	$\text{Zr}[\text{SiO}_4]$	-1,2
Галенит	PbS	-3,3
Касситерит	SnO_2	-2,0
Ковелин	CuS	-1,2
Флюорит	CaF_2	-1,2
Барит	BaSO_4	-1,8
Сфалерит	ZnS	- 6,5
Апатит	$\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3$	- 10,3
Графит	C	-0,5

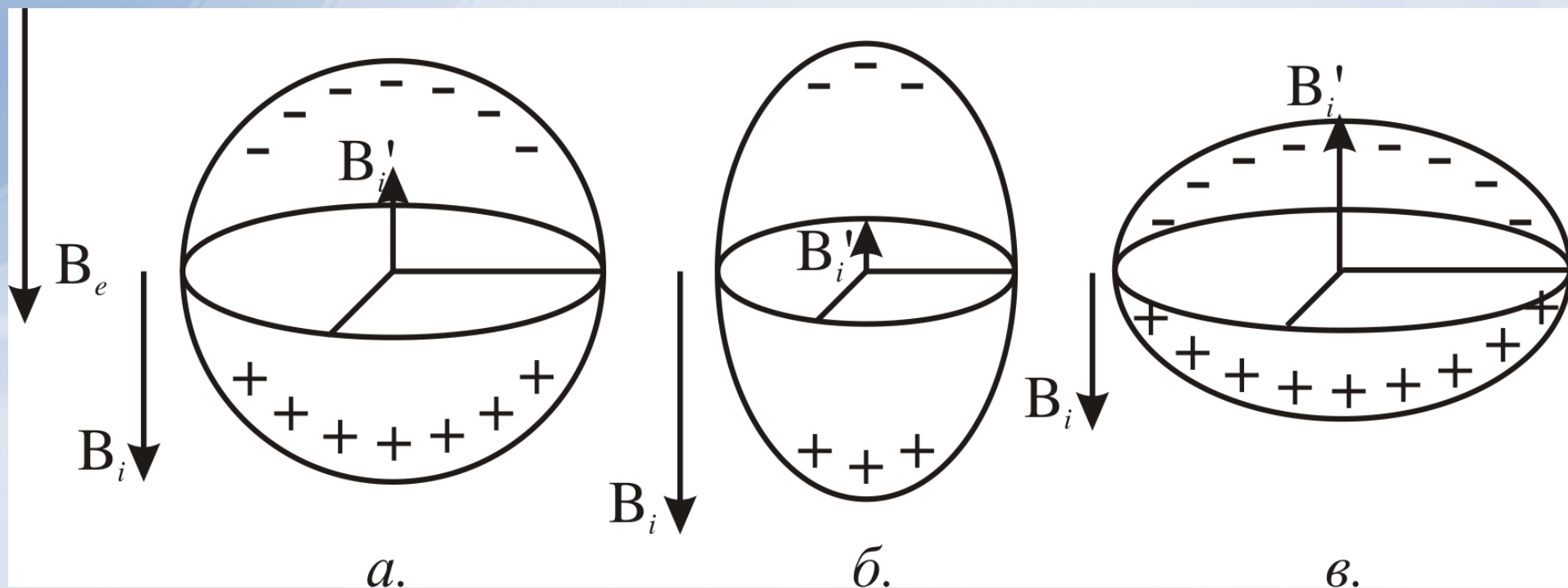
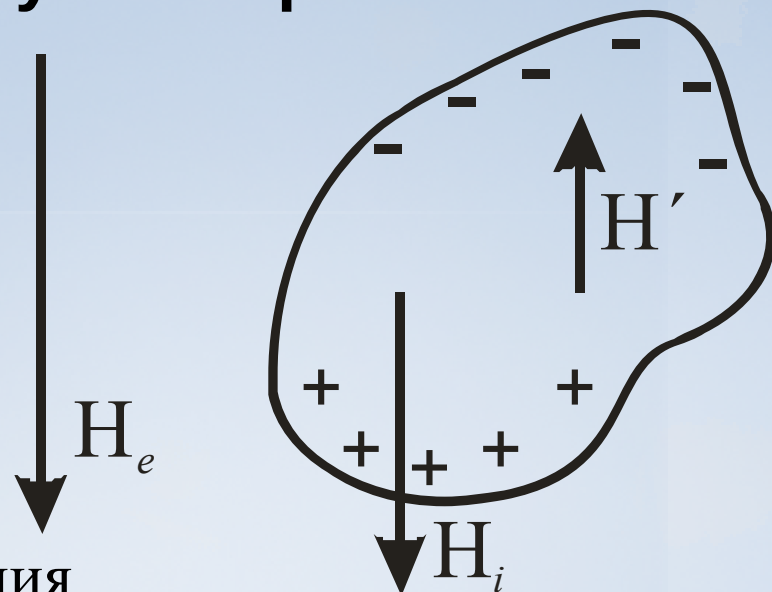
2.2. Индуктивная намагниченность



Намагниченность объекта с учетом размагничивания

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

где, N – коэффициент размагничивания



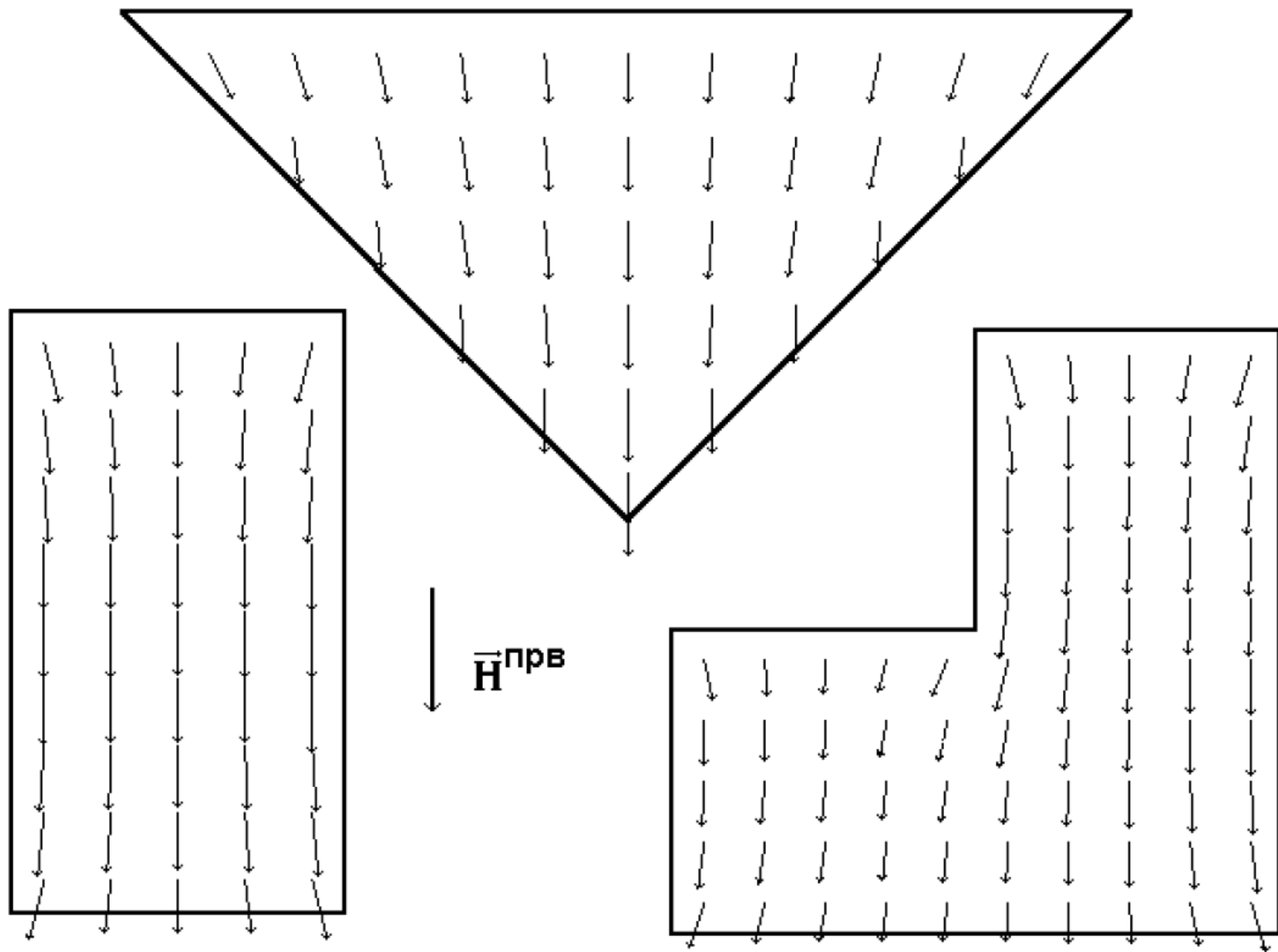


Рис. 4. Намагниченность однородных моделей с $\kappa=2$ СИ, полученная в однородном вертикальном поле под влиянием размагничивания [Блох, 1993]

