

Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых

Лекция 5

Магниторазведка (часть 1)

Введение

- Компас всегда смотрит примерно на север, т.к. Земля имеет магнитное поле.
- Помимо глобального магнитного поля Земли в целом в наблюдаемом магнитном поле проявляется магнитный эффект намагниченных пород. Многие из них обрели намагниченность в момент своего формирования (например, при остывании магматических пород). Породы намагничивались по направлению существовавшего в тот момент поля.
- Магнитные свойства пород и руд частично определяются историей их формирования. Благодаря этому магнетизм используется для изучения:
 - источников осадков,
 - интенсивности эрозии,
 - присутствия в разрезе вулканических компонент.

Свойства магнитного поля

- Земное поле проявляет себя как очень большой магнит, как если бы большой намагниченный брусок поместили в ядре Земли.
- Магнитное поле воздействует на стрелку: она ориентируется вдоль силовых линий, выходящих из одного полюса и входящих в противоположный.
- Силовых линий много. Их можно увидеть рассыпав железные опилки на лист, размещенный над магнитом. Каждая частица станет магнитом и их концы объединятся вдоль силовых линий.
- Единица измерения магнитного поля – Тесла – **Тл**

Это очень большая величина .

В практике – нанотесла

$$\mathbf{nТл} = 10^{-9} \mathbf{Тл}$$

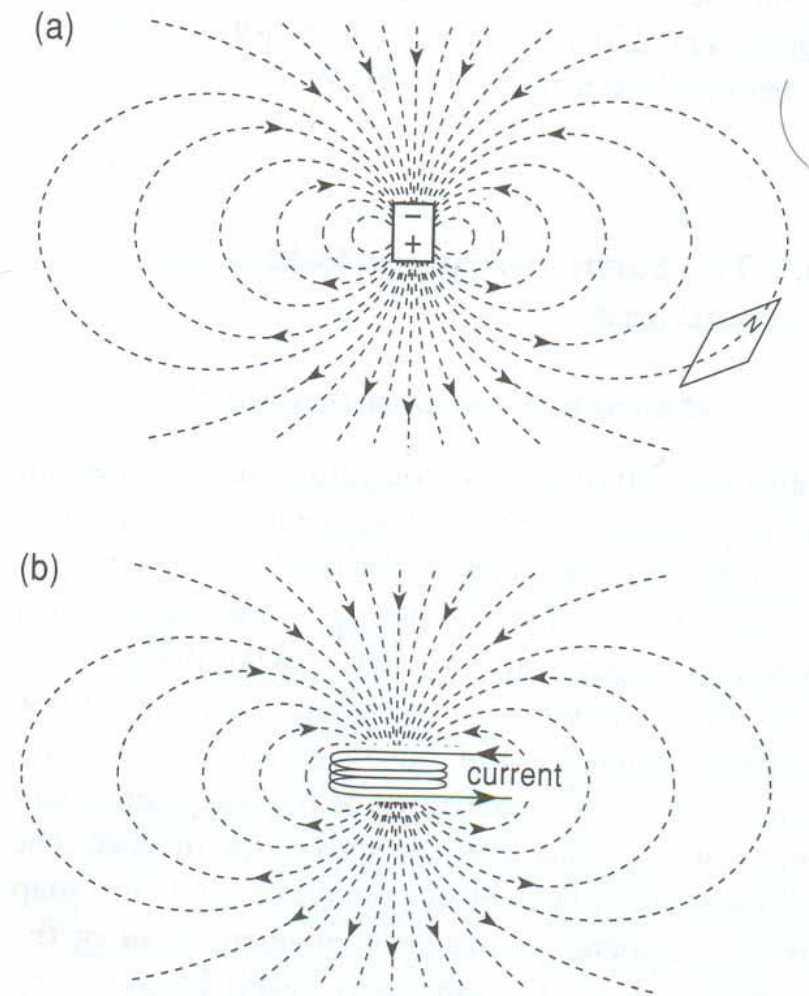


Figure 10.1 Magnetic field of a bar magnet and of a coil.

Магнитное поле Земли

- Магн. поле на пов-ти Земли = «норм. поле Земли» + поле земной коры
- Рассмотрим теоретические основы.

Сила взаимодействия между двух изолированных точечных масс определяется законом Кулона (похож на закон притяжения Ньютона, но отличается тем, что магнитное поле зависит от свойств среды:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{\mu \cdot \rho^2} \quad (*)$$

m_1, m_2 – точечн. магн. массы
 ρ – расстояние между ними
 μ – магнитная проницаемость

Если массы различного знака – действуют силы притяжения;

Если массы одного знака – действуют силы отталкивания.

