



МАГНИТОРАЗВЕДКА

Глава 2

«Магнитные свойства горных пород и руд»

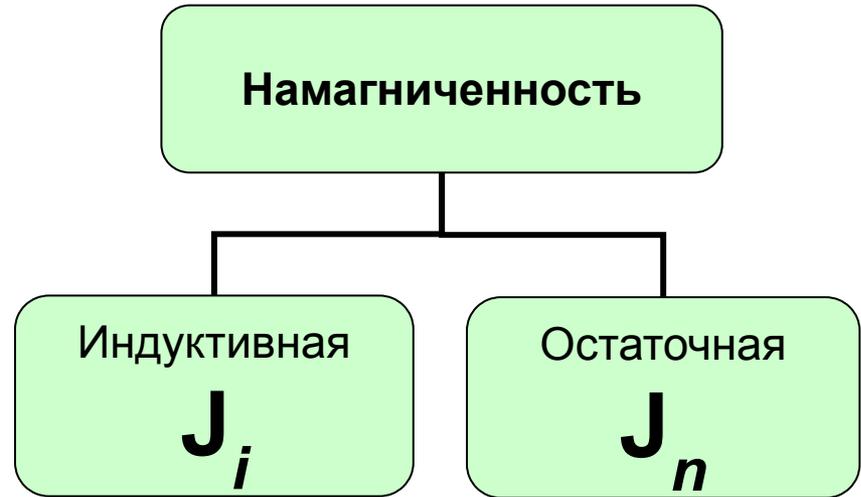
Ver 1.3.
Абрамов В.Ю., Новиков К.В.
2011 – 2021 гг.

Величины и единицы

Величина	Обозн.	Размерность СИ	Размерность СГС	Связь СГС и СИ
1	2	3	4	5
Намагниченность		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	$\mu(\mu_{\text{отн}})$	Безразмерная	Безразмерная	-
Магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная)	μ_0	генри/метр (Гн/м)	ед. СГС	4 π ·10 ⁻⁷ Гн/м = 1 СГС
Магнитная восприимчивость	χ	ед. СИ	ед. СГС	1 ед.СИ = 4 π ед. СГС

Связь индукции магнитного поля и свойств среды

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



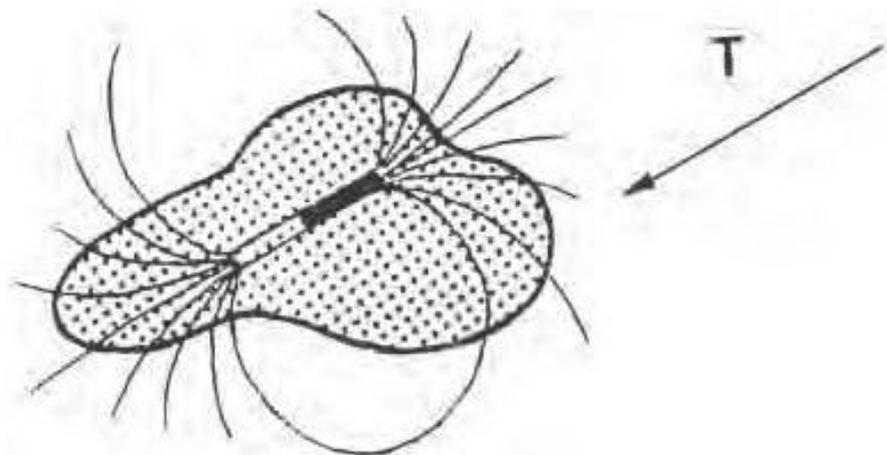
$$J_z = \frac{\chi Z}{\mu_0}$$

$$J = \frac{\chi T}{\mu_0}$$

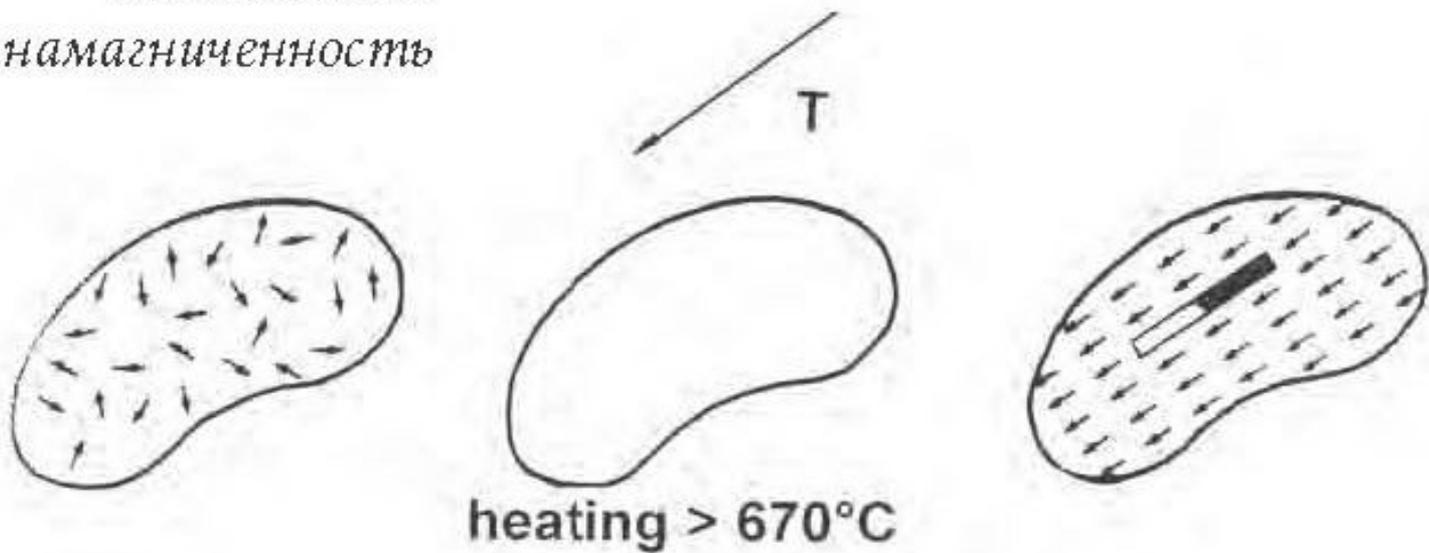
$$J = \frac{\chi T}{\mu_0}$$

$$J = \frac{\chi T}{\mu_0}$$

Индукцированная
намагниченность



Остаточная
намагниченность



2.1. Магнитные свойства вещества

Группы веществ по магнитным свойствам:

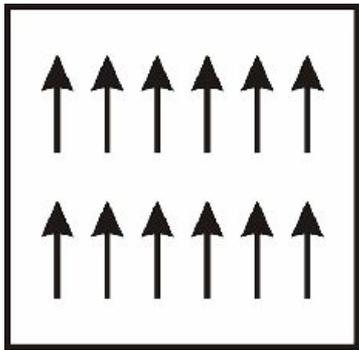
Диамагнетики *Парамагнетики* *Ферромагнетики*

Ферримагнетики

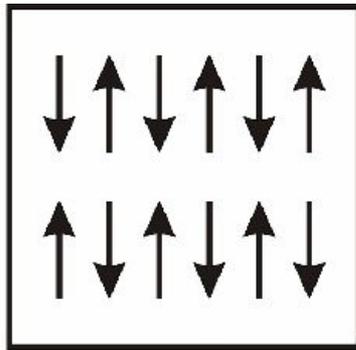
Антиферромагнетики

2.1.1 Ферромагнетизм

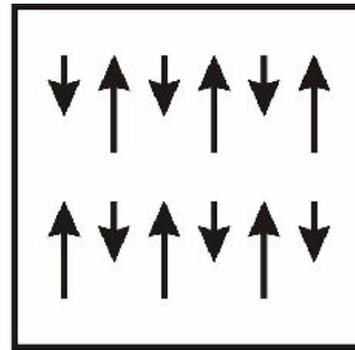
Вещества с параллельным расположением спиновых магнитных моментов называются **ферромагнетиками**, если же магнитные моменты направлены в разные стороны, то такие вещества называются **антиферромагнетиками**. Существуют также разновидности антиферромагнетизма – **ферримагнетизм** и, так называемый, **слабый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



