

Лабораторная работа 3.1.1

Измерение магнитного поля Земли

Ромачевский А. Б01–404
МФТИ, Долгопрудный 2025

Введение

Цель работы: определить характеристики шарообразных неодимовых магнитов и, используя составляющие индукции магнитного поля Земли и магнитное наклонение.

Оборудование: 12 одинаковых неодимовых магнитных шариков, тонкая нить для изготовления крутильного маятника, медная проволока диаметром (0,5-0,6) мм, электронные весы, секундомер, измеритель магнитной индукции АТЕ-8702, штангенциркуль, брусок из немагнитного материала (25X30X60 мм³), деревянная линейка, штатив из немагнитного материала; дополнительные неодимовые магниты-шарики (20 шт.) и неодимовые магниты в форме параллелепипедов (2 шт.), набор гирь и разновесов.

Измерительные погрешности:

Погрешность электронных весов: $\varepsilon_m = 0,001$ г

Погрешность измерения времени: $\varepsilon_t = 0,6$ с

Погрешность измерения магнитной индукции: $\varepsilon_B =$

1. Теоретические сведения

Основные формулы

Простейший магнитный диполь может быть образован витком с током или постоянным магнитом. По определению, магнитный момент m тонкого витка площадью S с током I равен $\mathbf{m} = \frac{IS}{c}\mathbf{n}$, где $\mathbf{S} = S\mathbf{n}$ - вектор площади контура, образующий с направлением тока правовинтовую систему, \mathbf{n} - единичный вектор нормали к площадке. Если размеры контура с током или магнитной стрелки малы по сравнению с расстоянием до диполя, то соответствующий магнитный диполь называют *элементарным*, или *точечным*.

Магнитное поле точечного диполя определяется по формуле, аналогичной формуле для поля элементарного электрического диполя:

$$\mathbf{B} = \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5} - \frac{\mathbf{m}}{r^3}$$

Во внешнем магнитном поле с индукцией \mathbf{B} на точечный магнитный диполь \mathbf{m} действует механический момент сил $\mathbf{M} = [\mathbf{m}, \mathbf{B}]$. При этом потенциальная энергия которой обладает диполь с постоянным \mathbf{m} , равна $W = -(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B})$. Когда диполь ориентирован вдоль внешнего поля, он находится в состоянии *равновесия*.

В *неоднородном* внешнем поле выражение для энергии постоянного диполя сохраняется. При этом кроме момента сил на диполь действует ещё и сила

$$\mathbf{F} = -\nabla W = (\mathbf{m} \cdot \nabla)\mathbf{B}$$

Таким образом из вышесказанного следует, что *свободный* магнитный диполь в неоднородном магнитном поле ориентируется вдоль силовых линий магнитного поля и втягивается в область более сильного поля, поскольку это ведёт к уменьшению энергии диполя.

Выражения выше, позволяют рассчитать силу взаимодействия магнитов с моментами \mathbf{m}_1 и \mathbf{m}_2 . Когда моменты двух небольших магнитов направлены вдоль соединяющей их прямой: $\mathbf{m}_{1,2} \parallel \mathbf{r}$, где \mathbf{r} - радиус-вектор между ними, они взаимодействуют с силой

$$F_{12} = \mathbf{m}_1 \frac{\partial B_2}{\partial r} = \mathbf{m}_1 \frac{\partial(2\mathbf{m}_2/r^3)}{\partial r} = -\frac{6\mathbf{m}_1\mathbf{m}_2}{r^4} \text{ (ед. СГС)}$$

Если магнитные моменты направлены перпендикулярно соединяющей их прямой: $\mathbf{m}_{1,2} \perp \mathbf{r}$, то нетрудно показать, что сила их взаимодействия окажется в два раза меньшей и будет иметь противоположный знак:

$$F_{12} = \frac{3\mathbf{m}_1\mathbf{m}_2}{r^4} \text{ (ед. СГС)}$$

Экспериментальная установка

2. Ход работы

Определение магнитного момента, намагниченности и остаточной магнитной индукции вещества магнитных шариков

Метод А

Вычислим характеристики шаров. Взвесим их, вычислим r_{\max} - максимальное расстояние, на котором шарики удерживают друг друга в поле силы тяжести Земли. Для этого воспользуемся специальным стэндом (рис.2) Измерим для 4 пар и усредним. Измерим диаметры шариков.