Сила действующая на единичную массу – **напряженность**

$$T = \frac{m}{\mu \cdot \rho^2}$$

магнитного поля “Т”

Связь между Т и В:

$$T = \mu_a \cdot B$$

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды (для воздуха и воды $\mu_a = 1$)

В – магнитная индукция – основная силовая х-ка магнитного поля.

Единицы магнитного поля

- Единицей магнитной индукции «В» в системе СИ является тесла (Тл);
в системе СГС – гаусс (Гс).

$$1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл};$$

В магниторазведке широко используется более мелкая единица – нанотесла (нТл); $1 \text{ нТл} = 10^{-9} \text{ Тл}$.

- Единицей напряженности магнитного поля (Т):
в системе СИ – ампер на метр (А/м);
в системе СГС – эрстед (Э).

$$1 \text{ Э} = 10^3 / (4\pi) \text{ А/м}$$

- Связь между Т и В в каком либо веществе:

$$T = \mu \cdot \mu_0 \cdot B = \mu_a \cdot B$$

где: μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная); в СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ (генри на метр); в СГС $\mu_0 = 1$ (она безразмерна);

μ – относительная магнитная проницаемость вещества, безразмерная величина, зависящая от его состава и состояния. В СИ и СГС значения одинаковы. Для воздуха и воды они равны единице.

Произведение $\mu_0 \cdot \mu$ – имеет ту же размерность, что и μ_0 и называется абсолютной магнитной проницаемостью вещества.

Единицы магнитного поля

- Ранее в магниторазведке широко применялась система СГС, а магнитное поле характеризовалось не индукцией, а напряженностью.
- Единицы напряженности в СГС:
 - эрстед (Э).
 - миллиэрстед = 10^{-3} Э;
 - гамма = 10^{-5} Э.

При сопоставлении карт, оцифрованных в разных единицах, следует руководствоваться: магнитной индукции **1 нТл (СИ)** соответствует напряженность магнитного поля **1 гамма (СГС)**.

Магнитный потенциал и его производные

- Для характеристики магнитного поля удобно использовать, как в гравиразведке, магнитный потенциал «U», который связан с напряженностью формулами:

$$T = \frac{\partial U}{\partial \rho}; \quad Z = \frac{\partial U}{\partial z};$$

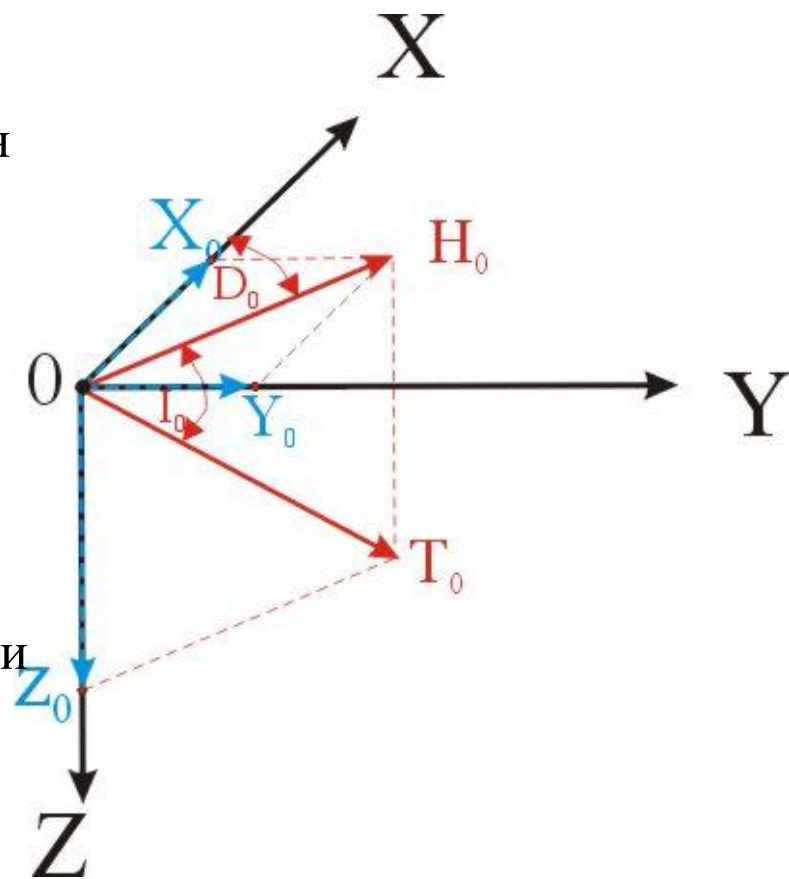
$$X = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad Y = \frac{\partial U}{\partial y}$$

где: Z, X, Y – составляющие напряженности магнитного поля по осям

z, x, y.

D_0 – магнитное склонение вектора T_0 ,

I_0 – магнитное наклонение вектора T_0 .