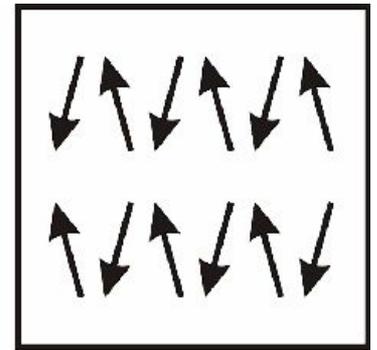
a



б



в

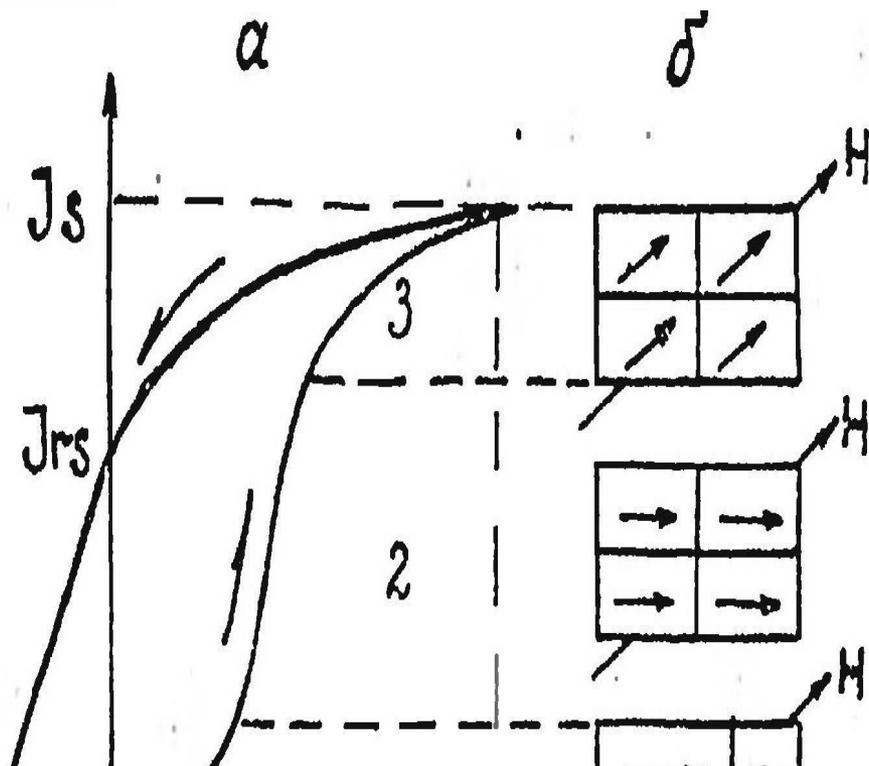
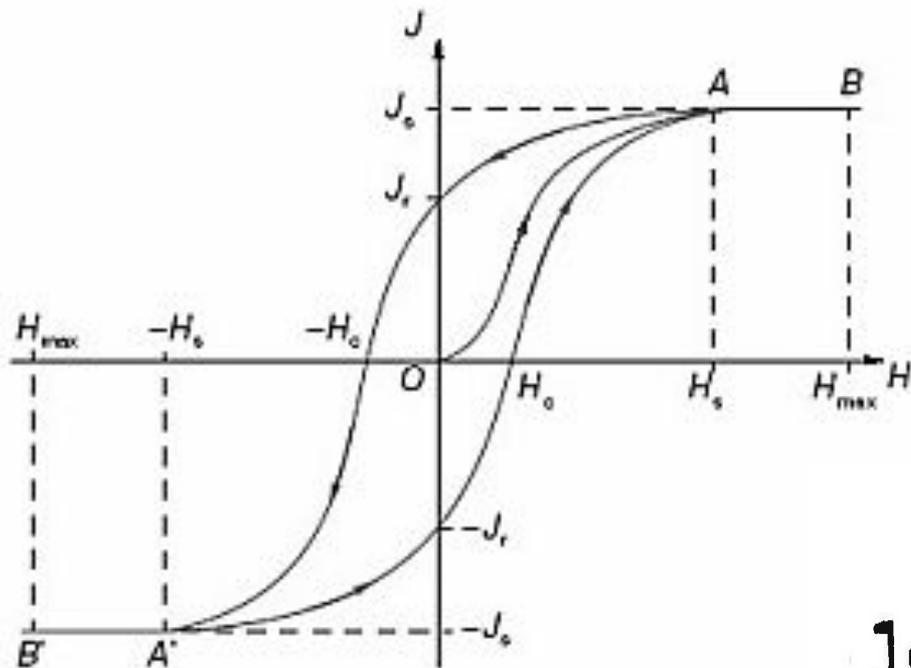


г

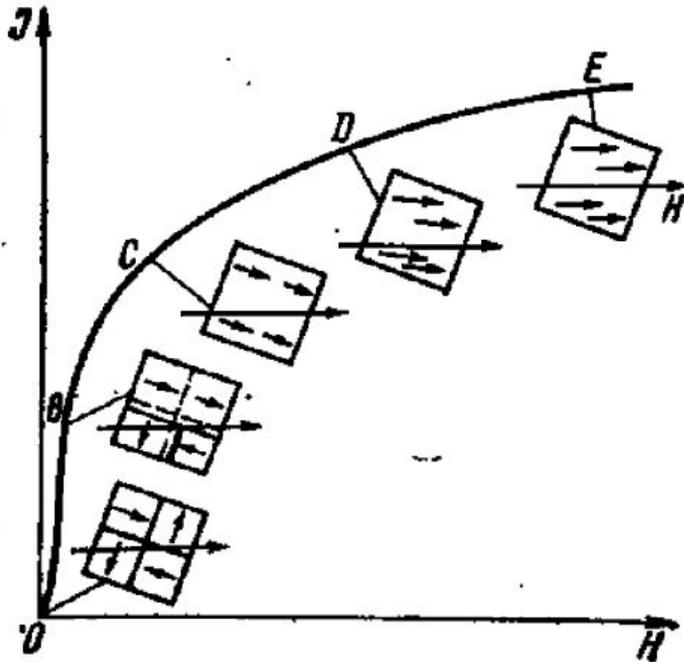
Классификация ферромагнитных веществ: а – ферромагнетики;

б – антиферромагнетики; в – ферримагнетики; г – слабые ферромагнетики.

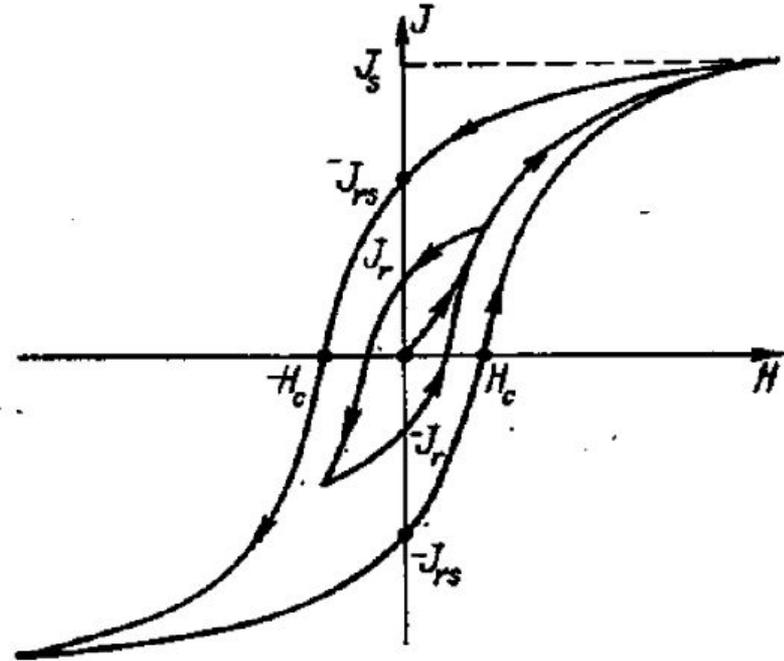
Намагничивание ферромагнетиков (гистерезис)



Процесс намагничивания



Процесс намагничивания ферромагнитного вещества согласно доменной теории.



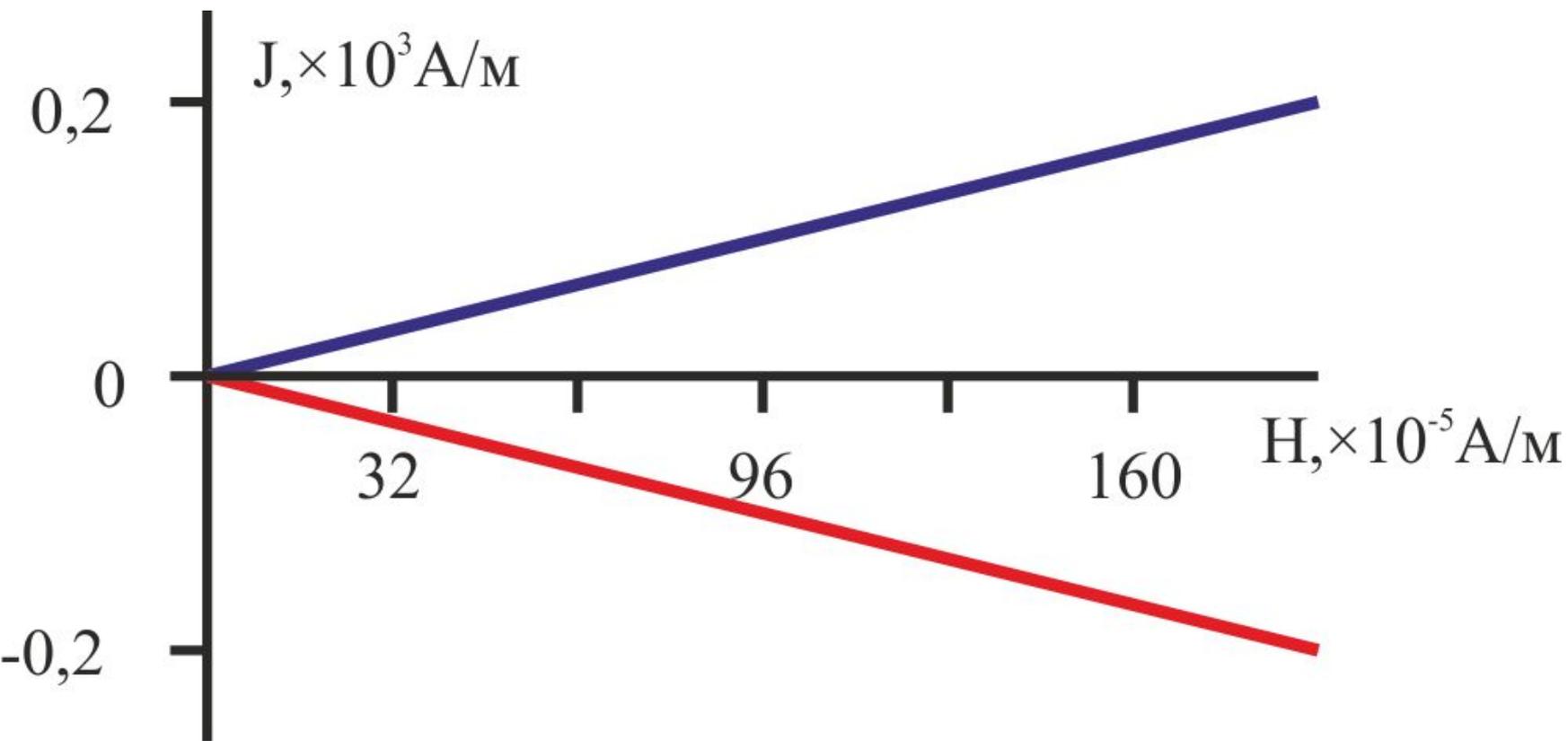
Магнитный гистерезис.

OB — область Релея; OC — смещение доменных границ; CE — вращение спонтанной намагниченности.

