

Лекция (13.10.2020) Магнитное поле Земли

Данная тема предполагает изучить следующие вопросы:

Происхождение магнитного поля Земли?

Главные элементы магнитного поля?

1. О происхождении магнитного поля Земли.

Происхождение магнитного поля Земли пытаются объяснить различными причинами, связанными с внутренним строением Земли. Наиболее достоверной и приемлемой гипотезой, объясняющей магнетизм Земли, является гипотеза вихревых токов в ядре. Эта гипотеза основана на том установленном геофизическом факте, что на глубине 2900 км под мантией (оболочкой) Земли находится "жидкое" ядро с высокой электрической проводимостью. Благодаря так называемому гиромангнитному эффекту и вращению Земли во время ее образования могло возникнуть очень слабое магнитное поле. Наличие свободных электронов в ядре и вращение Земли в таком слабом магнитном поле привело к индуцированию в ядре вихревых токов. Эти токи, в свою очередь, создают (регенерируют) магнитное поле, как это происходит в динамомашинах. Увеличение магнитного поля Земли должно привести к новому увеличению вихревых потоков в ядре, а последнее - к увеличению магнитного поля и т.д. Процесс подобной регенерации длится до тех пор, пока рассеивание энергии вследствие вязкости ядра и его электрического сопротивления не скомпенсируется добавочной энергией. Магнитометрическая, или магнитная, разведка (сокращенно магниторазведка) - это геофизический метод решения геологических задач, основанный на изучении магнитного поля Земли. Магнитные явления и наличие у Земли магнитного поля были известны человечеству еще в глубокой древности. Так же давно эти явления использовались людьми для практической деятельности (например, применение компаса). Со второй половины XIX в. измерение напряженности магнитного поля проводилось для поисков магнитных руд. Однако до сих пор природа как геомагнитного, так и гравитационного поля не выяснена.

Основными параметрами геомагнитного поля являются полный вектор напряженности и его составляющие по осям координат. Значения параметров магнитного поля Земли зависят, с одной стороны, от намагниченности всей Земли как космического тела (нормальное поле), а с другой стороны, разной интенсивности намагничения геологических формаций, обусловленной различием магнитных свойств пород и напряженности магнитного поля Земли как в настоящее время, так и в прошедшие геологические эпохи (аномальное поле). От других методов разведочной геофизики магниторазведка отличается наибольшей производительностью (особенно аэромагниторазведка).

Магниторазведка является наиболее эффективным методом поисков и разведки железорудных месторождений. Она широко применяется и при геологическом картировании, структурных исследованиях, поисках полезных ископаемых, изучении геологической среды. Магнитные методы применяются не только для разведки, но и для глобальных исследований геомагнетизма и палеомагнетизма. Глубинность магниторазведки не превышает 50 км.

4. Основы теории геомагнитного поля и магниторазведки

4.1. Магнитное поле Земли и его изменения на земной поверхности и во времени

4.1.1. Главные элементы магнитного поля.

В любой точке земной поверхности существует магнитное поле, которое определяется полным вектором напряженности T . Вдоль вектора T устанавливается подвешенная у центра тяжести магнитная стрелка. Проекция этого вектора на горизонтальную поверхность и вертикальное направление, а также углы, составленные этим вектором с координатными осями, носят название главных элементов магнитного поля (рис. 2.1).

Если ось x прямоугольной системы координат направить на географический север, ось y - на восток, а ось z - по отвесу вниз, то проекция полного вектора T на ось z называется вертикальной составляющей и обозначается Z . Проекция полного вектора T на горизонтальную плоскость называется горизонтальной составляющей (H). Направление H совпадает с магнитным меридианом. Проекция H на ось x называется северной (или южной) составляющей; проекция H на ось y называется восточной (западной) составляющей. Угол между осью x и составляющей H называется склонением и обозначается D . Принято считать восточное склонение положительным, западное - отрицательным. Угол между вектором T и горизонтальной плоскостью называется наклонением и обозначается J . При наклоне вниз северного конца стрелки наклонение называется северным (или положительным), при наклоне южного конца стрелки - южным (или

отрицательным). Взаимосвязь полученных элементов магнитного поля Земли выражается с помощью формул:

$$H = T \cos J, \quad Z = T \sin J, \quad Z = H \operatorname{tg} J, \quad T^2 = H^2 + Z^2. \quad (2.1)$$

Семь элементов земного магнитного поля можно выразить через любые три составляющие. При магнитной разведке измеряют лишь одну-две составляющие поля (как правило, Z , H или T).