Составляющие магнитного поля

- Магнитное поле, измеряемое на поверхности Земли включает несколько составляющих:

- **1.«Нормальное поле Земли**

1.1. Поле диполя Земли, связываемое с электрическими токами в ядре Земли;

1.2. Континентальные (мировые аномалии), связываемые с электрическими токами в верхней части ядра Земли;

2. Поле электрических токов, протекающих в ионосфере Земли (около 5% норм. поля);

3. Поле намагниченных пород земной коры

1. Магнитное поле диполя Земли

- Ось магнитного поля отклонена от географической оси (оси вращения Земли) на 11.5° –

МАГНИТНОЕ СКЛОНЕНИЕ
(географической оси).

- Относительно оси магнитного поля намечаются полюса (северный и южный) и отсчитывается экватор.

- Напряженность магнитного поля изменяется в пределах:

- от $\approx 30\,000$ нТл на экваторе
- до $\approx 60\,000$ нТл на магнитных полюсах

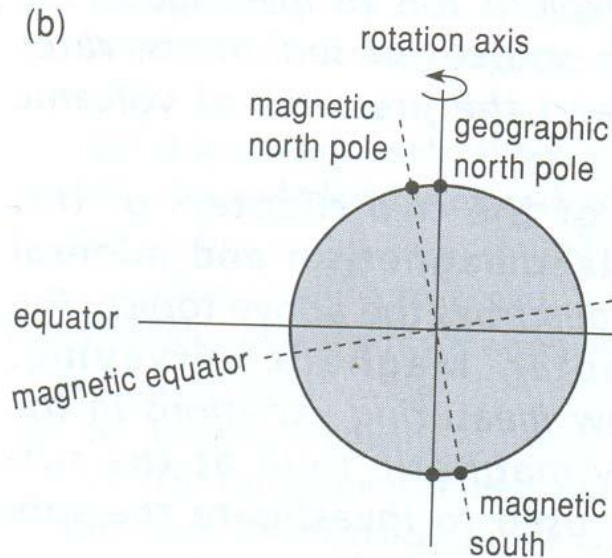
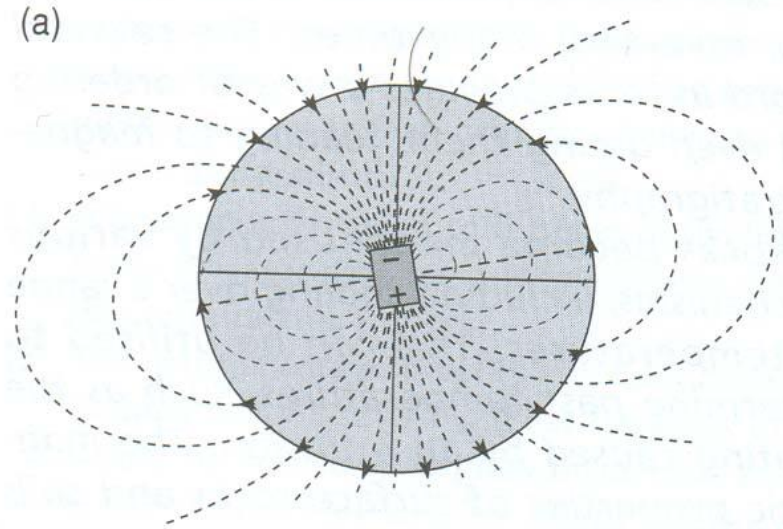
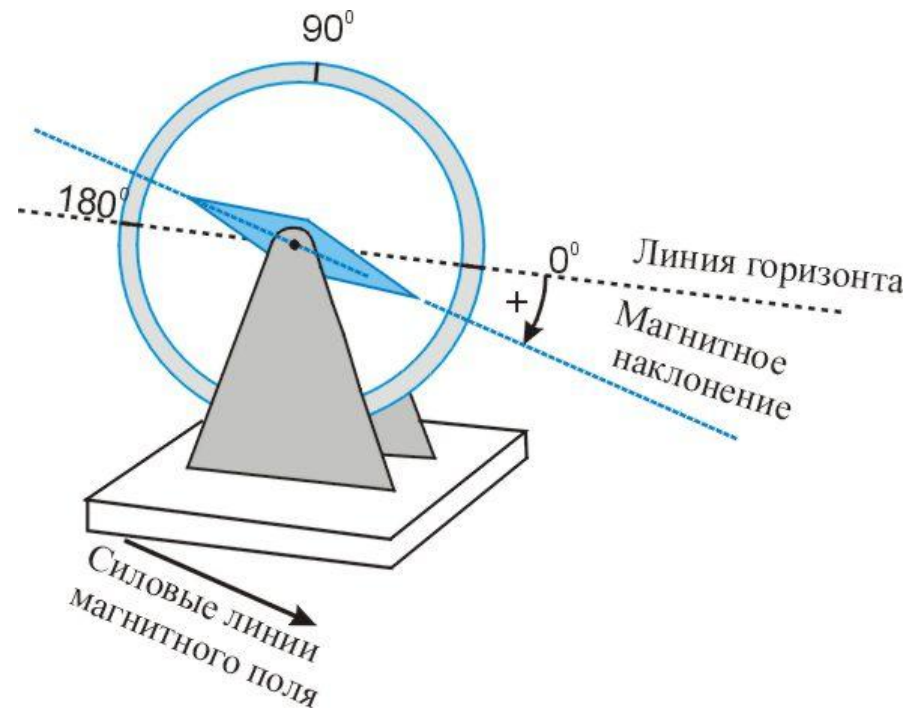