Магнитные свойства ферромагнитных минералов [по Вахромееву и др, 1997; Дортман и др., 1982]

Минерал	Формула	χ , ед.СИ
1	2	3
Магнетит	FeFe_2O_4	0,8–0,25
Титаномагнетит	$x\text{-FeFe}_2\text{O}_4(1-x)\text{TiFe}_2\text{O}_4$	0,4–0,2
Маггемит	$y\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0,38–0,25
Магнезиоферрит	MgFe_2O_4	0,10
Гематит	Fe_2O_3	$(1,3\text{--}13) \cdot 10^{-3}$
Пирротин	$\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$	$13\text{--}1,3 \cdot 10^{-3}$
Якобсит	MnFe_2O_4	$25 \cdot 10^{-3}$
Треволит	NiFe_2O_4	$6,3 \cdot 10^{-3}$
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 диамагнетиков [Добрынин, 1991].

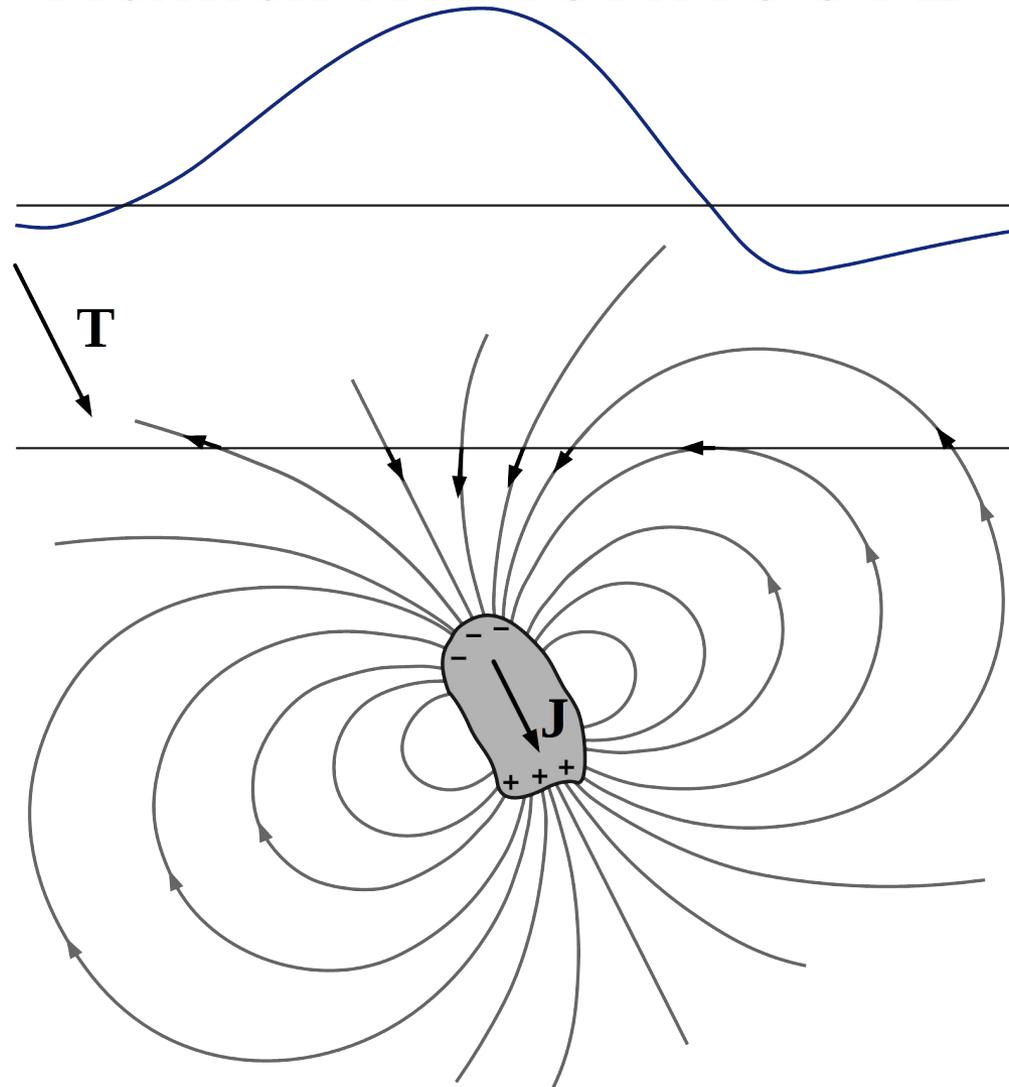
Магнитная восприимчивость парамагнитных минералов [по Дортман, 1982]

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	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
Флогопит	$\text{KMg}_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] \cdot [\text{F}, \text{OH}]$	(25–100)/50
Амфиболы	-	(10–140)/60
Пироксены	-	(30–450)/80
Оливин	-	1–2000

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

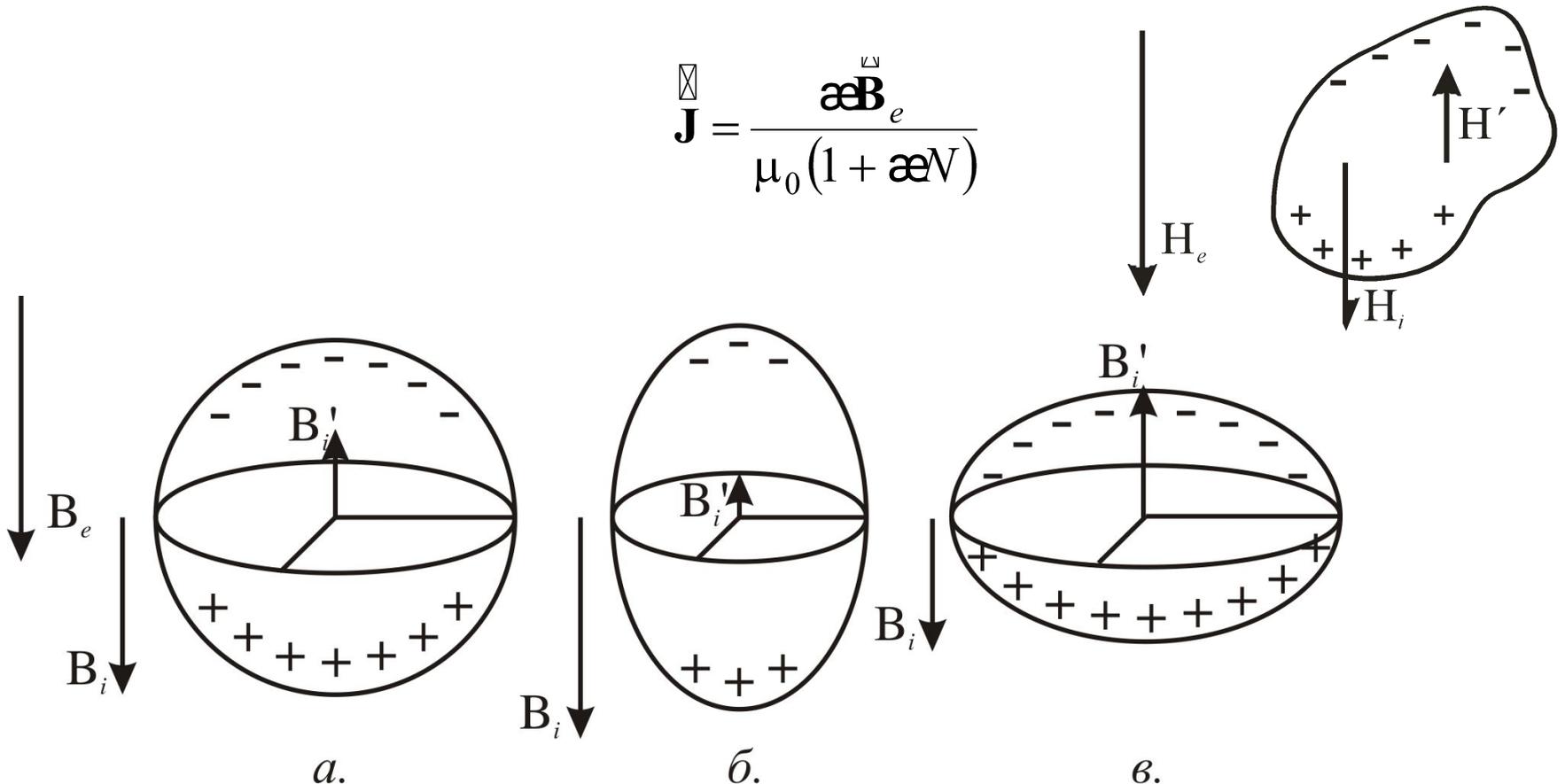
Минерал	Формула	$\chi, \cdot 10^{-5}$ ед.СИ
1	2	3
Кварц	SiO_2	-1,6
Ортоклаз	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	-0,6
Циркон	$\text{Zr}[\text{SiO}_4]$	-1,2
Галенит	PbS	-3,3
Касситерит	SnO_2	-2,0
Ковелин	CuS	-1,2
Флюорит	CaF_2	-1,2
Барит	BaSO_4	-1,8
Сфалерит	ZnS	- 6,5
Апатит	$\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3$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