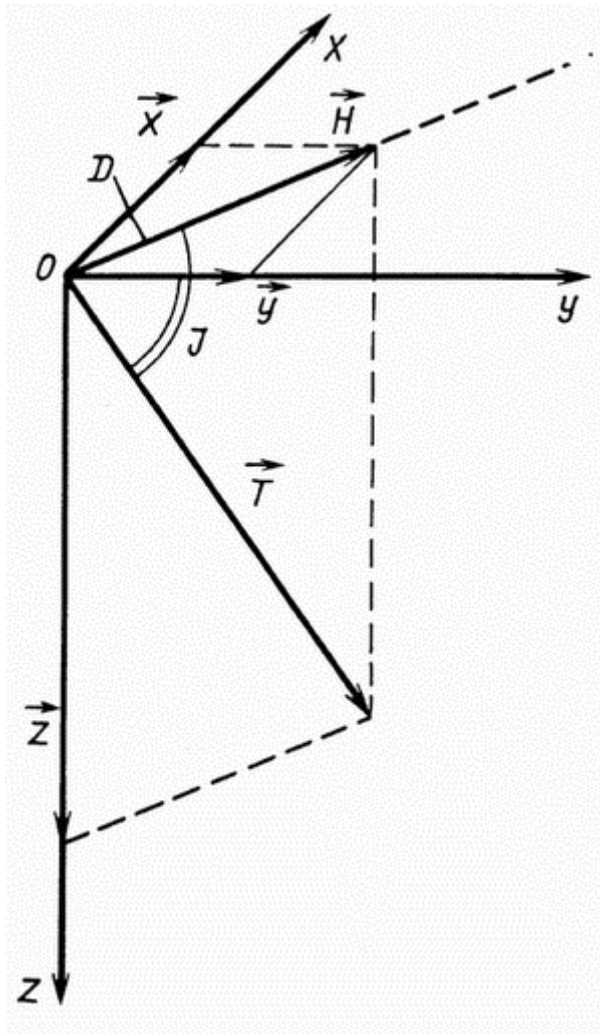


Рис. 2.1. Элементы земного магнитного поля

Распределение значений элементов магнитного поля на земной поверхности обычно изображается в виде карт изолиний, т.е. линий, соединяющих точки с равными значениями того или иного параметра. Изолинии склонения называются изогонами, изолинии наклонения - изоклинами, изолинии H или Z - соответственно изодинамами H или Z . Карты строят на 1 июля и называют их картами эпохи такого-то года. Например, на рис. 2.2 приведена карта эпохи 1980 г.