Figure 10.2 Magnetic field of the Earth.

- Линии магнитного поля пересекают поверхность Земли под разными углами. Магнитная стрелка, закрепленная на горизонтальной оси покажет направление силовых линий магнитного поля.
- Угол между линией горизонта и направлением линий магнитного поля –

Магнитное наклонение



МАГНИТНОЕ НАКЛОНЕНИЕ

- Наклонение “I” положительно, когда стрелка ниже линии горизонта; отрицательно – когда выше.
- $I = 0^0$ на экваторе,
- $I = +90^0$ на магн. сев. полюсе.
- $I = -90$ на магн. южном полюсе.
- Пусть: I – наклонение
 λ - географическая широта

$$\text{tg } I = 2 \text{tg } \lambda$$

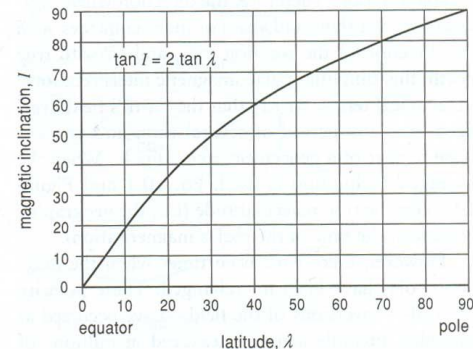


Figure 10.4 Magnetic inclination versus latitude.

Магнитное наклонение

$$\operatorname{tg} I = 2\operatorname{tg} \lambda$$

- Пользуясь этой формулой и зная направление на север можно рассчитать широту (но не долготу)
- Катушка, через которую проходит переменный ток создает тот же магнитный эффект, что и намагниченная пластина. Магнитное поле Земли аналогично продуцируется электрическими токами в жидком ядре — процесс называемый **«геодинамо»**.
- Мы называем этот источник магнитного поля — **«магнитным диполем»**