2.2. Индуктивная намагниченность

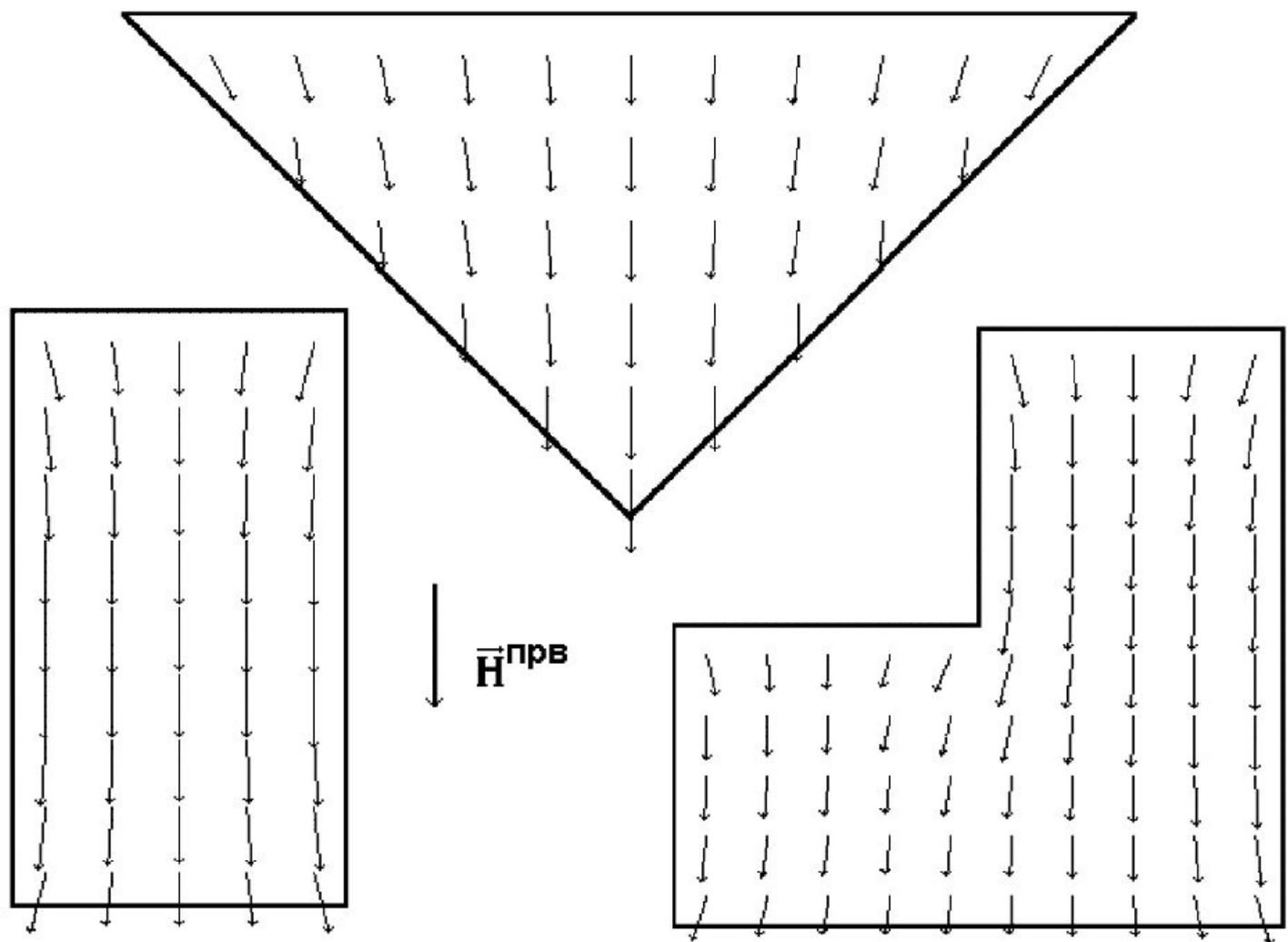


Намагниченность объекта с учетом размагничивания

$$\vec{J} = \frac{\alpha \vec{B}_e}{\mu_0 (1 + \alpha N)}$$



Коэффициент N зависит только от формы тела и изменяется в пределах от 0 до 1 в ед. СИ (0 до 4π в ед. СГС, $N_{СГС} = 4\pi N_{СИ}$). Значение ноль соответствует бесконечно длинному тонкому стержню, намагничиваемому параллельно его длине (полюсы разнесены на бесконечно большое расстояние); единица – бесконечно тонкой пластинке, намагничивающее перпендикулярно к ее плоскости (полюсные поверхности сближены на бесконечно малое расстояние).



Намагниченность однородных моделей с $\kappa=2$ СИ, полученная
 в однородном вертикальном поле под влиянием размагничивания

[Блох Ю.И., 1993]

Коэффициент размагничивания

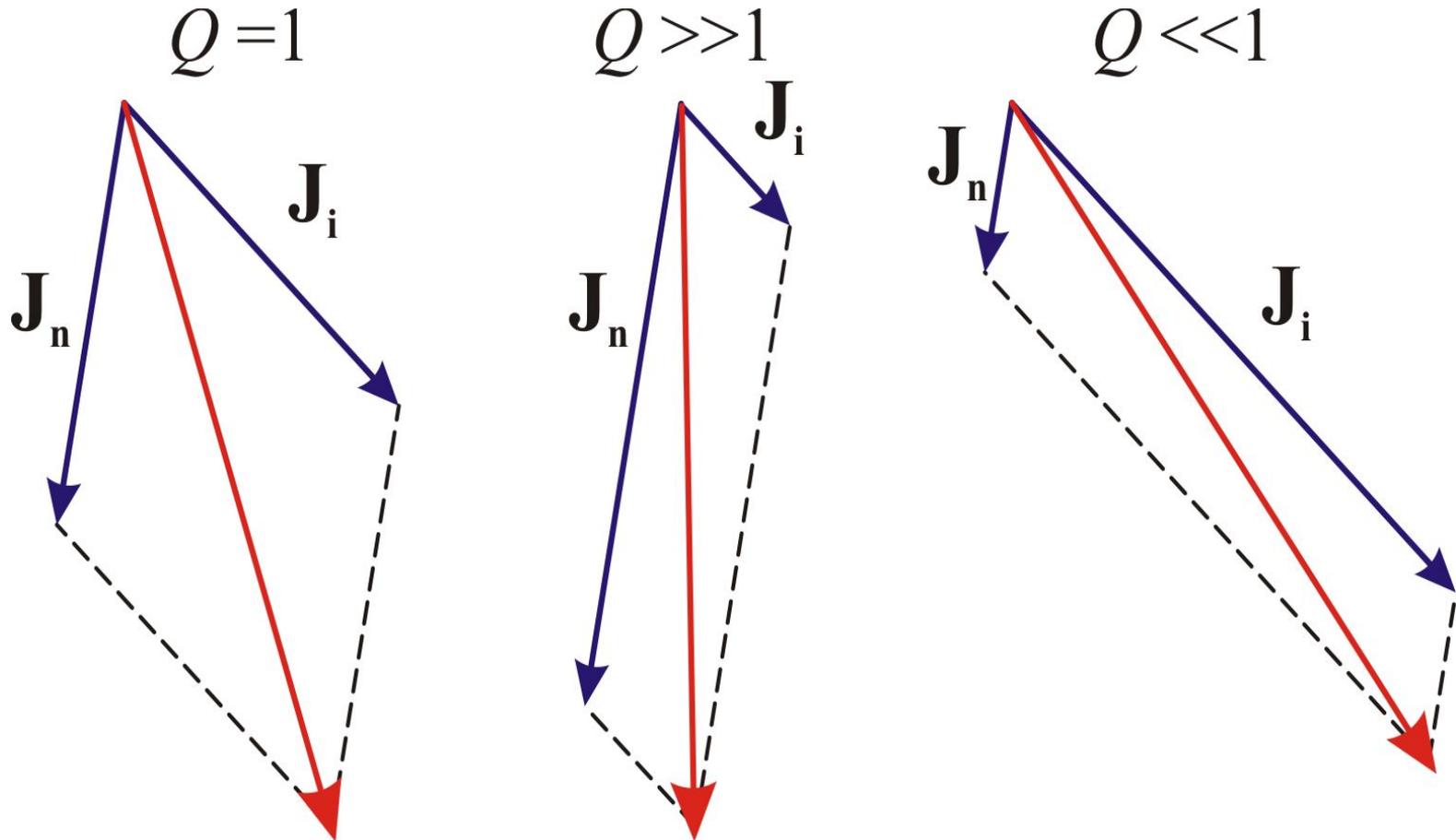
Коэффициент N зависит только от формы тела и изменяется в пределах от 0 до 1 в ед. СИ (0 до 4π в ед. СГС, $NCGS=4\pi NСИ$).

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



Соотношение остаточной и индуктивной намагниченности называют Q-фактор или коэффициент Кенигсбергера