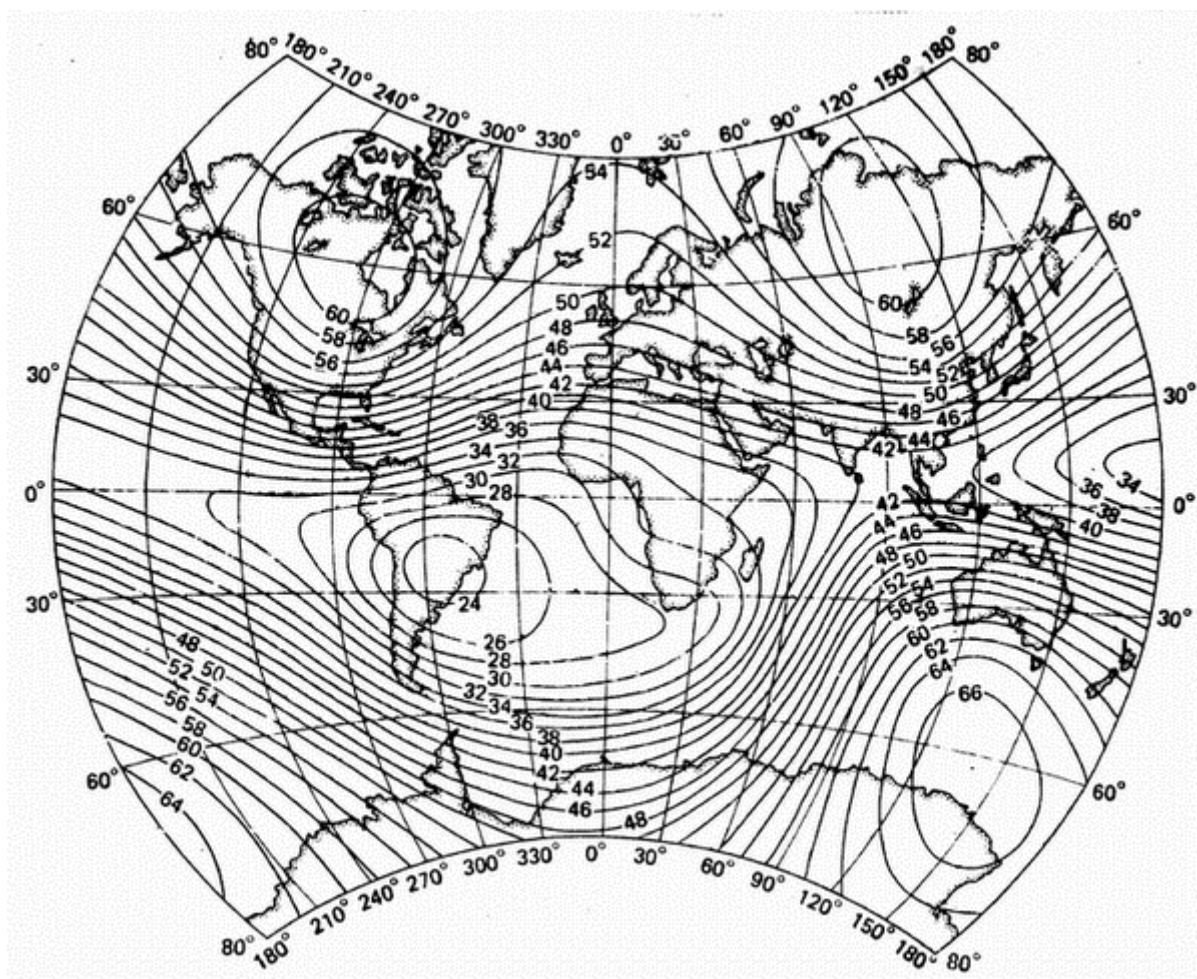


Рис. 2.2. Полная напряженность магнитного поля Земли для эпохи 1980 г. (из книги П.Шарма "Геофизические методы в региональной геологии")

4.1.2. Единицы измерений.

Единицей напряженности геомагнитного поля (Т) в системе Си является ампер на метр (А/м). В магниторазведке применялась и другая единица Эрстед (Э) или гамма (γ), равная 10^{-5} Э ($1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Э}$). Однако практически измеряемым параметром магнитного поля является магнитная индукция (или плотность магнитного потока) $B = \mu T$, где μ - магнитная проницаемость среды.

Вывод: Изучили магнитное поле Земли, основы теории геомагнитного поля и магниторазведки

Лекция (20.10.2020) Магнитные свойства горной породы

Данная тема предполагает изучить следующие вопросы:

Магнитные свойства горной породы?

магнитные свойства горной породы

-Свойства, характеризующие возникновение, распределение, изменение, поглощение и преобразование магнитного поля в горной породе

При движении электрически заряженных частиц, между ними, возникает, особого рода взаимодействие которое называется магнетизм. Например, при вращении электрона (отрицательно электрически заряженная частица) вокруг атомного ядра, возникает орбитальный магнитный момент. Минимальный орбитальный момент определяется выражением $\mu_B = (h \times e) / 2m$ и называется магнетоном Бора (h – постоянная Планка деленная на 2π , e – заряд электрона, m – его масса). Кроме того, электрон вращается вокруг собственной оси, создавая при этом дополнительный спиновый магнитный момент (от английского слова spin - вращаться). Из этого примера следует два вывода: первый - магнитными свойствами обладают все вещества, второй - электричество и магнетизм являются проявлением одной силы – электромагнетизма (теория Максвелла).