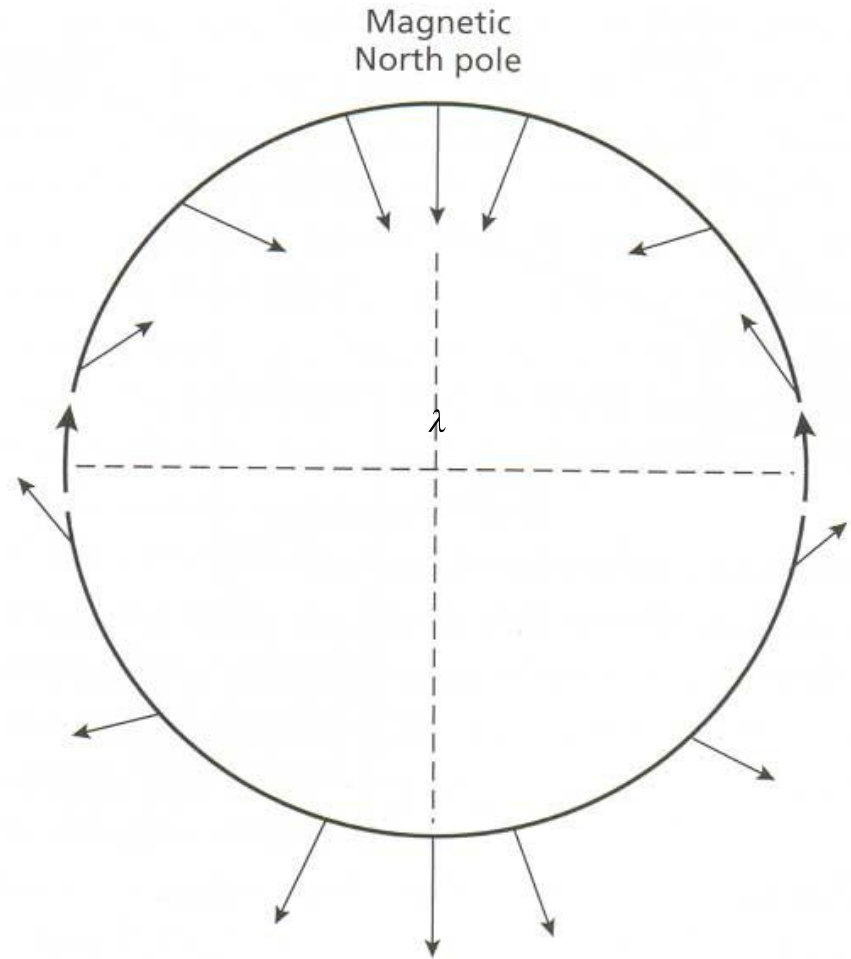


Fig. 7.7 The variation of the inclination of the total magnetic field with latitude based on a simple dipole approximation of the geomagnetic field. (After Sharma 1976.)

4. Поле намагниченных пород земной коры

Магнитные свойства пород

- Магнитные свойства пород определяются суммарным аномальным эффектом элементарных диполей (атомарного масштаба).
- Рассмотрим систему из двух аномальных магнитных масс (m) разных знаков, расположенных на расстоянии $2dl$ друг относительно друга.
- M -магнитный момент (основная величина, характеризующая магнитные св-ва).

$$d\bar{M} = 2dl \cdot m$$

- Если мы имеем объемные массы то магнитный момент равен сумме диполей:

$$\bar{M} = \sum d\bar{M}$$

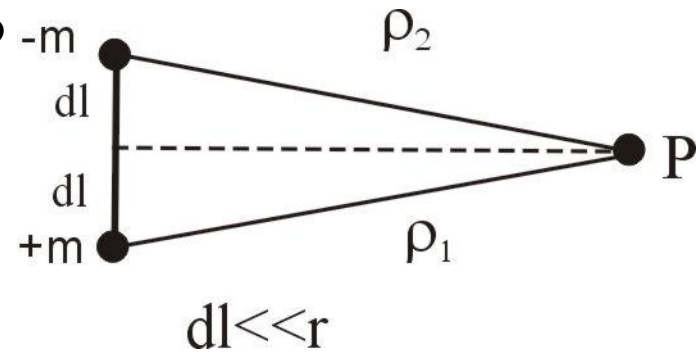
- Вектор J – магнитный момент, приходящийся на единицу объема – **интенсивность намагничения**.

Единицей интенсивности намагничения является А/м.

Магнитный потенциал объема выражается через J :

$$U = \int_{\Omega} \frac{J d\Omega}{\rho_0^2 \cdot \mu}$$

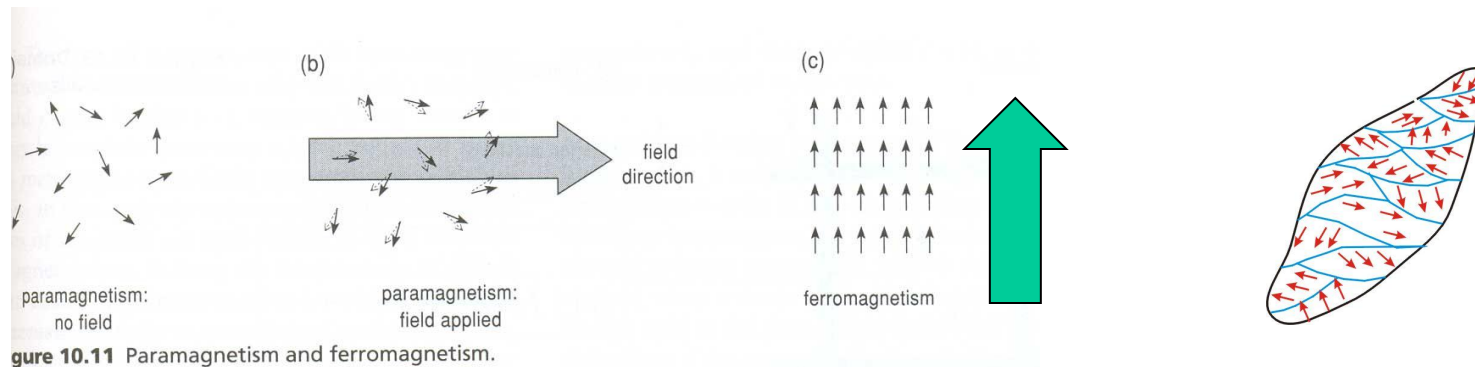
Ω – объем \bar{J} – вектор



- Часто для х-ки магнитных св-в используют скалярную величину:
- **Магнитная восприимчивость (χ)** – способность г.п. намагничиваться под действием внешнего магнитного поля.