Коэффициент размагничивания

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

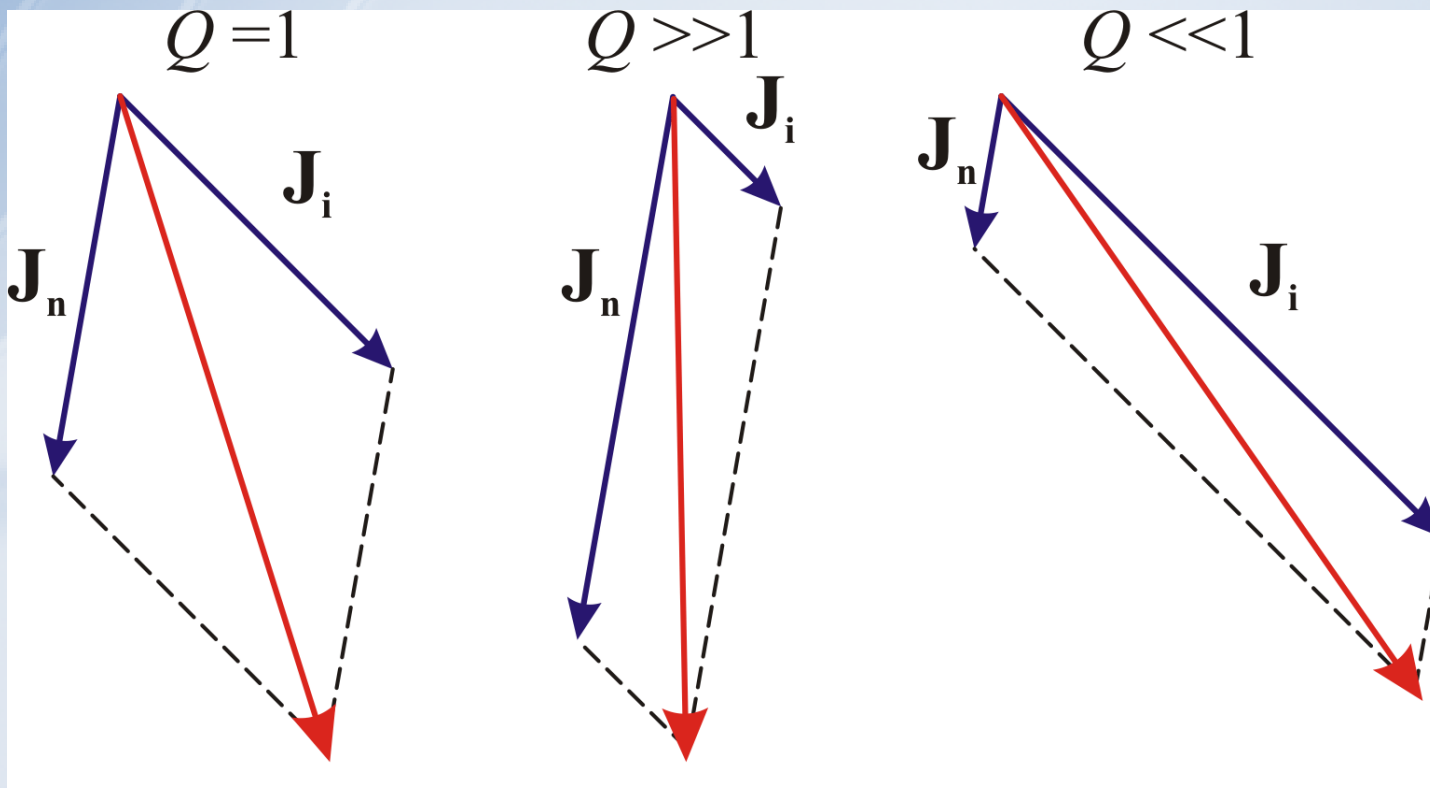
Коэфф. размагничивания N , ед. СИ	Форма тела
1	Бесконечно тонкая пластинка, намагничивающее поле перпендикулярно к ее плоскости (полюсные поверхности сближены на бесконечно малое расстояние).
1/2	Круговой цилиндр, намагничиваемый перпендикулярно к его образующей.
1/3	Шар.
$a/(a + b)$	Эллиптический цилиндр, 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