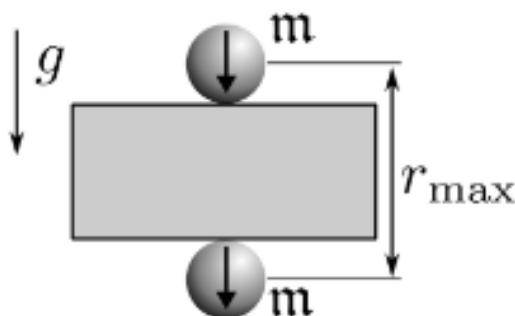


Рис. 1: Стэнд для определения r_{\max}

$$r_{\max} = 2,5 \text{ см}$$

Теперь измерим диаметры шариков. Вычислим магнитный момент и намагниченность по формулам, затем вычислим их с помощью магнитометра. Результаты измерений занесем в таблицу (Таблица 1).

С помощью магнитометра изерим индукцию на полюсах и получим результат, несколько отличающийся от полученного теоретически: $B_{\text{Avg}} = 1950 \text{ Гс}$. Расхождение небольшое, поэтому проводить повторные измерения момента не будем.

Метод В

Составим цепочку из 20 шариков и с помощью неодимовых магнитов в форме параллелепипедов, подсоединим цепочку у к гире и разновесам.

Добавляя или удаляя шарики, подберем минимальный вес F системы цепочки с гирей, при котором она отрывается от верхнего шарика:

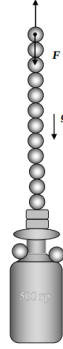


Рис. 2: Определение магнитного момента методом В

Получаем $F = 2.3\text{Н}$. $F_0 = F/1.08 = 2.1\text{Н}$. Магнитный момент получим из формулы $P_m = d^2 \sqrt{\frac{F_0}{6}}$: $P_m = 1983\text{Гс}$ ($\varepsilon_{P_m} = 0.04$).

Этот результат совпадает со снятым магнитометром значением, погрешность метода меньше в 2 раза, поэтому метод В можно считать лучшим способом определения магнитного момента шаров.

N	m, г	ε_m	d, см	ε_d	$P_m, \frac{\text{эрг}}{\text{Гс}}$	ε_p	$\rho, \frac{\text{Гс}}{\text{см}^3}$	ε_ρ	$B_p, \text{Гс}$	ε_{B_p}
1	0.831	0.001	0.58	0.01	72.3	0.06	354.0	0.07	2223.3	0.07
2	0.846	0.001	0.59	0.01	72.1	0.06	335.4	0.07	2106.3	0.07
3	0.844	0.001	0.58	0.01	72.4	0.06	354.5	0.07	2226.4	0.07
4	0.869	0.001	0.59	0.01	72.1	0.06	335.4	0.07	2106.3	0.07
5	0.818	0.001	0.57	0.01	72.3	0.06	373.0	0.07	2342.4	0.07
6	0.834	0.001	0.58	0.01	72.2	0.06	353.5	0.07	2220.3	0.07
7	0.843	0.001	0.59	0.01	72.2	0.06	335.9	0.07	2109.3	0.07
8	0.835	0.001	0.58	0.01	72.1	0.06	353.1	0.07	2217.2	0.07
9	0.793	0.001	0.55	0.01	72.3	0.06	415.2	0.07	2607.4	0.07
10	0.846	0.001	0.59	0.01	72.3	0.06	336.3	0.07	2112.2	0.07
11	0.846	0.001	0.58	0.01	72.3	0.06	354.0	0.07	2223.3	0.07
12	0.838	0.001	0.57	0.01	72.4	0.06	373.5	0.07	2345.7	0.07
Avg	0.837	-	0.58	-	72.25	-	355.3	-	2236.7	-

Таблица 1: Результаты измерений параметров шаров методом А

Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Соберем установку: крутильный маятник из шариков.