$$\bar{J} = \chi \cdot \mu_0 \cdot \bar{T}$$

Намагниченность пород



- **ДИАМАГНЕТИКИ** – намагничивание происходит в направлении, противоположном действующему на материал внешнему магнитному полю (вода, соль, Au, Ag, Cu и др)
- Атомы большинства химических элементов магнитоактивны, но у большинства элементов направления намагниченности атомов случайно ориентированы. Под воздействием внешнего магнитного поля Земли атомы слабо ориентируются – м-л становится слабомагнитным. После снятия поля – намагниченность исчезает (отсутствует способность создавать остаточное поле) – **«ПАРАМАГНЕТИК»**
- У **«ФЕРРОМАГНЕТИКОВ»** направления намагниченности атомов самопроизвольно согласуется в пределах доменов. Под воздействием внешнего поля домены стремятся перестроиться под него. После снятия внешнего поля сохраняется частичная ориентация доменов – остаточное поле.

Большинство ферромагнетиков – соединения железа, широко представленные во многих породах.

Точка Кюри

- При подъеме температуры колебания зерен (или доменов) возрастают, увеличивается возможность разрушения стен между доменами или разворота направления их намагничения. — «блокирующая температура»;
- При дальнейшем нагревании до точки Кюри атомарные магниты теряют связь друг с другом и свойство самопроизвольной намагниченности (св-во ферромагнетика) исчезают — М-Л становится парамагнетиком.

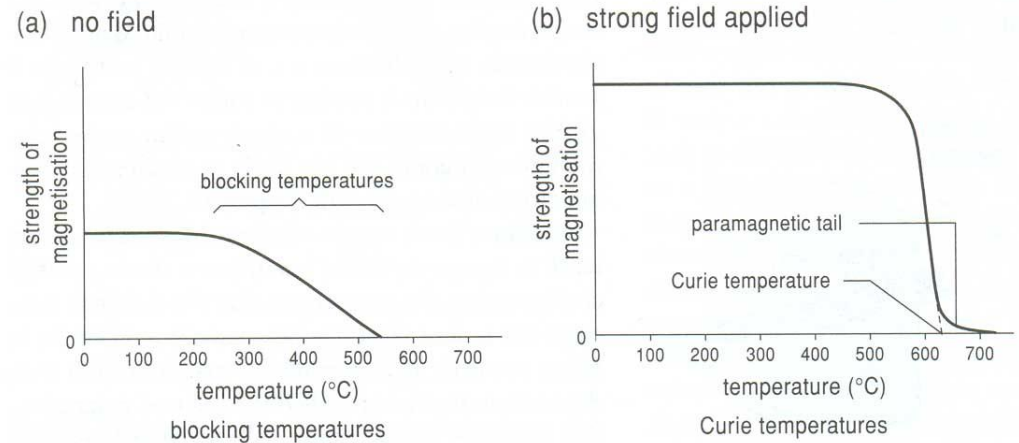


Figure 10.14 Demagnetisation by increasing temperature.

Механизмы намагничивания пород

- **1. Термальная (остаточная) намагниченность.**

Когда лава или интрузия остывает, происходит формирование зерен ферромагнетиков. При охлаждении ниже точки Кюри атомарные магниты внутри каждого зерна начинают самопроизвольно формировать домены и ориентируются по внешнему полю – формируется остаточная намагниченность.

- **2. Изотермальная остаточная намагниченность (без нагрева).** Отдельные осадочные породы могут быть намагничены за счет удара молнии (редко).

- **3. Химическая остаточная намагниченность.** Формируется при химическом преобразовании немагнитных железистых материалов в магнитные в результате выветривания или при осаждении окислов железа из воды, просачивающейся через горные породы. Это важный механизм намагничивания песчаников .

- **4. Кластическая (осадочная) намагниченность.** Если намагниченные зерна осаждаются вместе с продуктами эрозии, они стремятся согласовать свою намагниченность с внешним полем.

- **5. Вязкая остаточная намагниченность.** Механизм действует в породах, которые имеют точку Кюри немного более высокую, чем температура окружающей среды. За счет длительного времени часть доменов намагничивается по современному полю.

Магнитные свойства минералов и пород

Магнитные свойства ферромагнитных минералов

| Минерал | Хим. формула | Точка Кюри (°C) | Намагниченность 10^3 А/м | χ Ед. СИ |
|----------|-------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|
| магнетит | Fe_3O_4 | 578 | 490 | 4-25 |
| гематит | Fe_2O_3 | 560-640 | 1.5-2.5 | 10^{-4} - $2 \cdot 10^{-3}$ |
| маггемит | Fe_2O_3 | 560-640 | 435 | 4-25 |
| пирротин | Fe_7O_8 | 300-325 | 17-70 | 10^{-2} - 10^{-1} |

Магнитные свойства горных пород

χ (магнитная восприимчивость) опр-ся главным образом концентрацией ферромагнитных минералов.