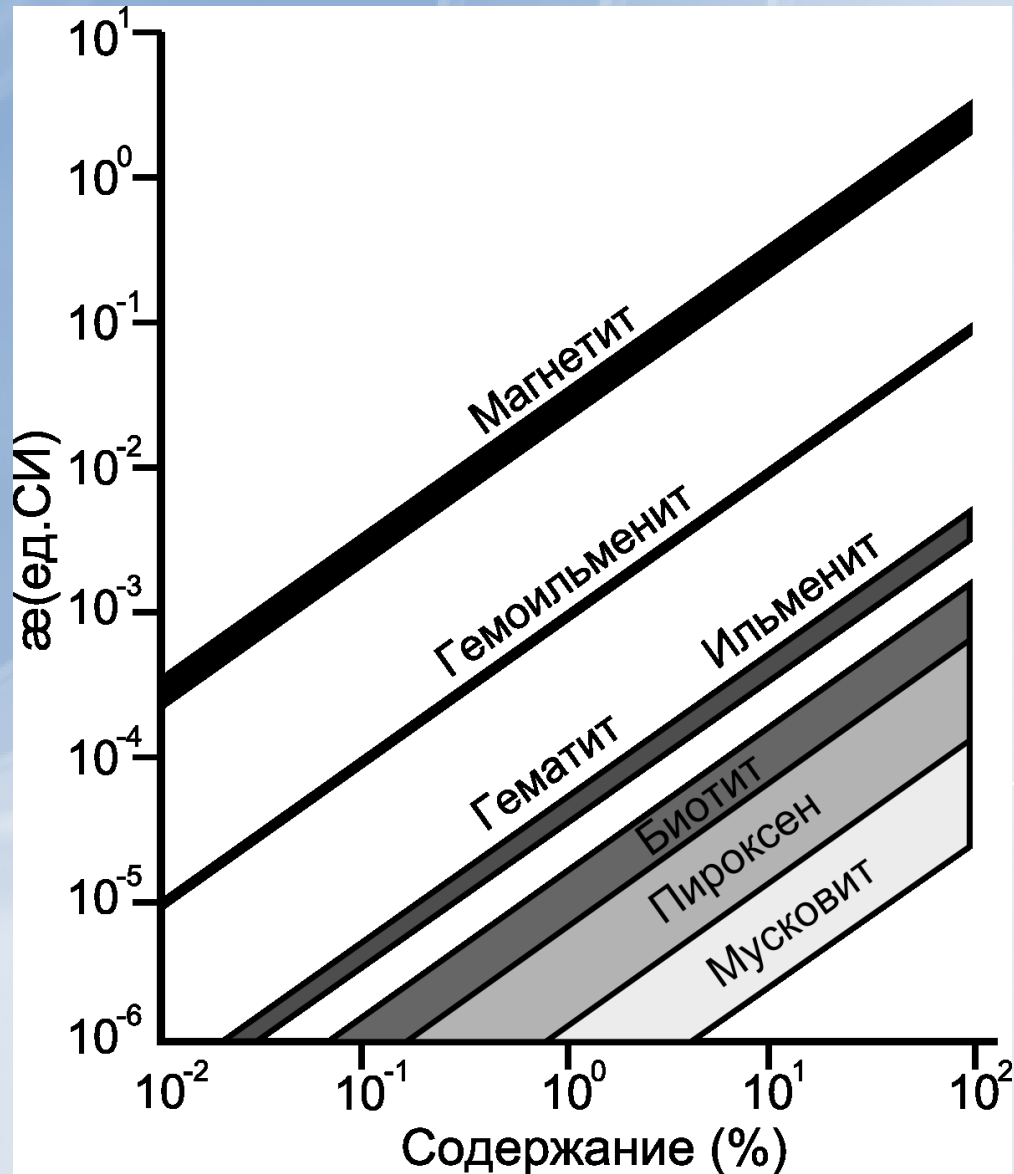


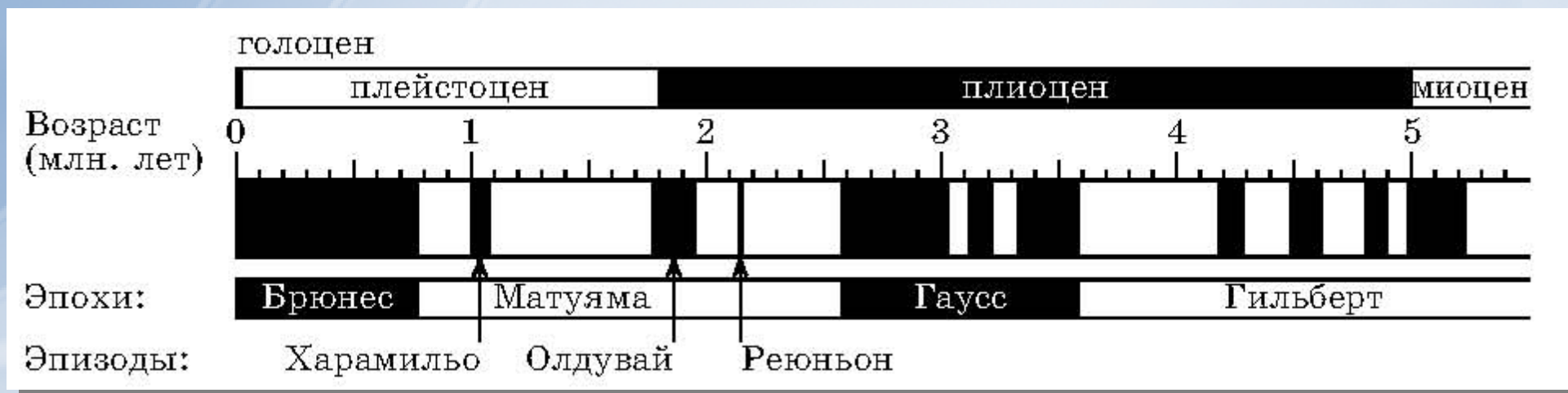
Диаграмма зависимости магнитной восприимчивости горных пород от концентрации ферромагнитных минералов.

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

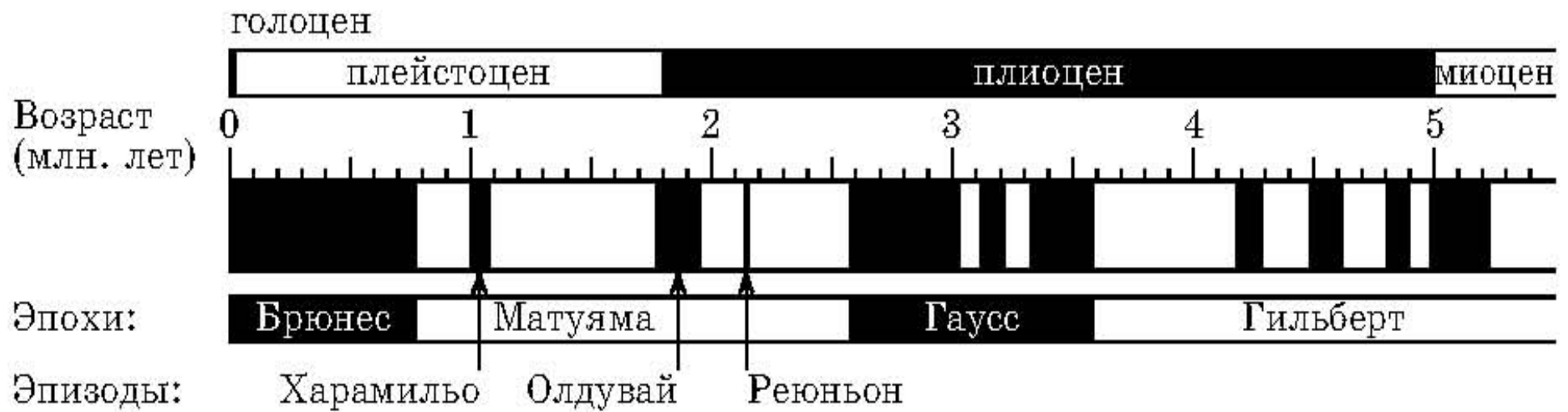
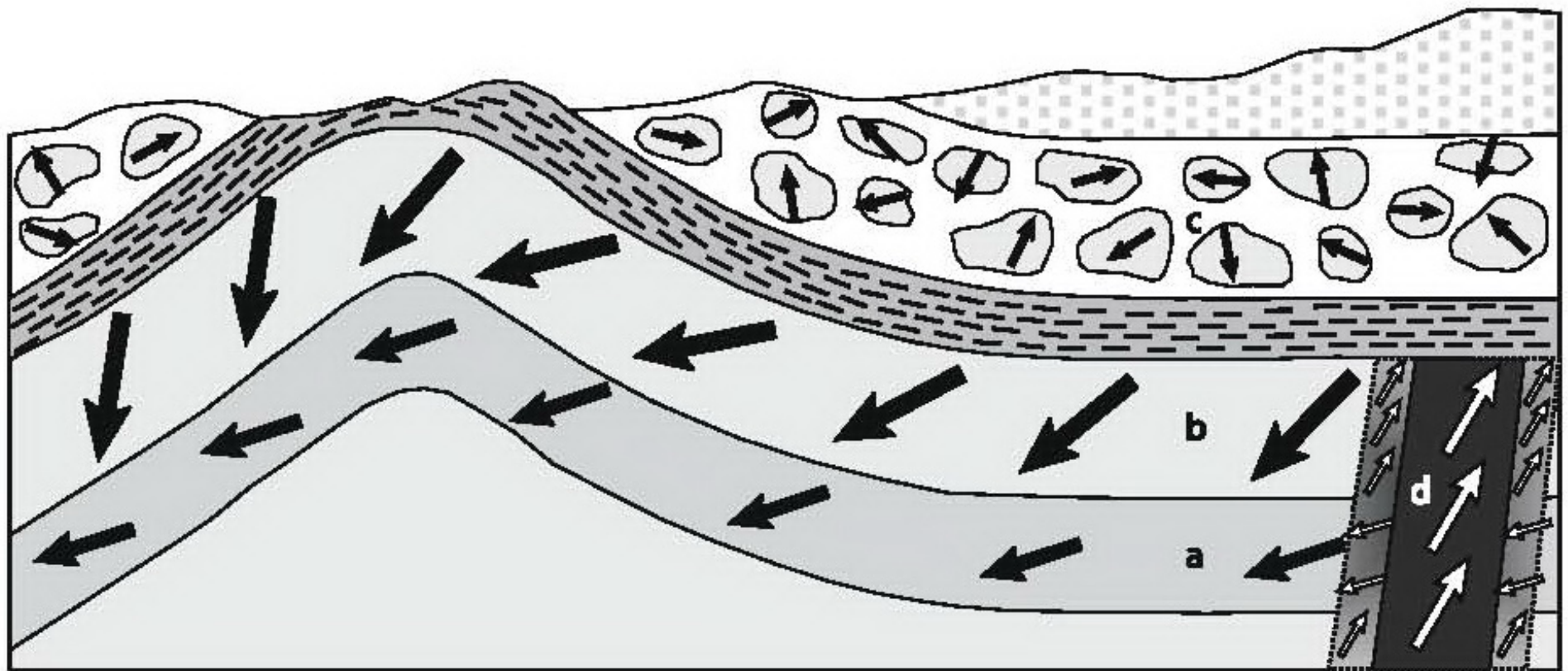
	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10	100
Железо									железо
Окиси железа			гематит		шлак		магнетит		
Вулканические породы				базальт					
			керамика						
			гранит						
			горелая почва						
			габбро						
			диорит						
Метаморфические породы			кварцит						
		песчаник							
			почва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

[Смекалова и др, 2007]