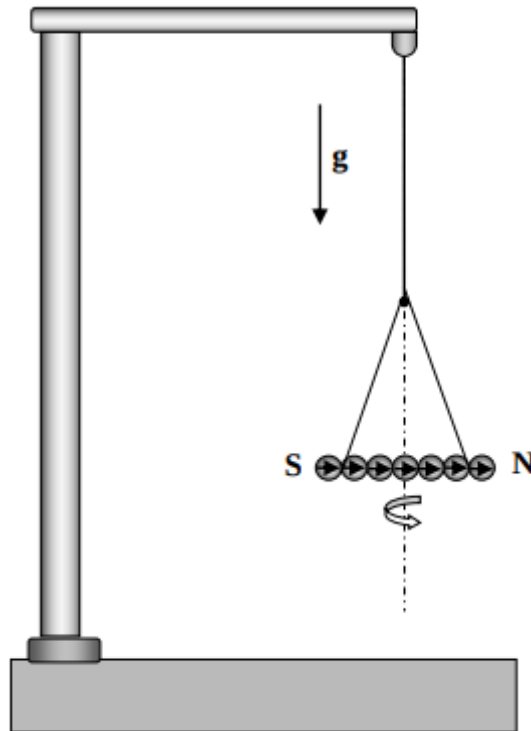


Рис. 3: Схема установки для определения горизонтальной составляющей поля Земли.

Будем исследовать зависимость периода колебаний от количества шаров в магнитной стрелке.

Построим график зависимости $T(n)$, аппроксимируем прямой $T = kn$:

Из него по формуле $B_h = \pi^2 m d^2 / 3 k^2 P_m$ найдем величину горизонтальной составляющей магнитного поля.

$$k = 0.38 \pm 0.02$$

$$B_h = 0.11 \pm 0.1 \text{ Гс}$$

Проведем так же эксперимент для замкнутого кольца из шариков: $T = 2.4 \text{ с}$

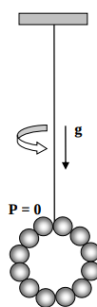
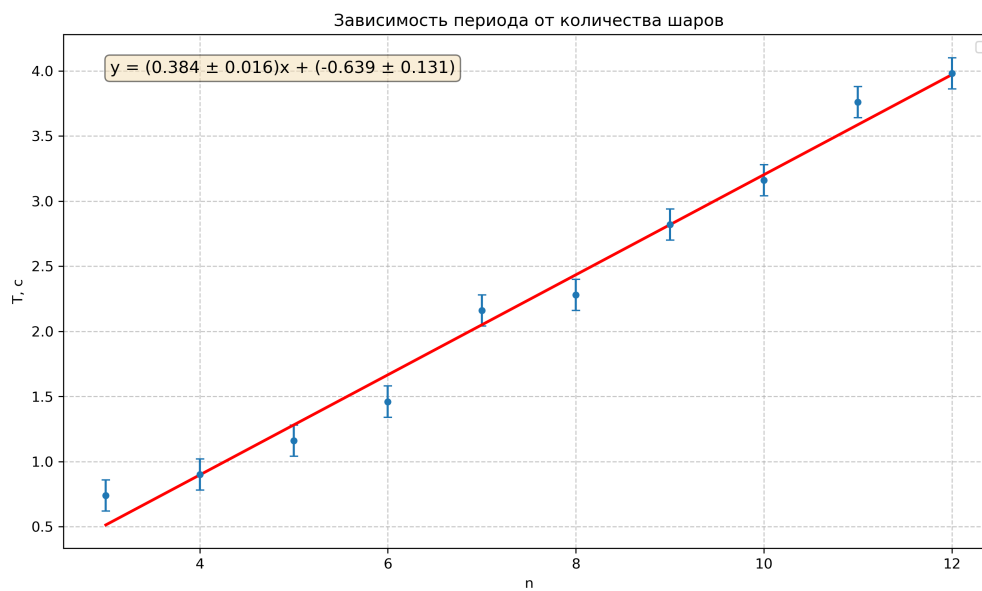