$$Q = \frac{|\mathbf{J}_n|}{|\mathbf{J}_i|}$$

2.4. Намагниченность горных пород

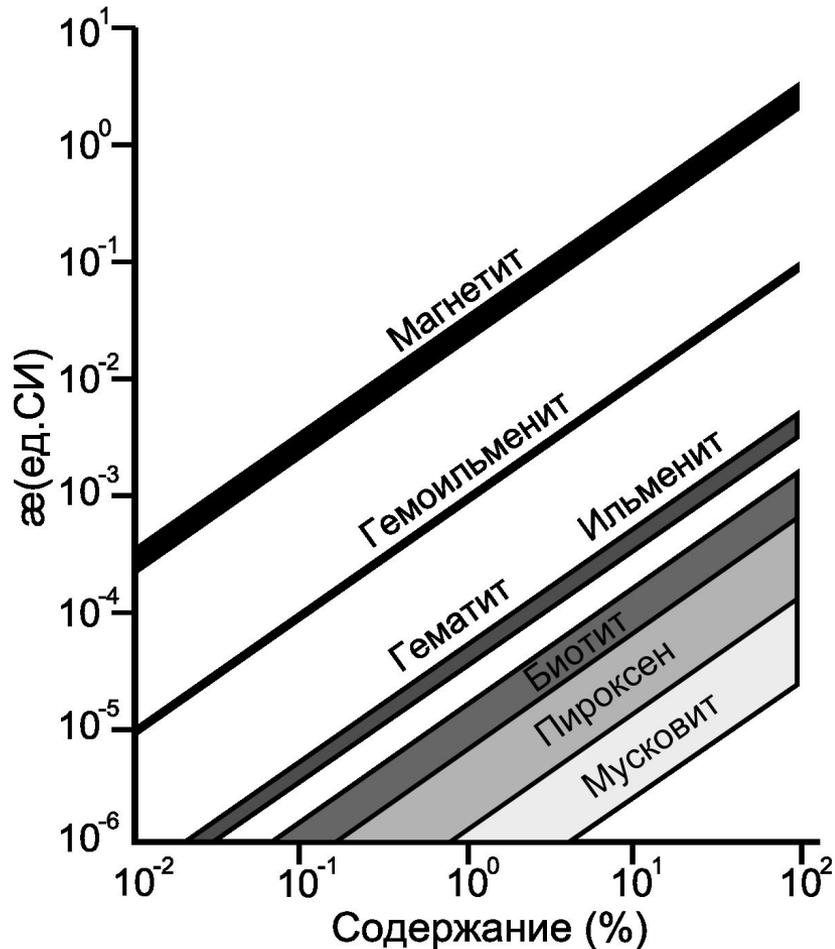


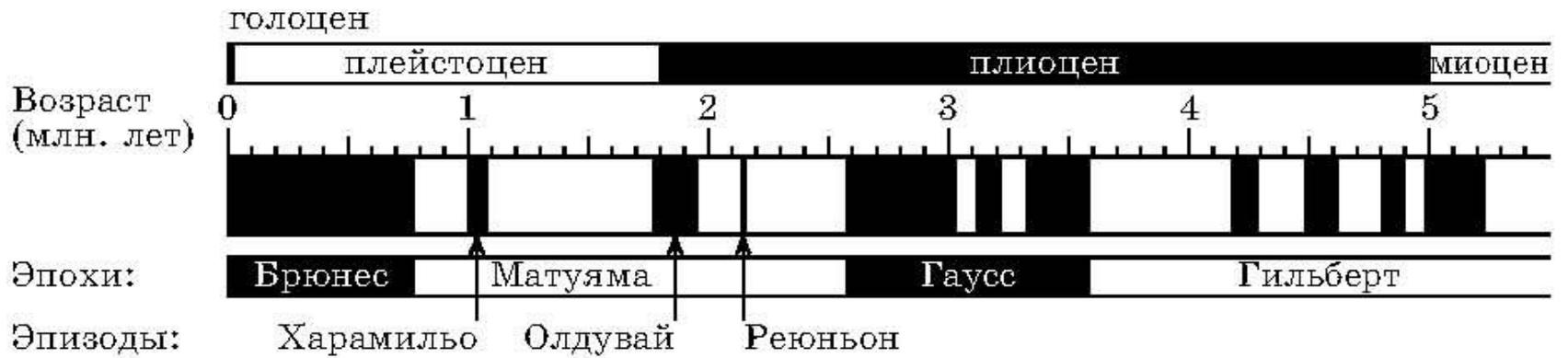
Диаграмма зависимости магнитной восприимчивости горных пород от концентрации ферромагнитных минералов.

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

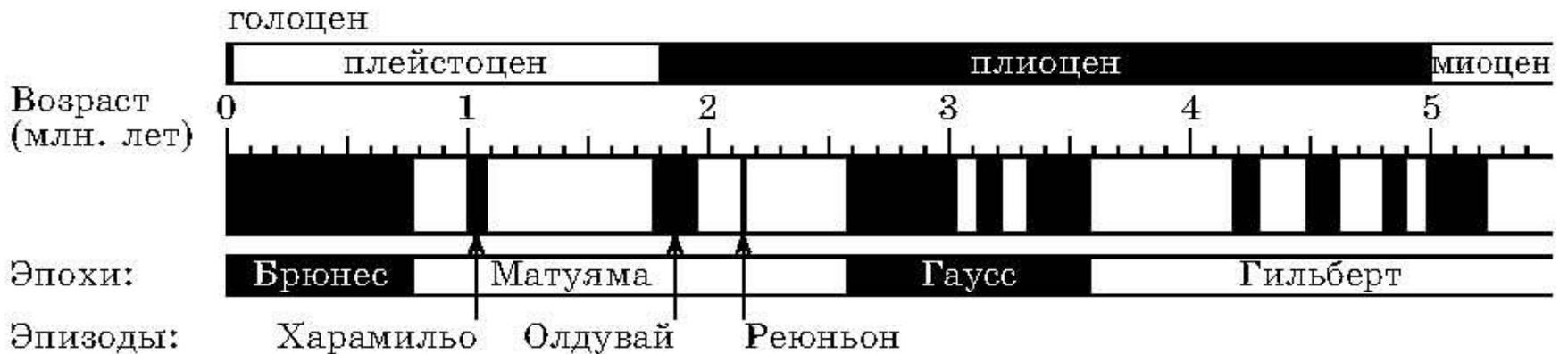
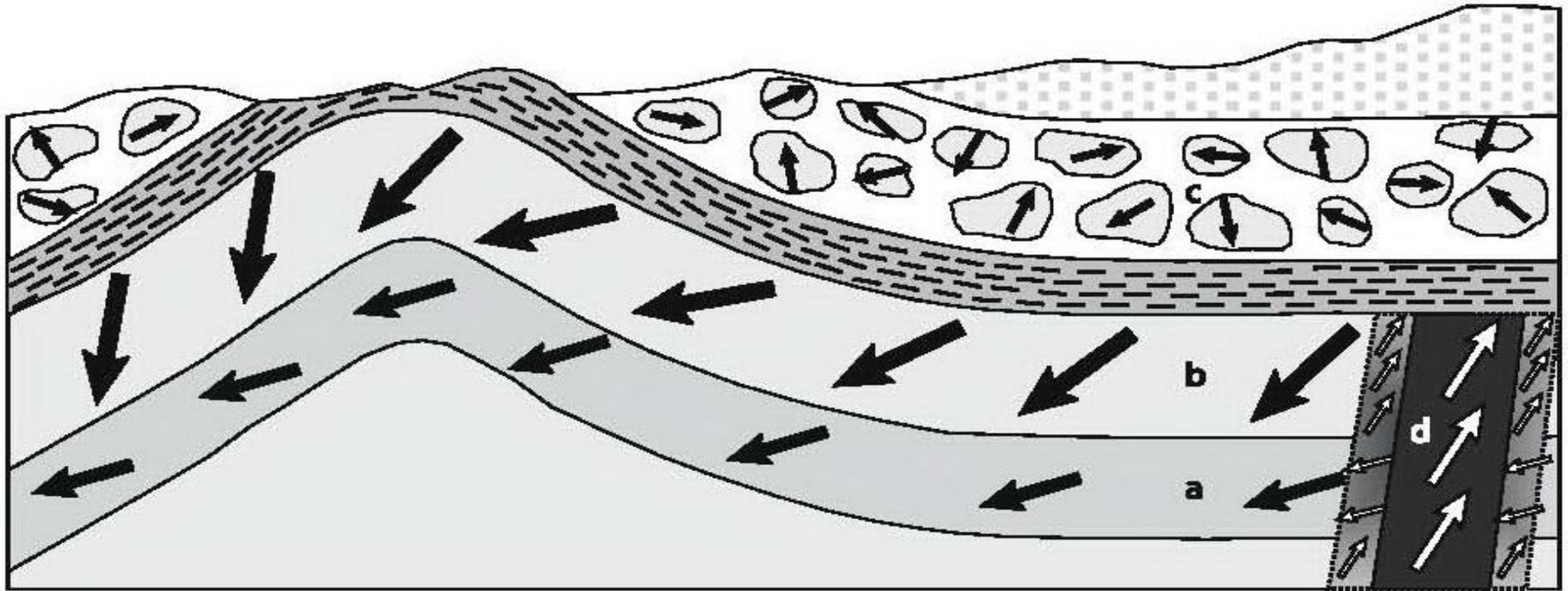
	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10	100
Железо									железо
Окиси железа				гематит	шлак	магнетит			
Вулканические породы				базальт					
				керамика					
				гранит					
				горелая почва					
				габбро					
				диорит					
Метаморфические породы			кварцит						
			песчаник						
			почва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

[Смекалова и др, 2007]

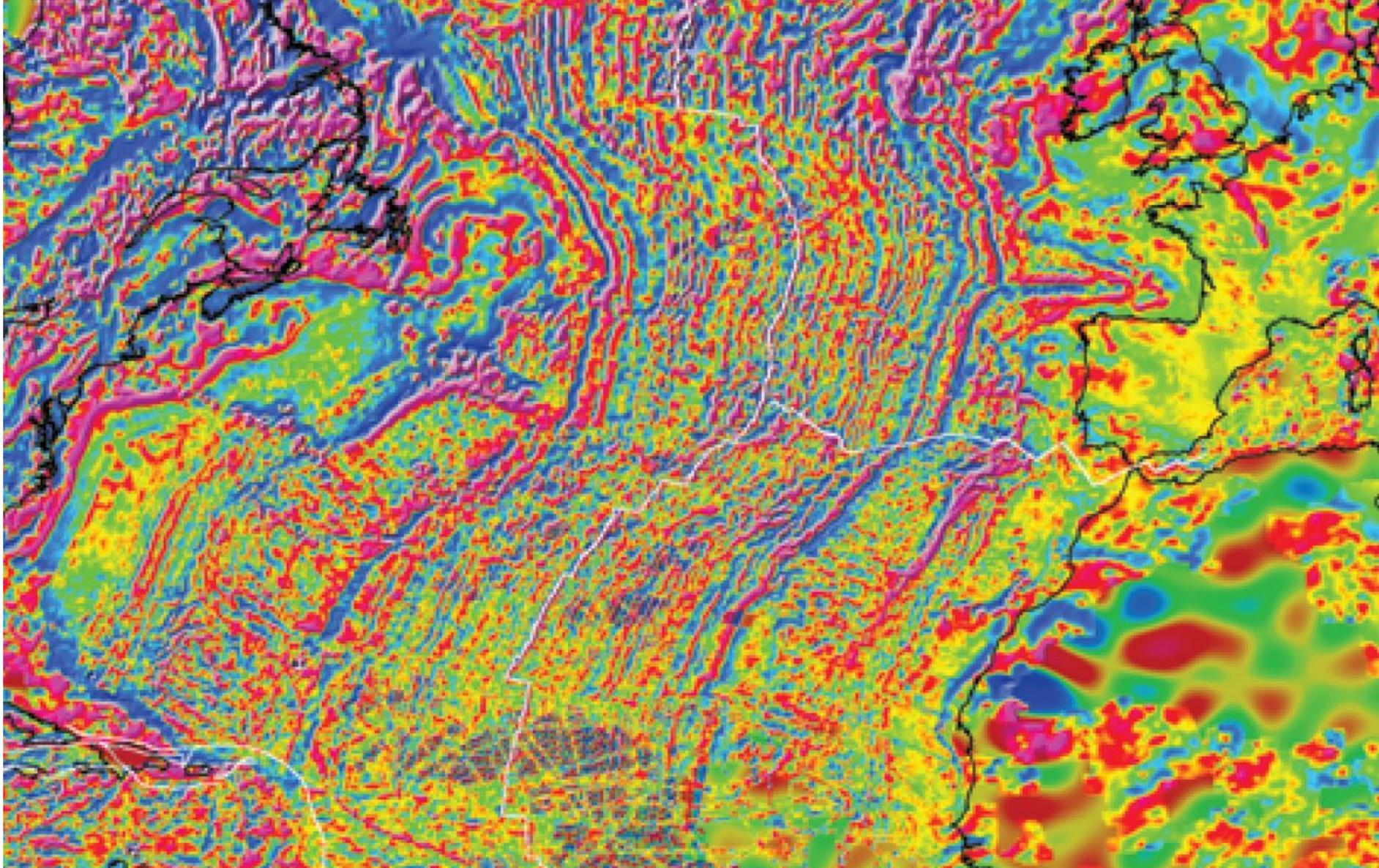
2.5. Палеомагнетизм.