Пространство, в котором, действуют силы магнетизма, называется магнитным полем. Количественной характеристикой магнитного поля является его напряженность и называется магнитной индукцией (B). В вакууме величина магнитной

индукции может быть определена по закону Био-Савара-Лапласа. Этот закон ниже приведен в модульной форме.

$$dB = (i \times dL \times \sin(\alpha)) / (k \times r^2)$$

dB – магнитная индукция, которая создается проводником длиной dL , по которому протекает ток силой i . В системе СИ $k = 4\pi$. α – угол между dL и направлением на точку, где определяется dB , r – расстояние до точки где определяется B .

Согласно приведенному выше закону электрический ток является единственным источником магнитного поля.

Для объяснения намагничения тел Ампер предложил, что в молекулах вещества циркулируют круговые токи, которые обладают магнитным моментом и создают в окружающем пространстве магнитное поле. В отсутствие внешнего поля ($H = 0$) молекулярные токи ориентированы хаотично, вследствие чего обусловленный ими результирующий магнитный момент равен нулю ($\sum P_{mi} = 0$). Под действием поля ($H \neq 0$) магнитные моменты молекул приобретают преимущественную ориентацию в одном направлении, вследствие чего суммарный магнитный момент вещества становится отличным от нуля – вещество намагничивается.

Намагниченность магнетика принято характеризовать магнитным моментом единицы объема. Эту величину называют вектором намагничения (или намагниченности) $J = \sum P_{mi} / \Delta V$ (суммирование производится по объему ΔV). Величина вектора намагничения зависит от намагничивающего поля и может быть выражена следующим соотношением:

$$J = \chi_m * H, \quad (1)$$

где χ_m - магнитная восприимчивость.

Таким образом, для описания магнитного поля а магнетиках пользуются тремя векторами: вектором намагничения (J , А/м), вектором напряженности поля (H , А/м) и вектором магнитной индукции (B , Тесла (Тл)). Они взаимосвязаны следующим образом:

$$B = \mu_0(H + J) \quad (2)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, равная $4\pi \times 10^{-7}$ Г/м.
Или с учетом (1):

$$B = \mu_0 (H + \chi_m H) = \mu_0(1 + \chi_m)H.$$

Величина $(1 + \chi_m)$ называется относительной магнитной проницаемостью вещества и обозначается μ . Таким образом, в изотропных средах

$$B = \mu_0 \mu H \quad (3)$$

Магнитная восприимчивость χ_m бывает как положительной, так и отрицательной. Поэтому магнитная проницаемость μ может быть как больше, так и меньше единицы.

В зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости все магнетики подразделяются на три группы:

1) диамагнетики, у которых $\chi_m < 0$ и мала по абсолютной величине (10^{-6});

2) парамагнетики, у которых $\chi_m > 0$ и тоже мала ($10^{-5} : 10^{-3}$);

3) ферромагнетики, у которых $\chi_m \gg 0$ и достигает очень больших значений ($10^2 - 10^5$). Кроме того, в отличие от диа- и парамагнетиков, для которых χ_m не зависит от H , магнитная восприимчивость ферромагнетиков является функцией напряженности магнитного поля.

Таким образом, в изотропных веществах вектор намагниченности может как совпадать по направлению с H (пара- и ферромагнетики), так и быть направленным в противоположную сторону (диамагнетики).

Гипотеза Ампера о природе магнетизма получила свое объяснение после того, как было открыто атомное ядро и утвердилось планетарная модель атома. Движение электрона вокруг ядра атома по замкнутой орбите эквивалентно круговому току, который можно характеризовать магнитным моментом H_m , называемым орбитальным магнитным моментом электрона. Кроме того, электрон имеет собственный магнитный момент, называемый спиновым магнитным моментом. Магнитный момент многоэлектронного атома будет векторной суммой орбитальных и спиновых моментов всех его электронов.