Рис. 4: магнитная стрелка, свернутая в кольцо

Определение вертикальной составляющей магнитного поля Земли

Снова изготовим стрелку из шаров, подвесим ее за середину на нить. С помощью весов будем определять массу уравновешивающего груза. Таким образом, измерим M , действующий со стороны Земли на стрелку для четных размеров стрелки в шариках.

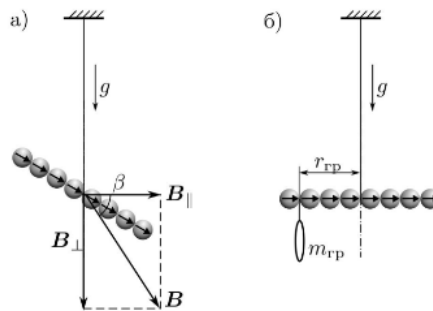
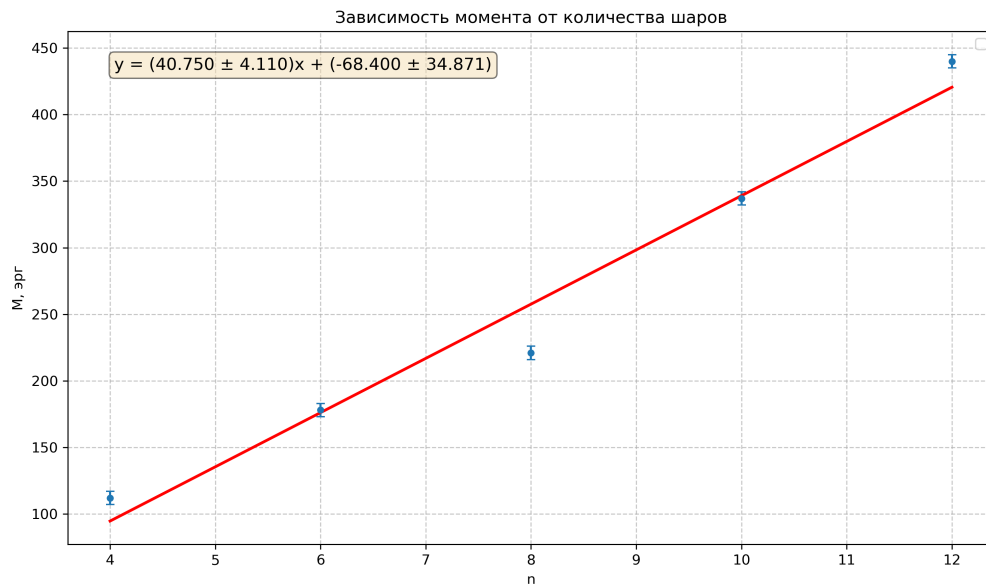


Рис. 5: Способ определения момента, действующего со стороны Земли

Построим график $M(n)$, аппроксимируем его прямой $M(n) = An$:



Получаем $B_v = \frac{M}{nm} = (0.37 \pm 0.3)\text{Гс}$

Сравним значения с табличными: $B_e = 0.38\text{Гс}$, $B_t = 0.5\text{Гс}$.

3. Выводы

Получились результаты, отличающиеся от табличных на 1-2 погрешности, поэтому эксперимент можно считать успешным.

Большую вклад в погрешность измерений второй и третьей части лабораторной внесла погрешность, возникающая из-за человеческой реакции (при измерении периода с таймером), поэтому в третьей части полученное значение поля Земли входит лишь в двойную погрешность от табличного.