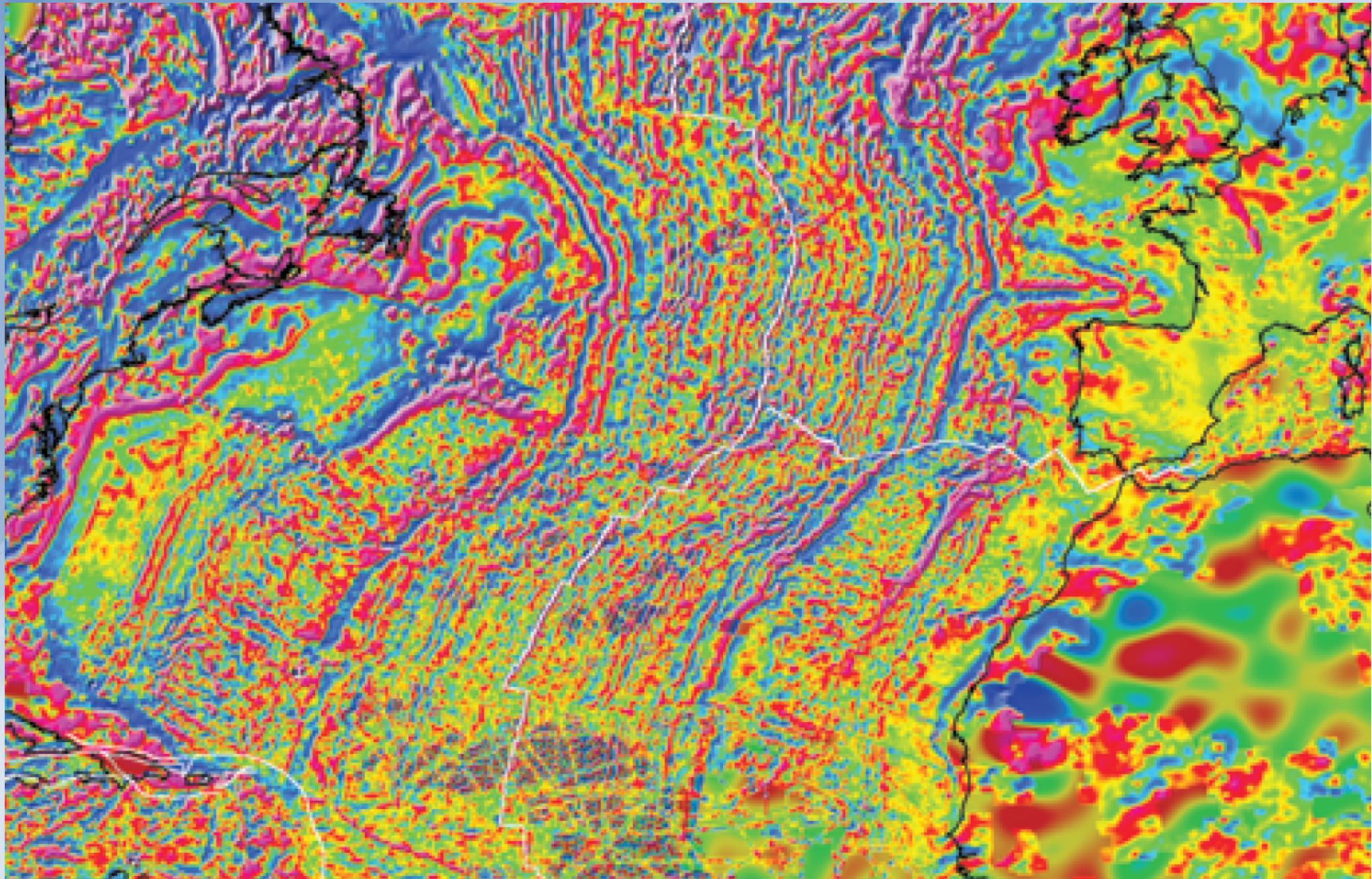
2.5. Палеомагнетизм.