При суммировании магнитных моментов атома возможны два варианта: суммарный магнитный момент атома равен нулю или не равен нулю.

Влияние магнитного поля на движение электронов в атомах вещества упрощенно состоит в следующем. В магнитном поле на движущийся электрон помимо силы F_e со стороны ядра действует еще сила Лоренца F_l (рис.1). Если плоскость орбиты электрона перпендикулярна магнитному полю H , то это приводит к изменению центростремительной силы, действующей на электрон, и, как следствие этого, к изменению угловой скорости его вращения по орбите. Если же орбита электрона расположена произвольным образом относительно вектора H , так, что орбитальный магнитный момент электрона составляет с вектором H угол

α , то влияние поля оказывается более сложным. В этом случае вся орбита приходит в такое движение, при котором угол α сохраняется неизменным, а вектор P_m вращается вокруг направления H с определенной угловой скоростью. Такое движение в механике называется прецессией. Изменение угловой скорости вращения электрона или, в общем случае, появление прецессии эквивалентно дополнительному орбитальному току ΔI_{orb} . (рис. 1а, б), которому соответствует индуцированный орбитальный момент электрона ΔP_m . Этот вектор противоположен по направлению вектору напряженности магнитного поля H . Если в атоме имеется несколько электронов, то общий индуцированный орбитальный момент атома равен векторной сумме индуцированных орбитальных магнитных моментов всех электронов: $\Delta P_m = \sum \Delta P_{mi}$. С помощью этого результата, примененного к атому любого вещества, помещенного в магнитное поле, может быть объяснено явление диа- и парамагнетизма.. У диамагнетиков магнитные моменты атомов при отсутствии магнитного поля ($H = 0$) равны нулю. При внесении диамагнитного вещества в магнитное поле в каждом его атоме

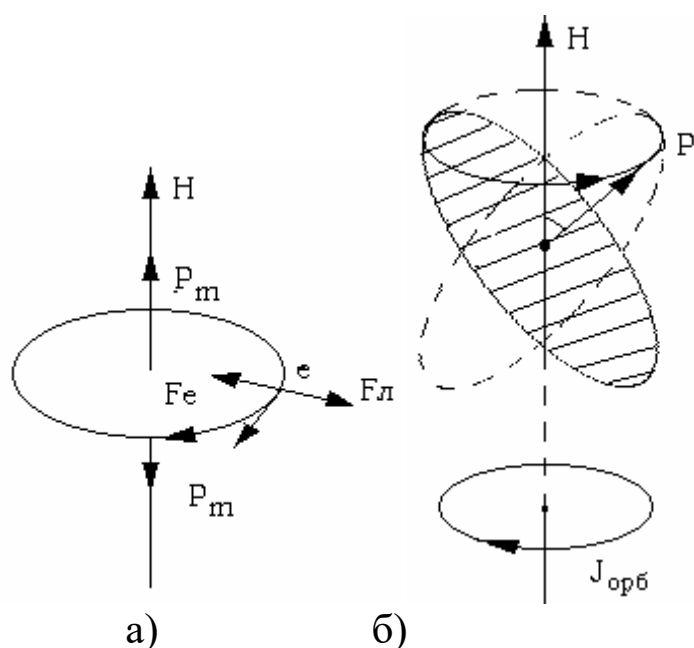


Рис. 1. Возникновение индуцированного магнитного момента в случаях: а) плоскость орбиты перпендикулярна вектору H ; б) нормаль к плоскости орбиты составляет угол α с направлением вектора H индуцируется магнитный момент, направленный противоположно вектору H напряженности магнитного поля, и, следовательно, вектор намагничения J также направлен противоположно вектору H .