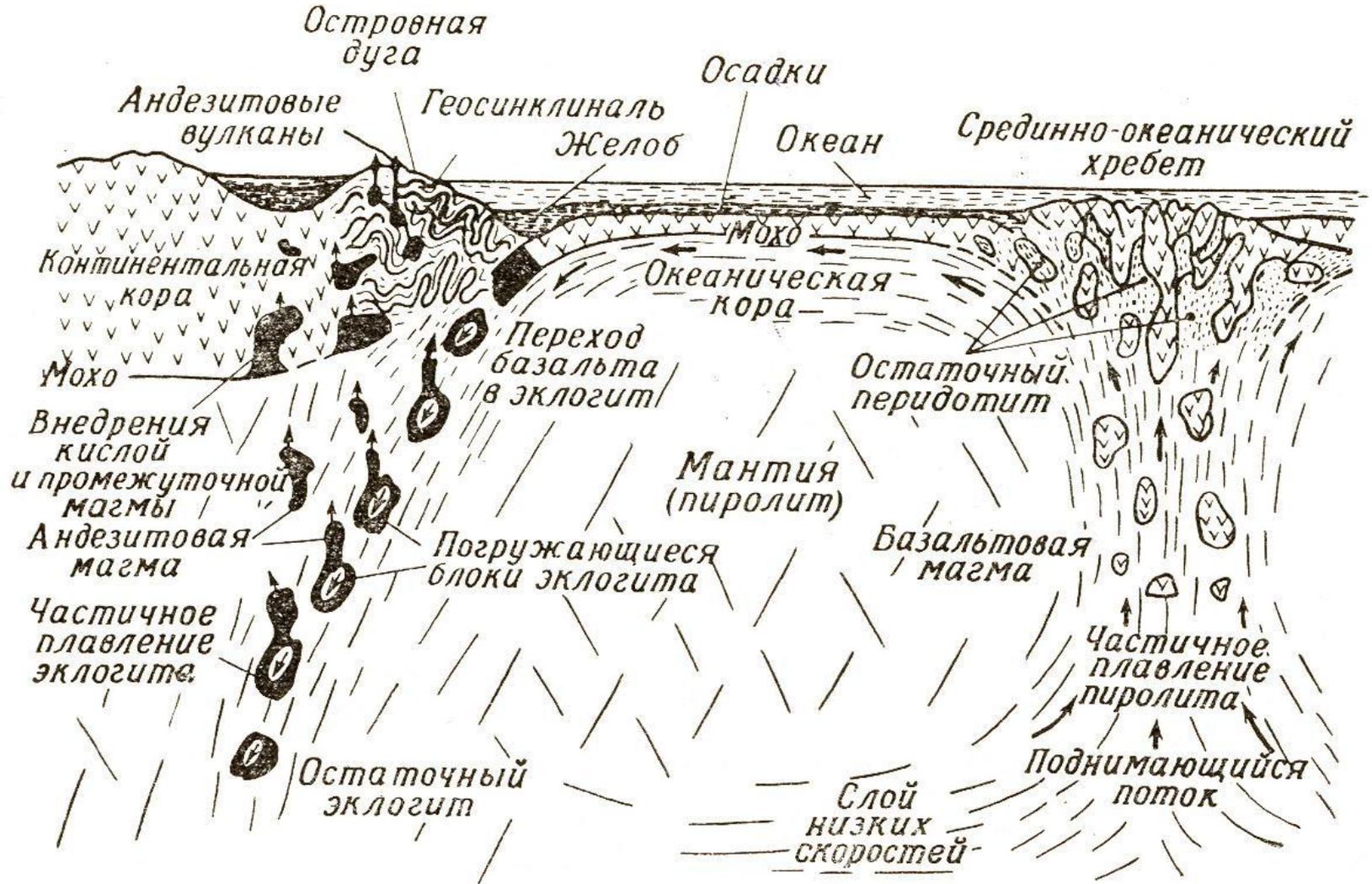
Палеомагнетизм и магнитостратиграфия

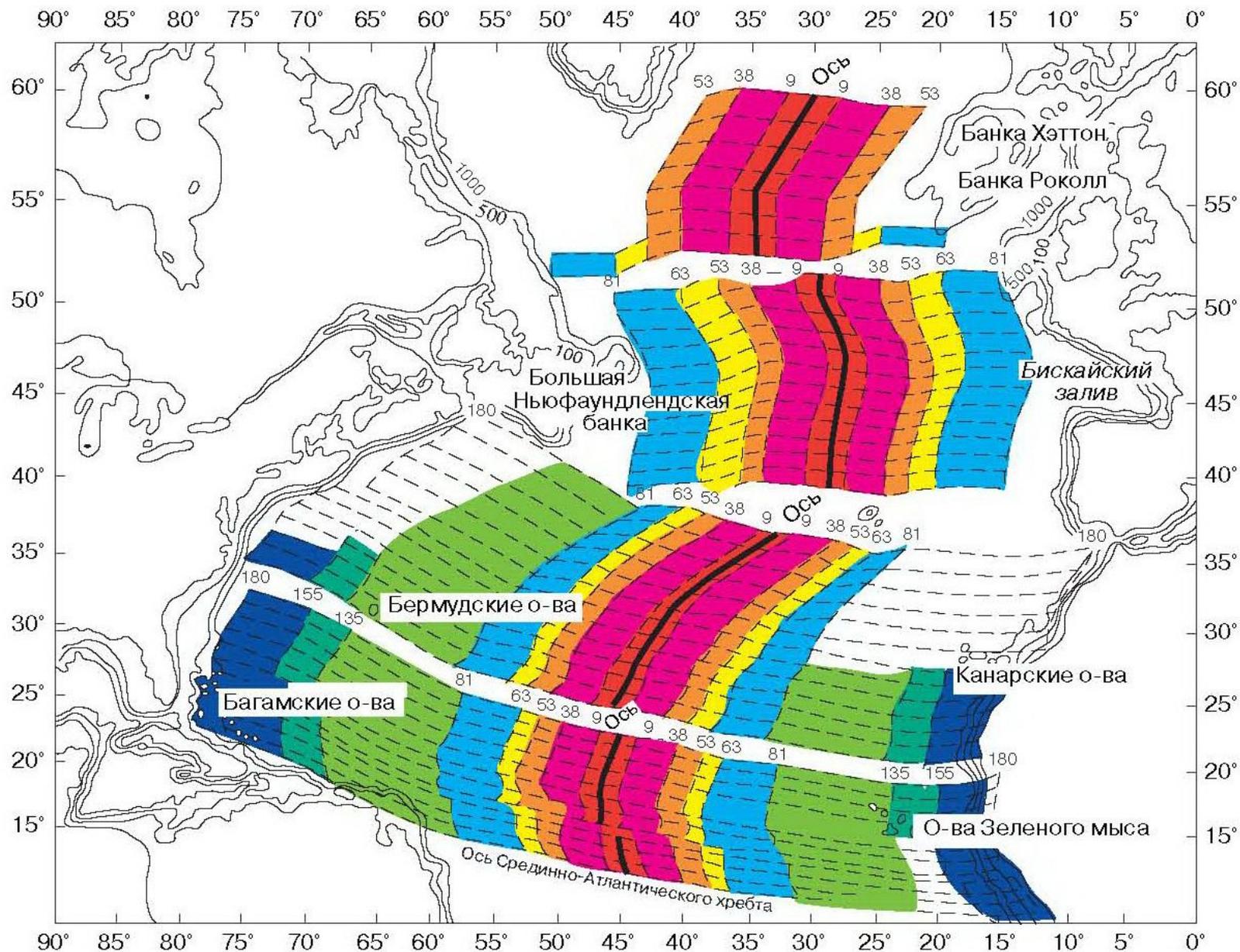


Полосовые аномалии в Атлантическом океане. World Digital Magnetic Anomaly Map.