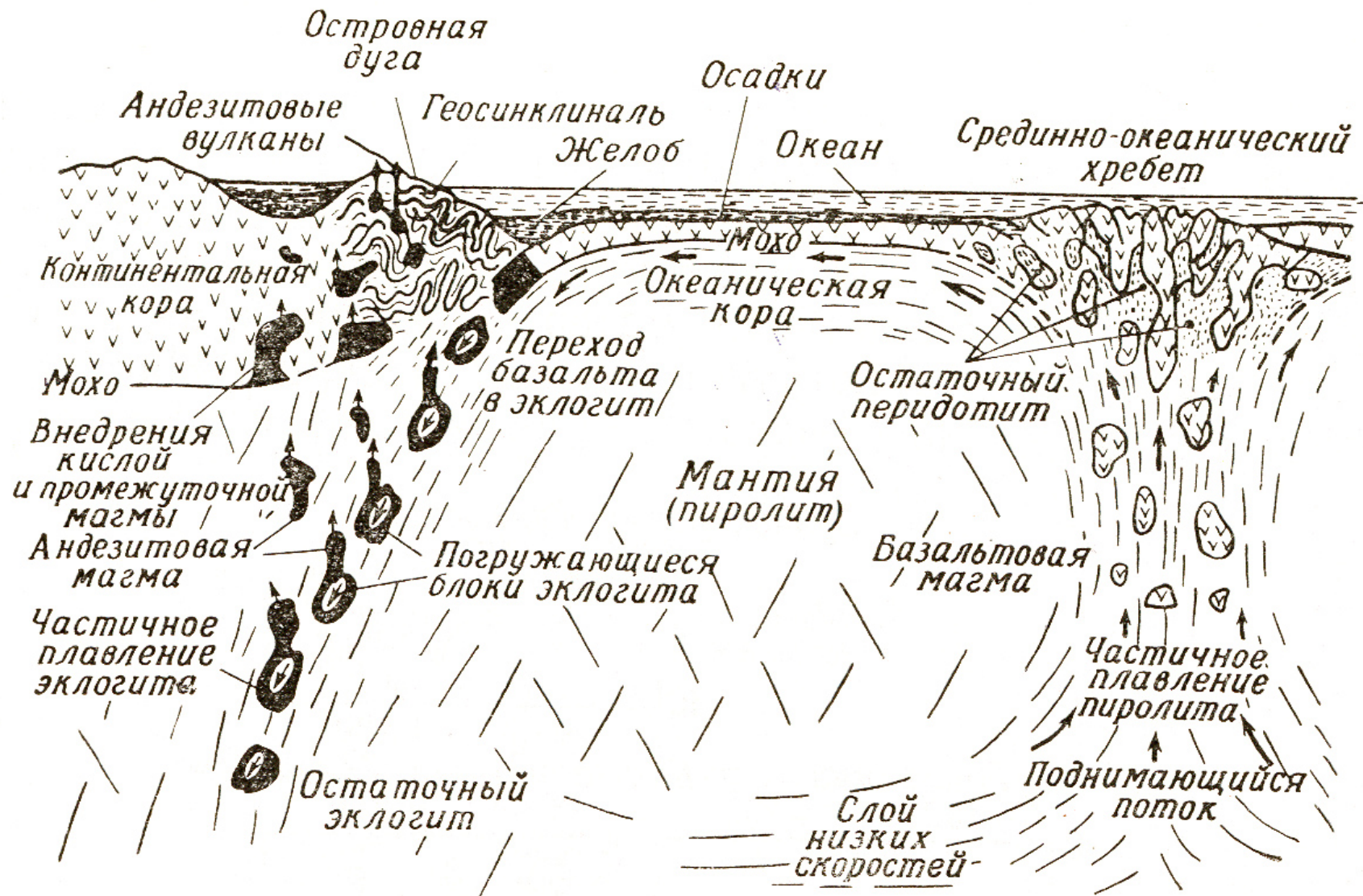
Палеомагнетизим и магнитостратиграфия

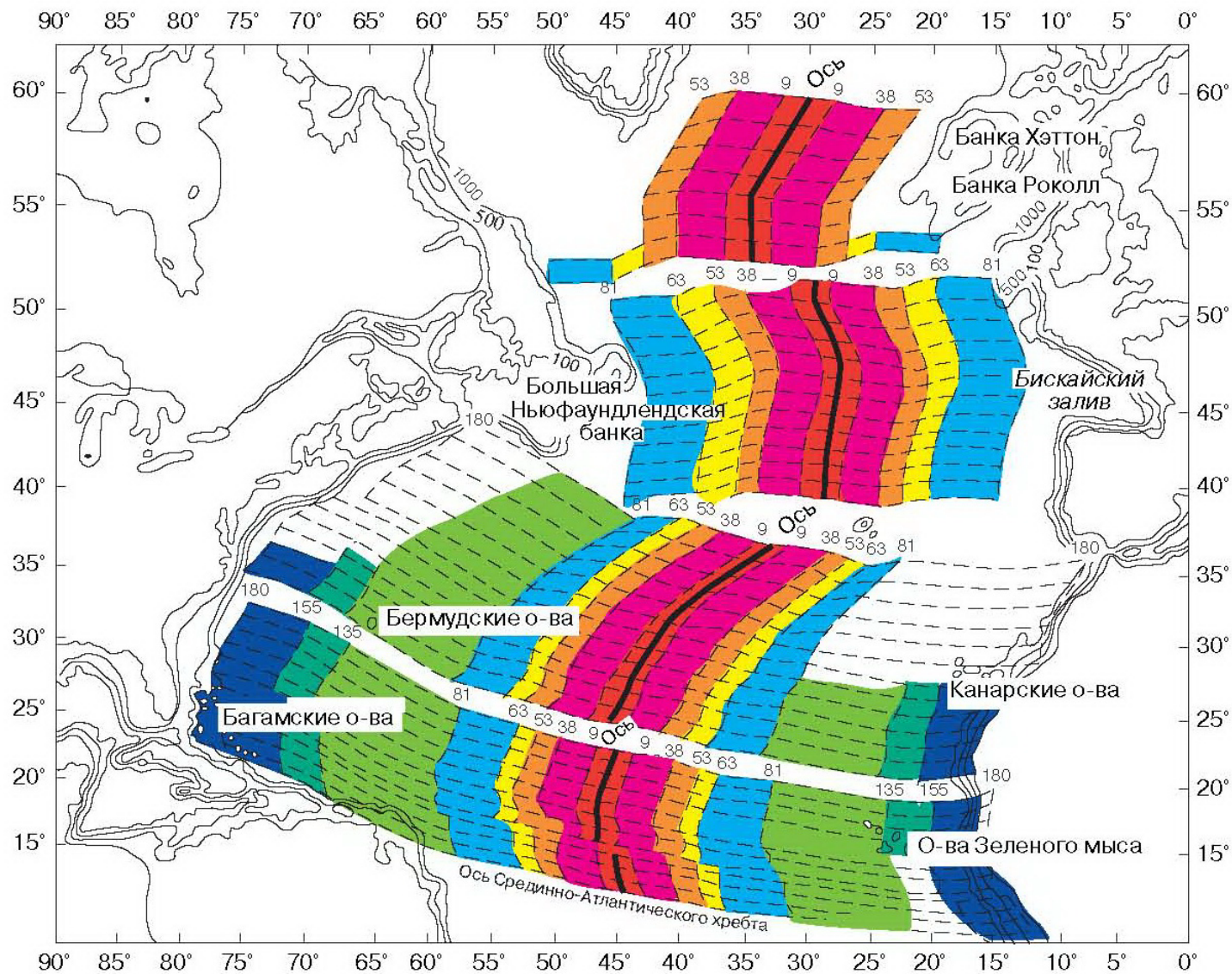


**Полосовые аномалии в Атлантическом океане.
World Digital Magnetic Anomaly Map.**



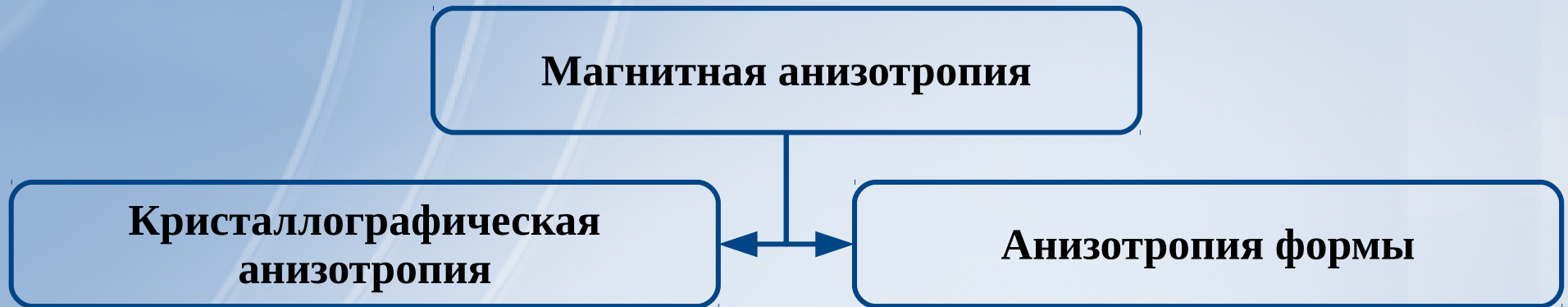
Полосовые аномалии возникают в зонах спрединга при образовании молодой коры





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



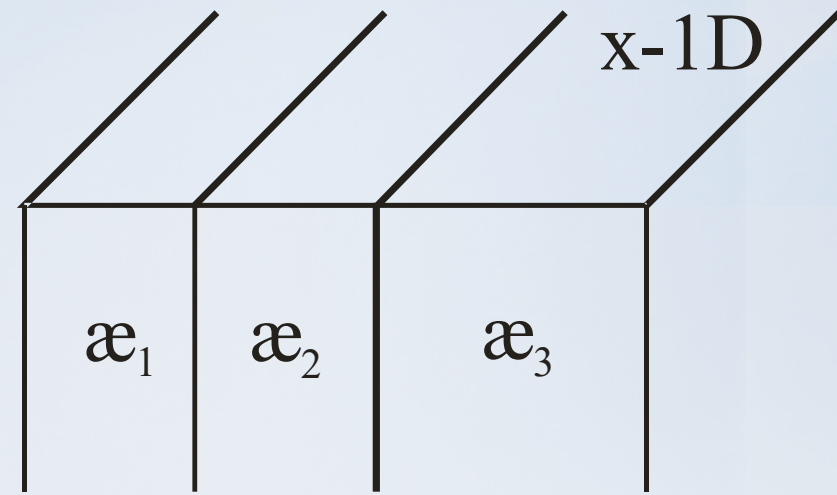
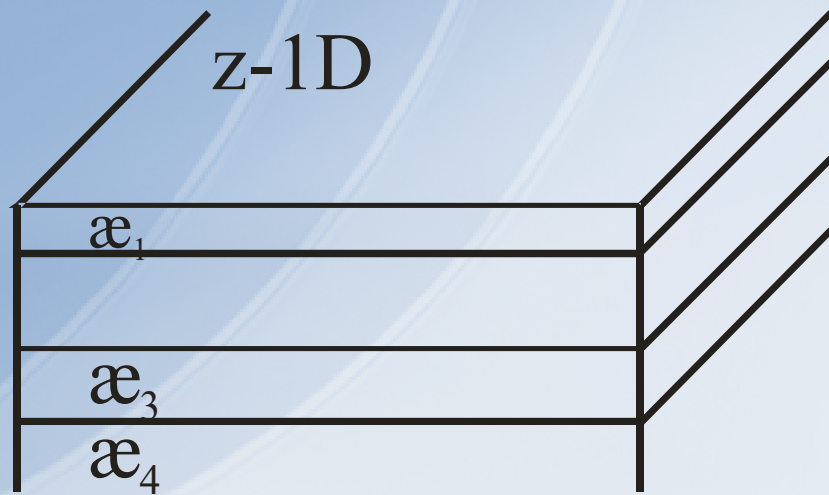
Анизотропия магнитной восприимчивости оценивается по формуле:

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

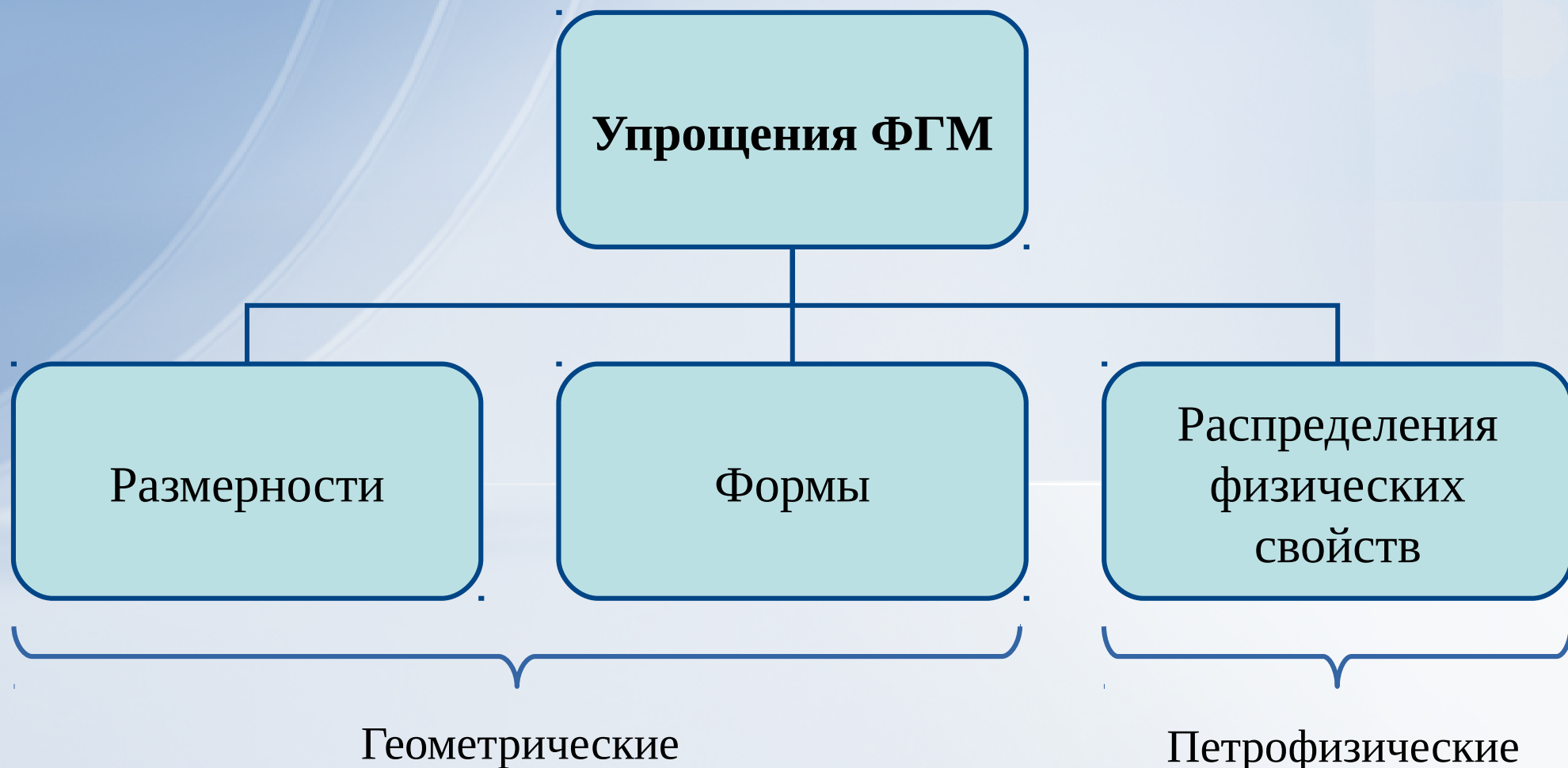
$$\lambda_{\text{a}} = \frac{1 - A_{\text{a}}}{1 + A_{\text{a}}}$$

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

2.7. Физикогеологические модели (ФГМ)



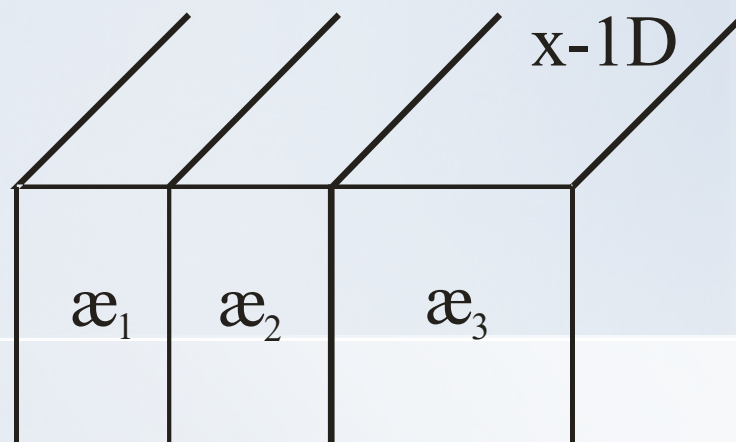
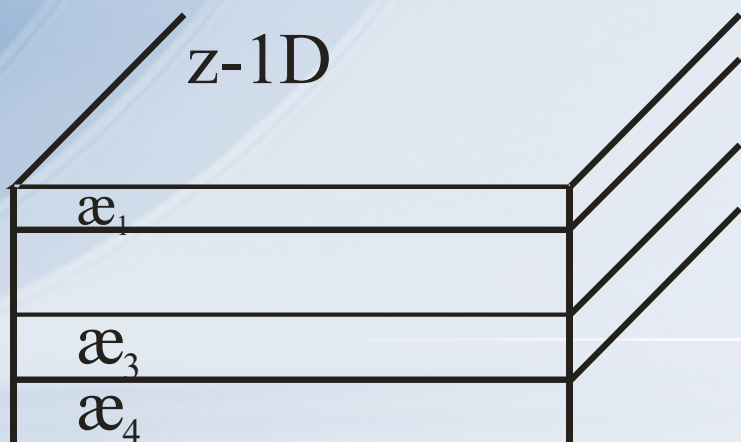
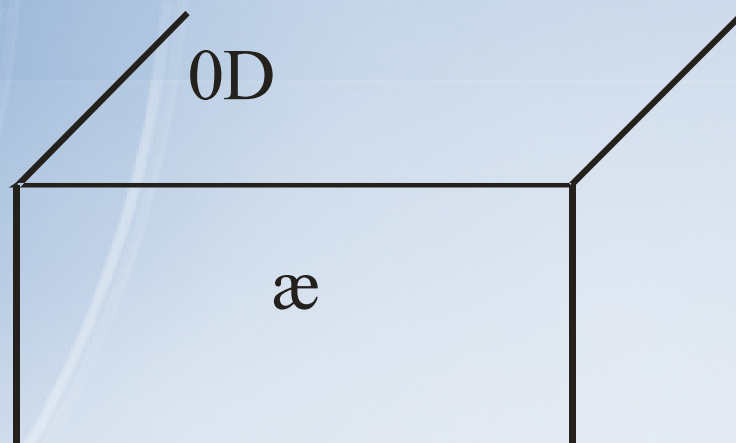
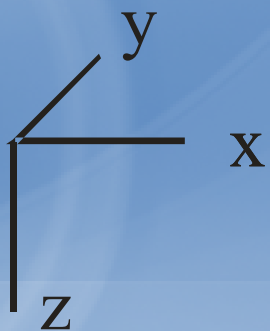
Физико-геологическая модель (ФГМ) – это совокупность упрощений геометрических и петрофизических свойств геологического разреза.