Кроме того: $\chi = f$ (размера кристалла ф.м. — χ — растет с увел. зерен),

$\chi = f$ (формы включений ф.м. — менее магнитны г.п., где ф.м. минералы образуют изолированные включения),

J_n -(естеств. остат. намагн.)= f (состава и истории развития — не изм-ся при изменении направления и интенсивности внешнего поля),

J_i .- индуцированная намагниченность обычно пропорциональна χ и имеет то же направление, , что и магнитное поле Земли.

Магнитные свойства горных пород

J_n и J_i - в общем случае не совпадают. Причины:

- инверсии (изменения полярности Земли),
- остаточная намагниченность отражает намагниченность, полученную в ходе предыдущих эпох.

Осадочные породы – наименее магнитны $\chi=5-10 \cdot 10^{-5}$ СИ,
в т.ч. карбонатные и хемогенные $\chi=4 \cdot 10^{-5}$ СИ,

Магматические породы: χ зависит от состава. Содержание ферромагнетиков повышается от кислых к основным и ультра-основным г.п.

Наименее магнитны - граниты: $\chi_{\text{ср}}=0-0.4 \cdot 10^{-3}$ СИ,

- диориты: $\chi_{\text{ср}}=2-4 \cdot 10^{-3}$ СИ,

- габбро: $\chi_{\text{ср}}=2-8 \cdot 10^{-3}$ СИ,

- пироксениты $\chi_{\text{ср}}=2-25 \cdot 10^{-3}$ СИ.

Ультраосновные породы: неизменные разности – слабомагнитны, т.к. большая часть Fe входит в состав силикатов. Но при серпентинизации этих г.п. часть высвобождаемого Fe преобразуется в магнетит.

Магнитные аномалии

$$\text{"Нормальное поле Земли"} = \sum (T_{\text{диполя}} + T_{\text{мировых аномалий}} + T_{\text{поле эл токов ионосферы}})$$

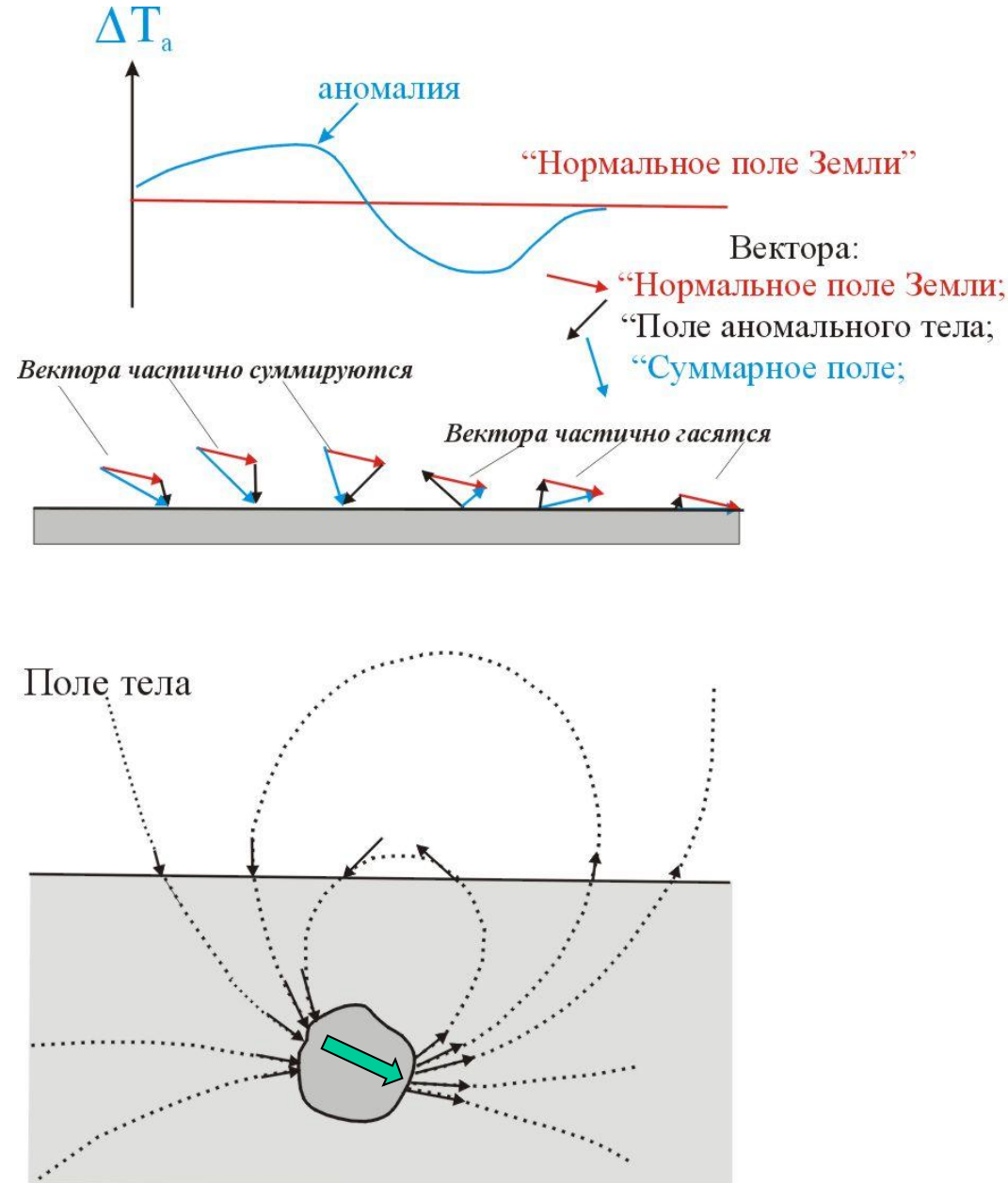
- Число мировых аномалий от 4 до 6.
- Разработаны карты «Нормального поля Земли» с осредненными значениями по трапциям $2^0 \times 1^0$. ты пересчитываются через 5-10 лет.
- Магнитная аномалия – отклонение измеренного геомагнитного поля от «Нормального поля Земли».