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



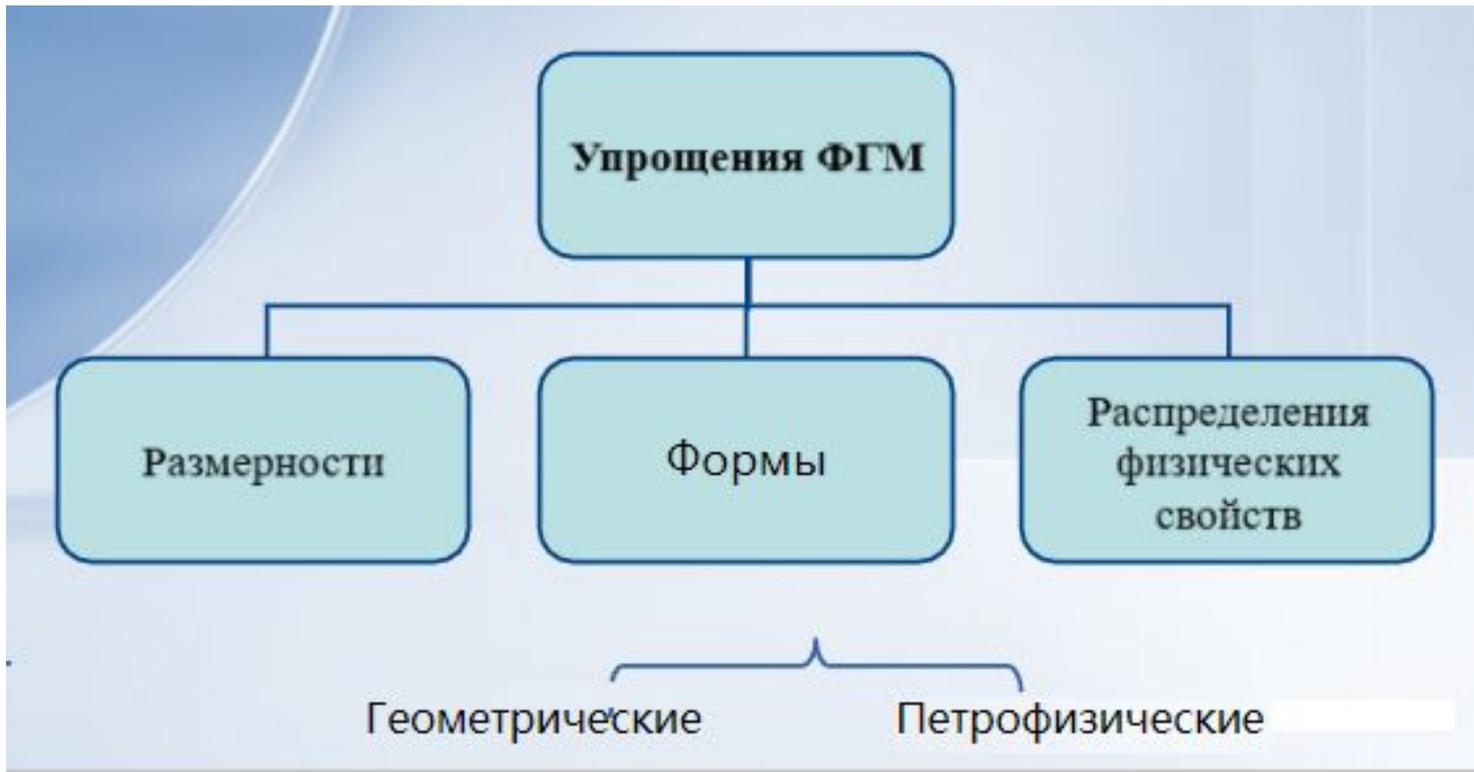
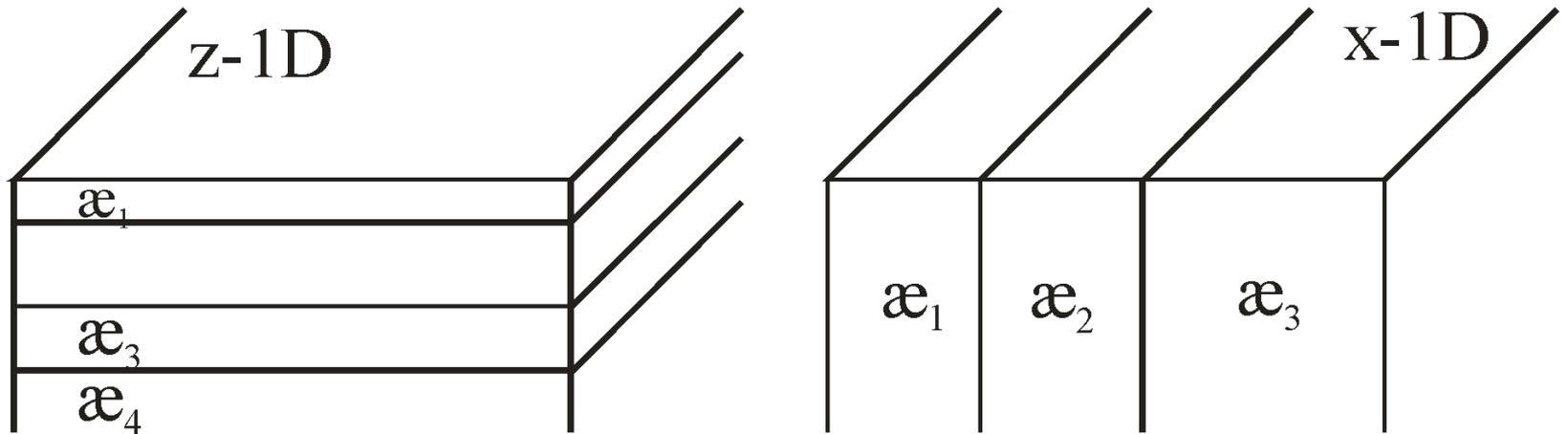
Анизотропия магнитной восприимчивости оценивается по формуле:

$$\lambda_{\mathcal{X}} = \frac{\mathcal{X}_{max} - \mathcal{X}_{min}}{2\bar{\mathcal{X}}} = \frac{\mathcal{X}_{max}}{\mathcal{X}_{max}} \quad \text{или} \quad A_{\mathcal{X}} = \frac{\mathcal{X}_m}{\mathcal{X}_n}$$

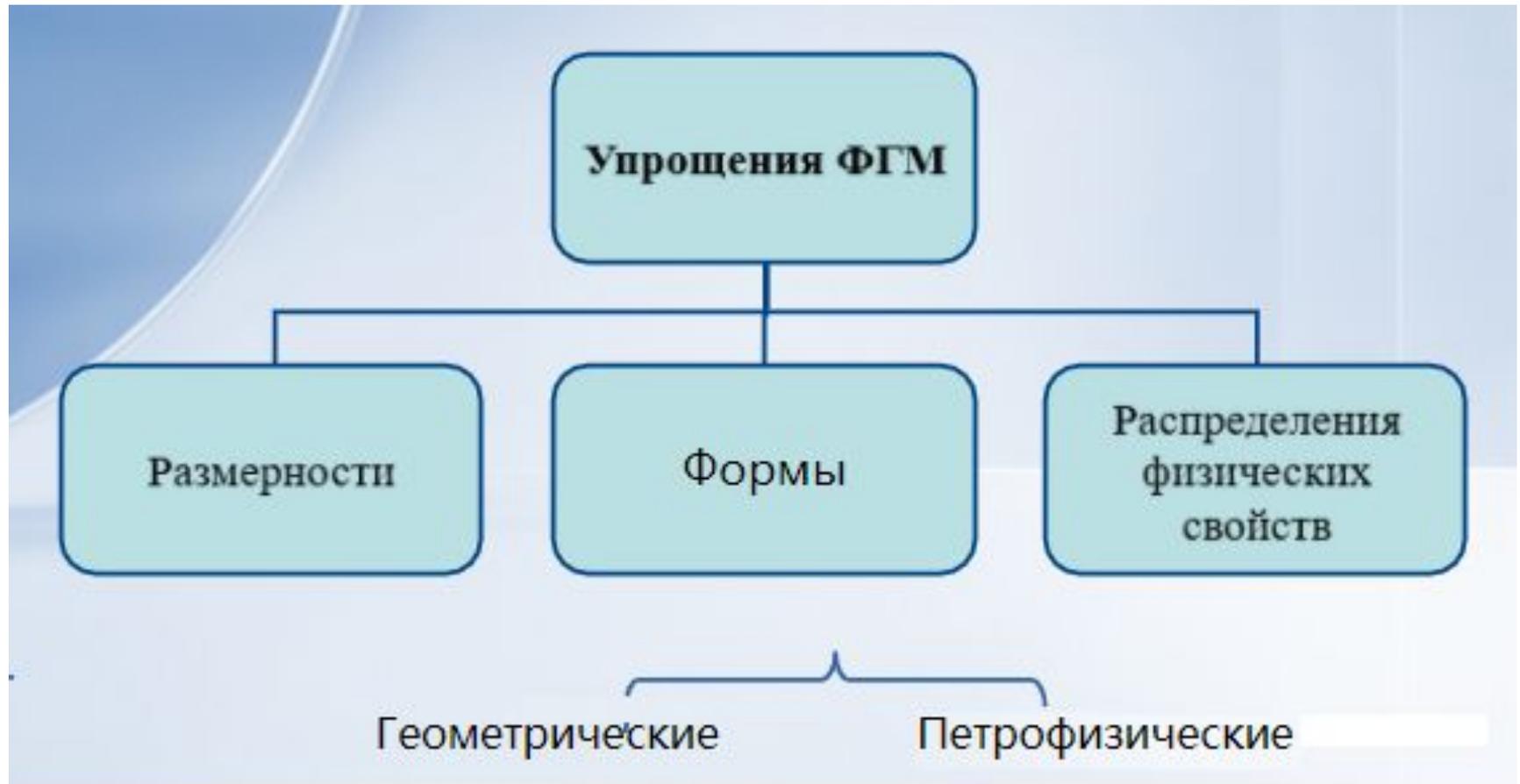
$$\lambda_{\mathcal{X}} = \frac{1 - A}{1 + A}$$

$$A_{\mathcal{X}} = \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda}$$

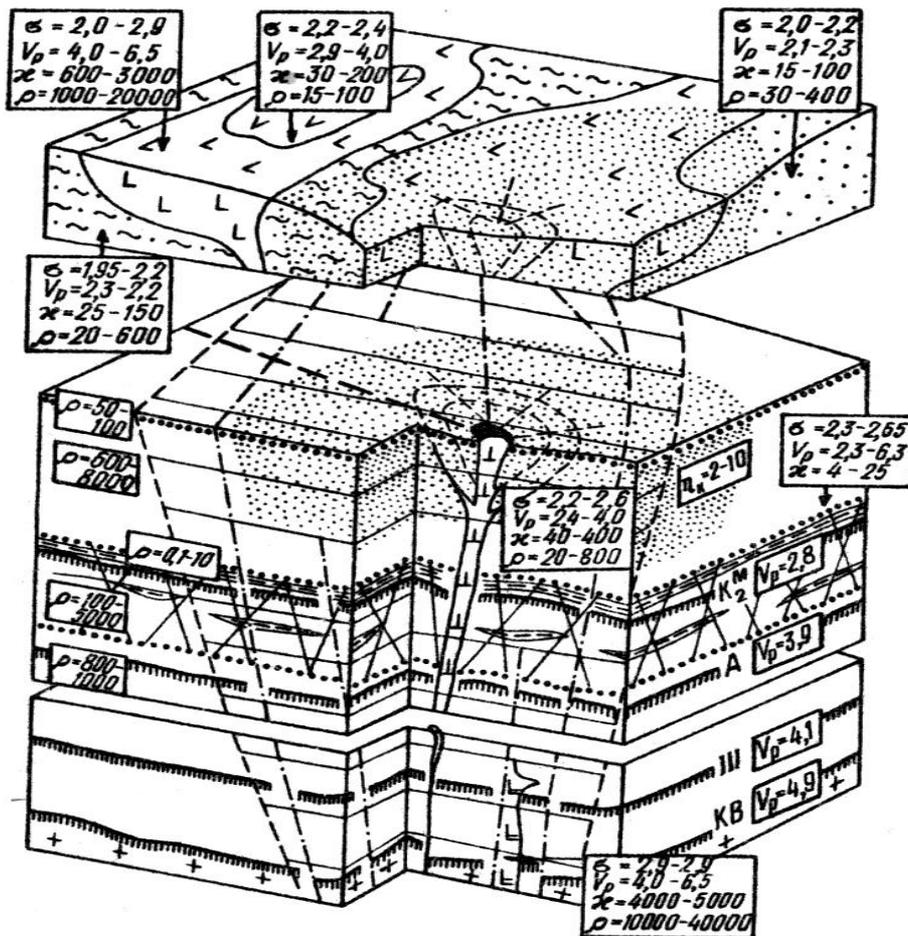
2.7. Физикогеологические модели (ФГМ)