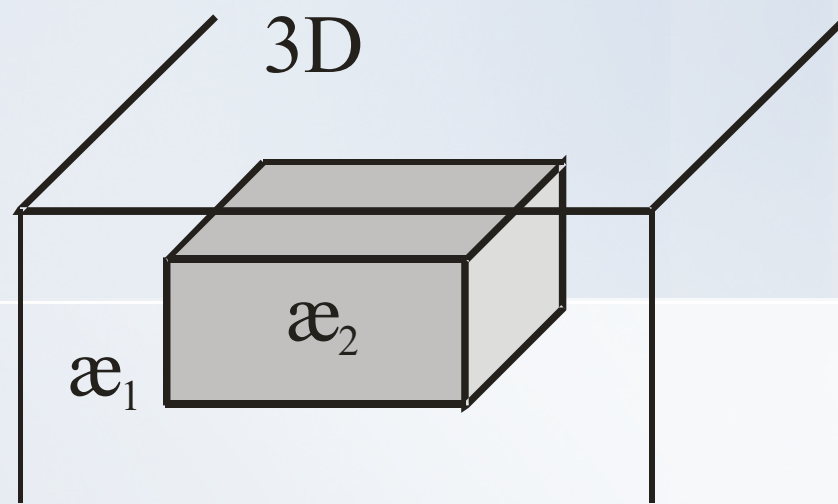
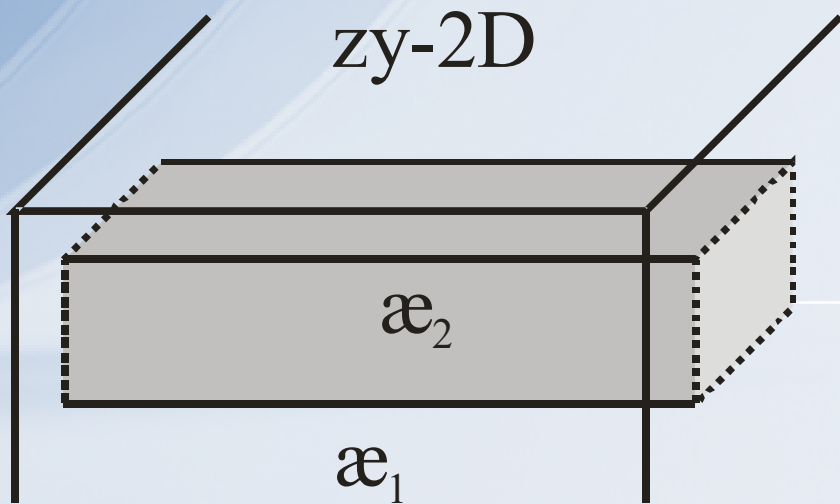
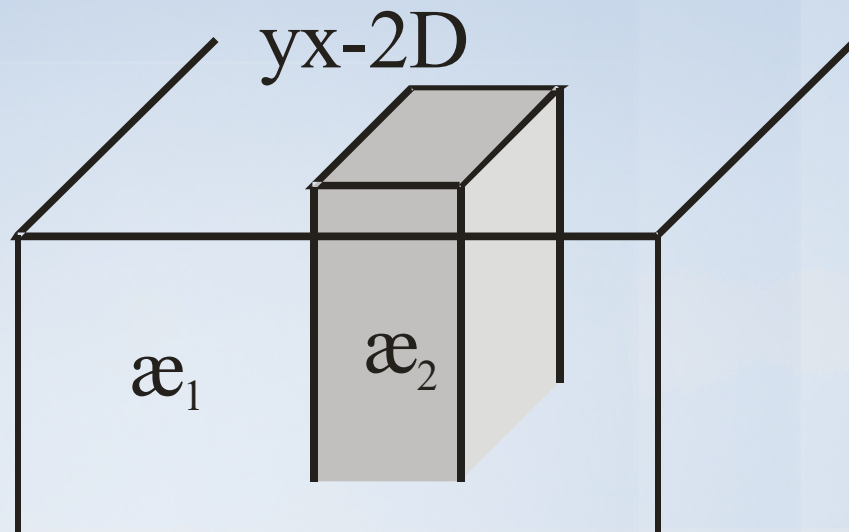
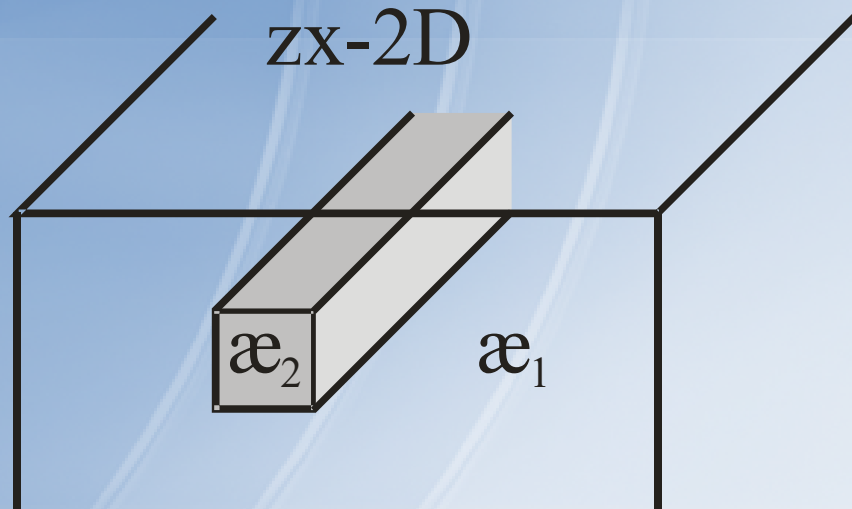
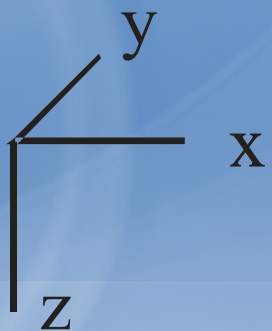
Упрощения размерности моделей [по Блох, 2009 и Roy, 2007]

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 ³ / ₄ D		
3D	По трем направлениям	Любые трехмерные объекты.
4D (3Dt)	По трем направлениям и во времени.	Учитывают изменение источников во времени.