Вычисляются аномалии:

- модуля и полного вектора напряженности $\Delta T_a = T - T_n$
-вертикальной составляющей $\Delta Z_a = Z - Z_n$
-горизонтальной составляющей $\Delta H_a = H - H_n$

Аномалия погребенного тела

- Реальное поле представляет собой сумму двух векторов:
 - «нормальное поле Земли»,
 - поле геологического тела (тел).
- На одних участках вектора близки по направлениям – суммарный вектор становится длиннее (положительная часть аномалии);
- На других участках вектора нормального поля и поля тела имеют разные направления – суммарный вектор становится короче (отрицательная часть аномалии).
- Вывод:
Аномалия погребенного тела зависит от направления и интенсивности поля Земли (т.е. широты) и направления и интенсивности тела.



Измерения магнитного поля

• Для измерения магнитного поля используются магнитометры:

- протонные,
- квантовые,
- феррозондовые и др.

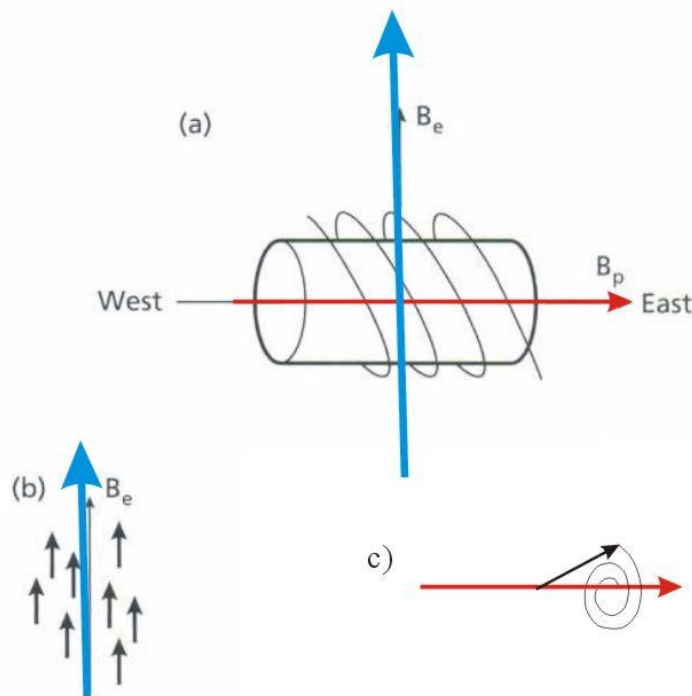
• Протонные магнитометры используются для измерений модуля полного вектора напряженности магнитного поля.

Ядра водорода (или углеводорода (керосин)) располагаются в центре атома и имеют положительный заряд – маленький магнит.

Главный элемент системы – сосуд с керосином помещенный в соленоид.

а) С помощью соленоида вокруг сосуда создается сильное магнитное поле \gg поля Земли. Направление поля соленоида перпендикулярно полю Земли.

б) При включении поля соленоида протоны жидкости выстраиваются вдоль направления этого поля.



с) После выключения поля соленоида элементарные магнетики начинают подстраиваться под поле Земли. Наведенный момент протонов начинает вращаться (процессирует) вокруг оси поля Земли как волчек (гороскоп) в течении нескольких секунд.

Напряженность поля = f (частоты процессии)

available -- reflecting Overhauser effect

Внешний вид протонного магнитометра