У парамагнетиков магнитные моменты атомов P_m при отсутствии магнитного поля не равны нулю. В результате прецессии также индуцируется магнитный момент ΔP_m , направленный против поля. Однако решающую роль в намагничивании парамагнетика играют столкновения атомов, происходящие в результате теплового движения. Причем толчки в направлении прецессионного вращения увеличивают угол между P_m и H , а в направлении против прецессионного вращения уменьшают его. Толчки первого типа размагничивают, а второго - намагничивают парамагнетик. Эффект намагничивания будет преобладать над эффектом размагничивания, так как толчки против прецессионного вращения в среднем сильнее толчков противоположного направления (подобно тому, как сила сопротивления, испытываемая человеком, будет больше, когда он бежит против ветра, а не по ветру). Возникающий при этом суммарный магнитный момент парамагнетика $\sum P_{mi}$ (направленный по полю) бывает значительно больше, чем суммарный индуцированный (в результате прецессии) момент $\sum \Delta P_{mi}$ (направленный против поля). Поэтому результирующий

магнитный момент оказывается положительным, и вектор намагничения J направлен вдоль магнитного поля H .

Особый класс магнетиков образуют вещества, у которых магнитная проницаемость в сотни и тысячи раз превышает магнитную проницаемость обычных материалов. Эти вещества получили название ферромагнетиков. К ним относятся железо, никель, кобальт и их соединения и сплавы. Другой отличительной особенностью ферромагнетиков является то, что их намагниченность J зависит от H нелинейно, причем при больших полях наступает состояние магнитного насыщения. Поскольку зависимость J от H нелинейна, то и магнитная восприимчивость χ_m зависит от напряженности. Кроме нелинейной зависимости между J и H (или между B и H) для ферромагнетиков характерно также наличие явления гистерезиса (рис.2). Это явление заключается в том, что процесс намагничения ферромагнетика необратим в большей своей части, поэтому кривая намагничения не совпадает с кривой размагничения.

На рис. 2 изображена зависимость магнитного момента M ферромагнитного образца от напряжённости H внешнего магнитного поля (кривая намагничивания). В достаточно сильном магнитном поле образец намагничивается до насыщения (при дальнейшем увеличении поля значение M практически не изменяется, точка A). При этом образец состоит из одного домена с магнитным моментом насыщения M_s , направленным по полю. При уменьшении напряжённости внешнего магнитного поля H магнитный момент образца M будет уменьшаться по кривой I преимущественно за счёт возникновения и роста доменов с магнитным моментом, направленным против поля. Рост доменов обусловлен движением доменных стенок. Это движение затруднено из-за наличия в образце различных дефектов (примесей, неоднородностей и т.п.), которые закрепляют доменные стенки в некоторых положениях; требуются достаточно сильные магнитные поля для того, чтобы их сдвинуть. Поэтому при уменьшении поля H до нуля у образца сохраняется т. н. остаточный магнитный момент M_r (точка B).

Образец полностью размагничивается лишь в достаточно сильном поле противоположного направления, называемом коэрцитивным полем (коэрцитивной силой) H_c (точка C). При дальнейшем увеличении магнитного поля обратного направления образец вновь

намагничивается вдоль поля до насыщения (точка D). Перемагничивание образца (из точки D в точку A) происходит по кривой II . Т. о., при циклическом изменении поля кривая, характеризующая изменение магнитного момента образца, образует петлю магнитного Γ . Если поле H циклически изменять в таких пределах, что намагниченность насыщения не достигается, то получается непереломная петля магнитного Γ . (кривая III). Уменьшая амплитуду изменения поля H до нуля, можно образец полностью размагнитить (прийти в точку O). Намагничивание образца из точки O происходит по кривой IV .