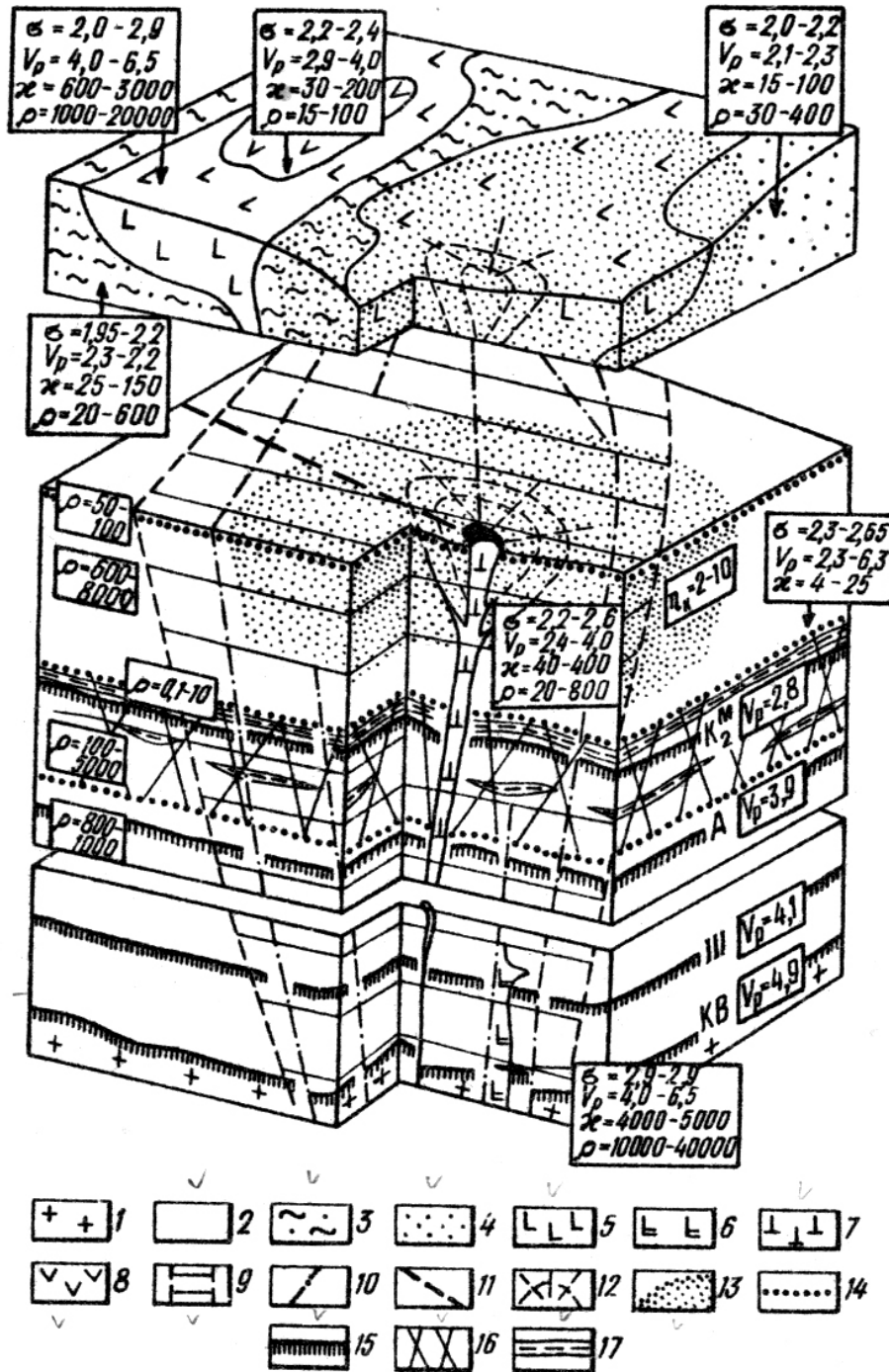
0D и 1D модели



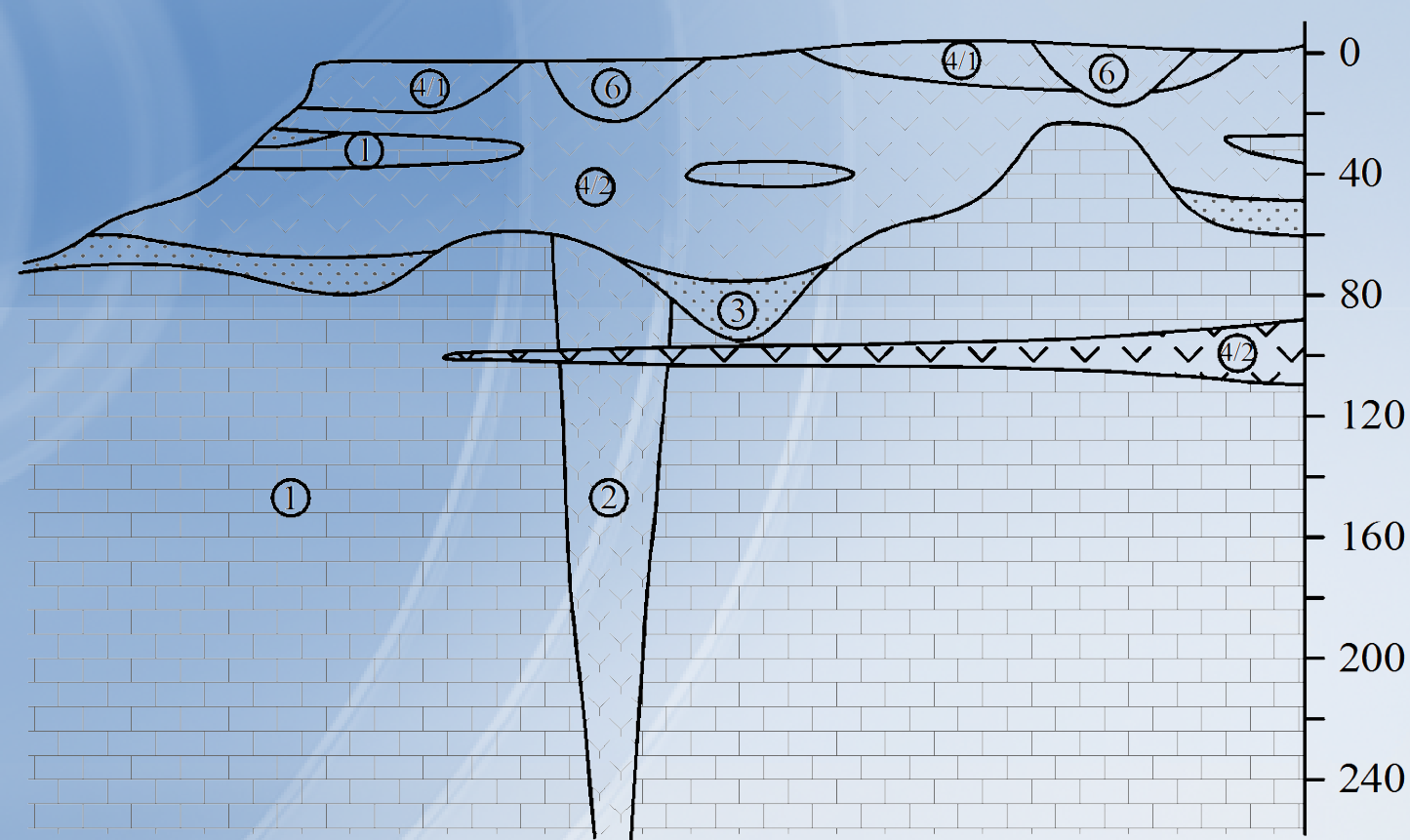
2D и 3D модели



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



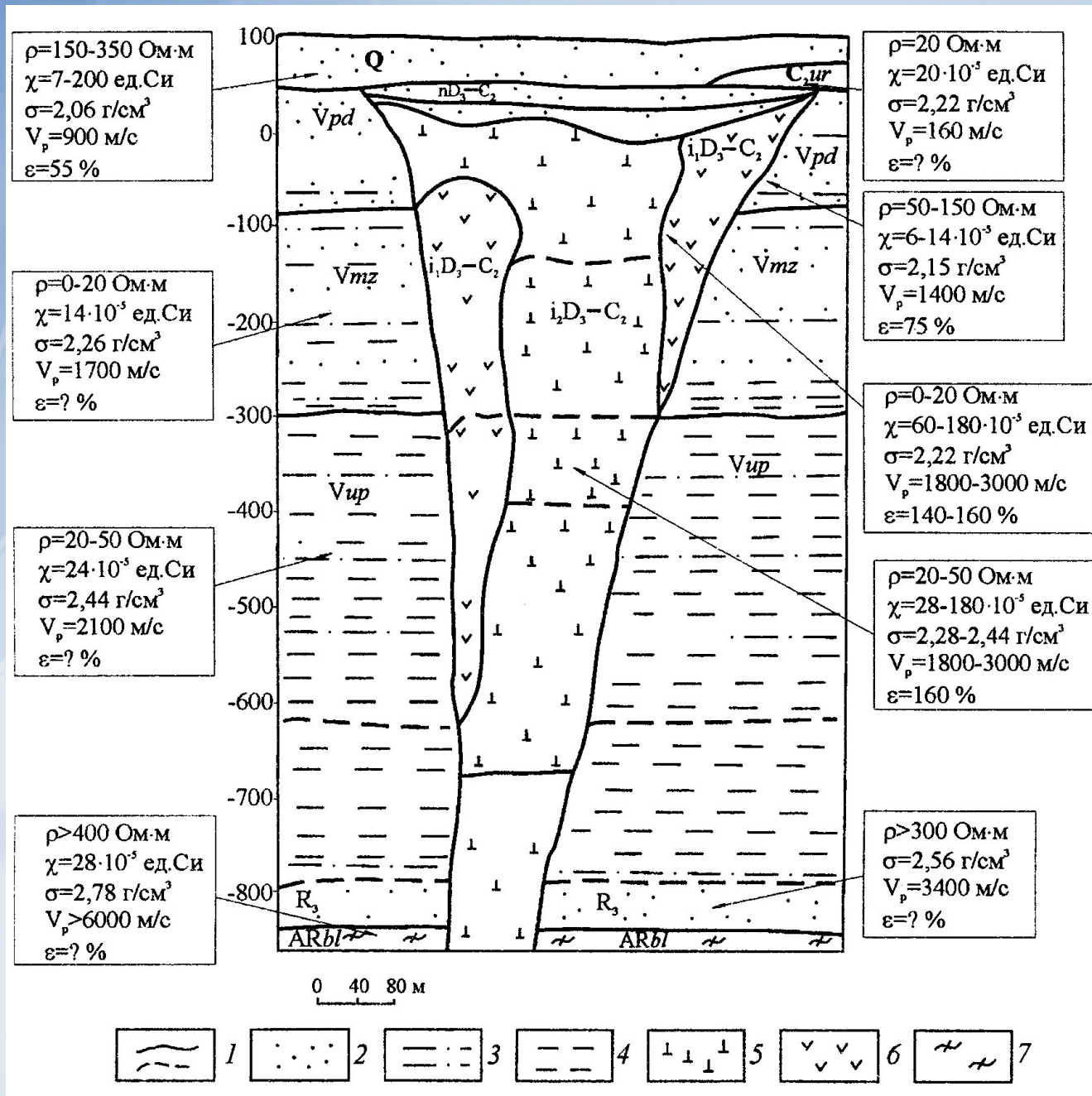
1 – докембрийский кристаллический фундамент; 2 – палеозойская карбонатная толща; 3 – юрские терригенные отложения; 4 – терригенные отложения пермо-карбона; 5 – траппы среднепалеозойские; 6 – траппы пермо-триаса; 7 – кимберлиты; 8 – туфогенные образования пермо-триаса; 9 – зона регионального разлома; 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 η_k (ореолов ВП); 14 – границы слоев различного удельного сопротивления ρ_k ; 15 – отражающие горизонты в сейсморазведке; 16 – горизонт карбонатных пород метегерской и ичерской свит повышенной трещиноватости и водонасыщенности; 17 – высокоминерализованные пластовые воды. σ – плотность пород, г/см³; V_p – скорость распространения упругих колебаний, км/с; κ – магнитная восприимчивость, $\times 10^{-5}$ СИ; ρ_k – кажущееся удельное электрическое сопротивление, Ом·м; η_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 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	—

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





Конец главы 2