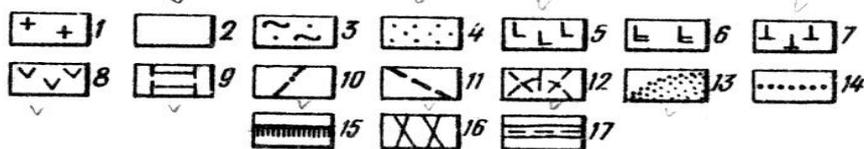
Физико-геологическая модель (ФГМ) – это совокупность упрощений геометрических и петрофизических свойств геологического разреза.

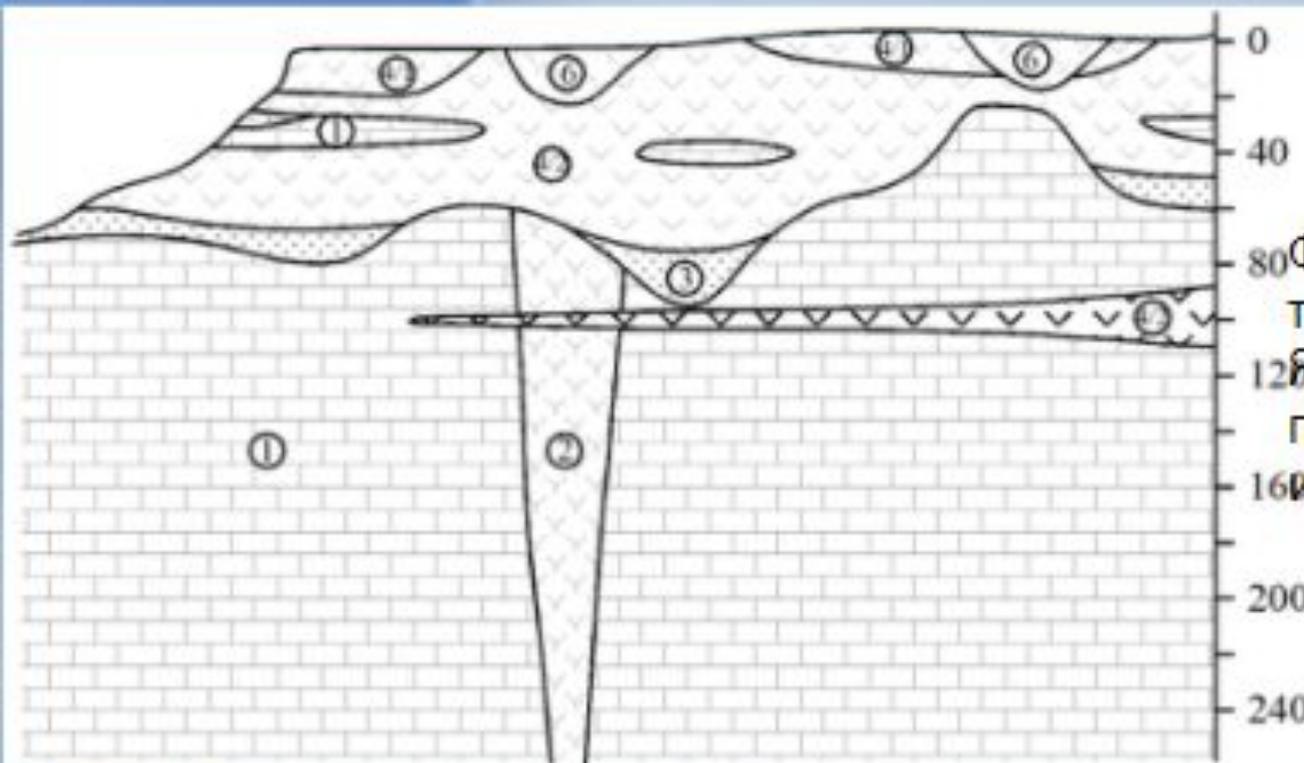


Геолого-геофизическая модель кимберлитовой трубки и околотрубочного пространства Якутской алмазносной провинции (по Л.А. Богданову и др.).



- 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 – кажущееся удельное электрическое сопротивление, Ом·м; η_k – поляризуемость, %.

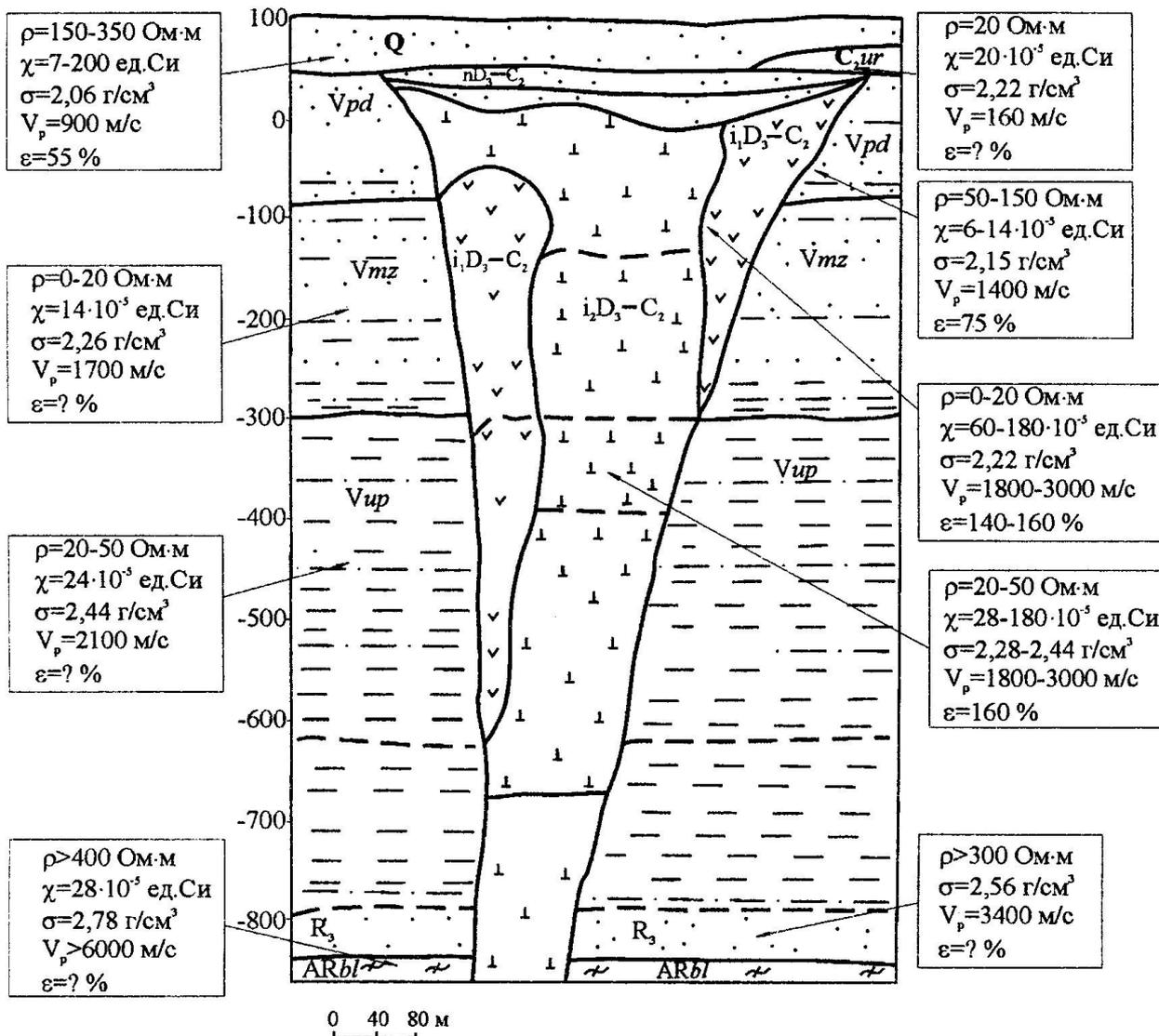




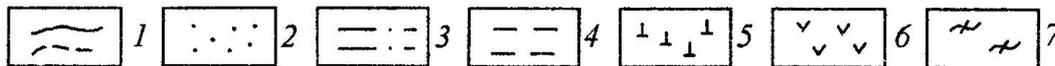
ФГМ для кимберлитовой
трубки Далдынского поля
Якутской алмазоносной
провинции. [Доброхотова
1987 др., 1987]

№ п/п	Магнитная восприимчивость, -10^{-2} ед.СИ	Направление вектора ЕОН, J_n	Отношение $Q =$ J_n/J_s	Суммарная намагниченность, -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 кимберлитового тела для Архангельской алмазоносной провинции [Абрамов и др., 2006]



- 1 – геологические границы,
- 2 – пески, песчаники,
- 3 – алевролиты,
- 4 – аргиллиты,
- 5 – ксенотуфобрекчии (кимберлитовые),
- 6 – автолитовые брекчии,
- 7 – гранитогнейсы (фундамент)



Конец главы 2