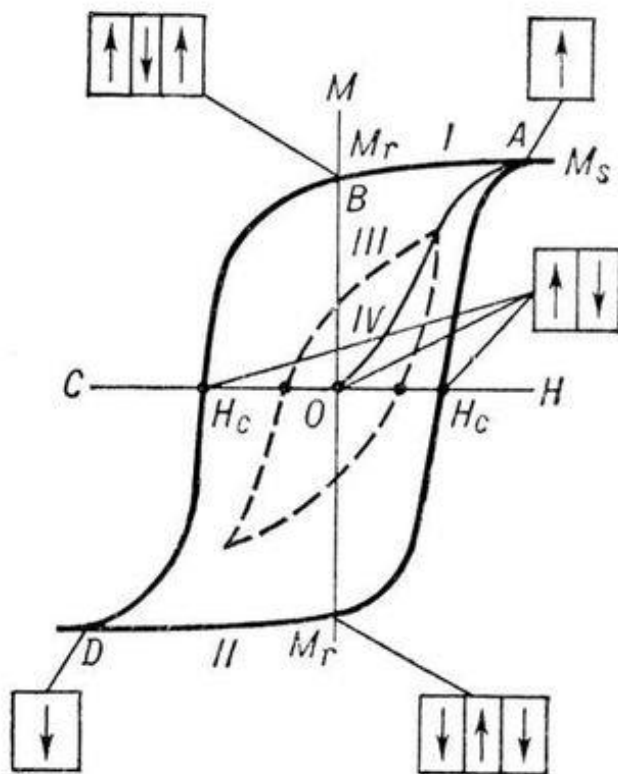
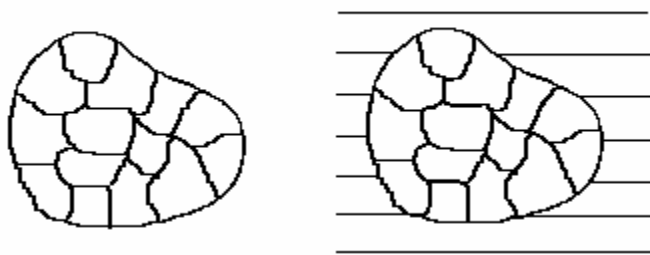


Рис. 2. Петля гистерезиса ферромагнетика

Опытами Эйнштейна и де Гааза было доказано, что ответственным за магнитные свойства ферромагнетиков являются собственные (спиновые) магнитные моменты электронов (а не

орбитальные, как у диа- и парамагнетиков). Атомы элементов, обладающих ферромагнитными свойствами (Fe, Co, Ni), имеют некоторую особенность. В них нарушается последовательность заполнения мест в оболочках и слоях: прежде чем полностью “застроится” нижняя оболочка, начинается заполнение выше расположенной оболочки. В результате электронные спины некоторых внутренних оболочек оказываются нескомпенсированными. Таким образом, ферромагнитными свойствами могут обладать только такие вещества, в атомах которых имеются недостроенные внутренние электронные оболочки. Кроме того, исследования ферромагнитных кристаллов позволили выявить в них области с самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью - так называемые домены, линейные размеры которых 1-10 мкм (рис.4).



а)

б

Рис 4. Доменная структура ферромагнетика:

а) в отсутствие внешнего поля,

б) при наличии внешнего поля

В пределах каждого домена нескомпенсированные спины ориентированы в одном направлении, то есть вещество в домене находится в состоянии магнитного насыщения и обладает определенным магнитным моментом. Направления этих моментов для разных доменов различны, так что в отсутствие внешнего поля суммарный момент всегда равен нулю. Силы, которые заставляют магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу, называются обменными. Их объяснение в рамках классической физики невозможно (дается только квантовой механикой). Если поместить ферромагнетики во внешнее магнитное поле, то вначале, при слабых полях, наблюдается

смещение границ доменов. В результате этого происходит увеличение размеров тех доменов, магнитные моменты которых составляют с направлением поля H меньший угол за счет доменов, у которых угол между M и H больше. При увеличении H имеет место поворот магнитных моментов доменов в направлении поля. При этом моменты электронов в пределах домена поворачиваются одновременно, без нарушения параллельности друг другу. Эти процессы являются необратимыми, что и служит причиной гистерезиса.

Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура T_c , при которой области спонтанного намагничивания распадаются и вещество утрачивает ферромагнитные свойства (становится обычным парамагнетиком). Эта температура называется точкой Кюри.

Вывод: В этой лекции мы рассмотрели «Петля гистерезиса ферромагнетика» и изучили магнитные свойства горной породы.