

---

Московский Физико-Технический Институт  
(государственный университет)

Лабораторная работа по курсу общей физики № 3.1.3(121)

---

# Измерение магнитного поля Земли

---

**Автор:**

Баранников Андрей Б01-001



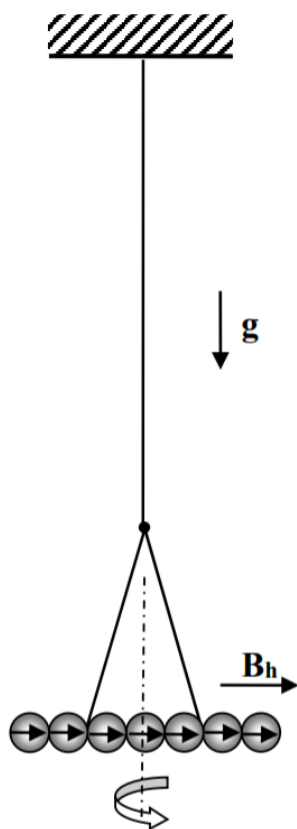
Долгопрудный, 2021

**Цель работы:** определить характеристики шарообразных неодимовых магнитов и, используя законы взаимодействия магнитных моментов с полем, измерить горизонтальную и вертикальную составляющие индукции магнитного поля Земли и магнитное наклонение.

**В работе используются:** 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 ( $25 \times 30 \times 60$  мм<sup>3</sup>), деревянная линейка, штатив из немагнитного материала; дополнительные неодимовые магнитные шарики (~ 20 шт.) и неодимовые магниты в форме параллелепипедов (2 шт.), набор гирь и разновесов.

## Экспериментальная установка

Измерение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли



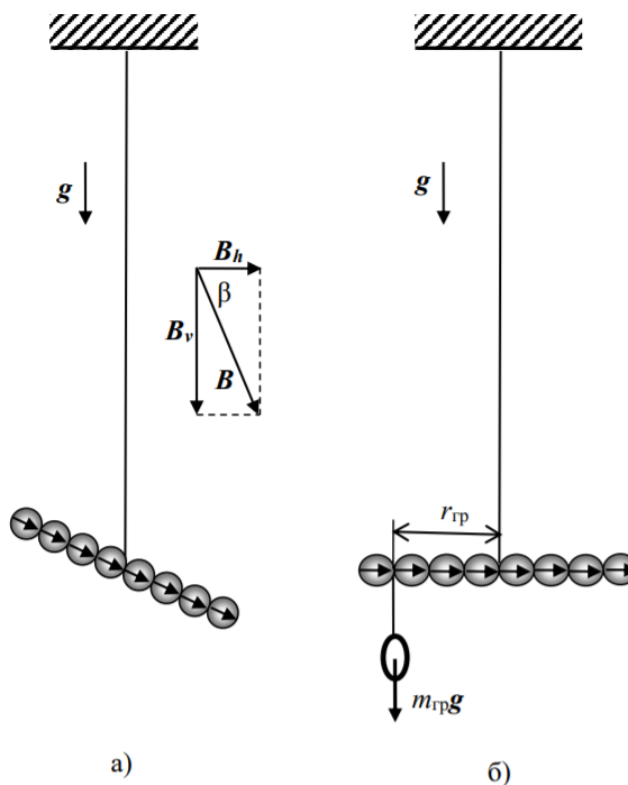
Магнитное поле Земли в настоящей работе определяется по периоду крутильных колебаний магнитной стрелки вокруг вертикальной оси.

Магнитная «стрелка» образована из сцепленных друг с другом противоположными полюсами шариков и с помощью  $\Lambda$ -образного подвеса подвешена в горизонтальном положении. Под действием вращательного момента магнитный момент «стрелки» выстроится вдоль горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в направлении Юг  $\rightarrow$  Север.

Период колебаний маятника оказывается пропорциональным числу шаров  $n$ , составляющих «стрелку»:

$$T(n) = n \cdot \pi \sqrt{\frac{md^2}{3P_m B_h}}.$$

## Измерение вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли.



Для измерения вертикальной составляющей вектора индукции поля Земли используется та же установка, что и для измерения горизонтальной составляющей с тем лишь отличием, что магнитная «стрелка» подвешивается на нити без  $\Lambda$ -образного подвеса. В этом случае магнитная «стрелка», составленная из чётного числа шариков и подвешенная на тонкой нити за середину, расположится не горизонтально, а под некоторым, отличным от нуля, углом к горизонту.

С помощью небольшого дополнительного грузика «стрелку» можно «выровнять», расположив её горизонтально: в этом случае момент силы тяжести груза относительно точки подвеса будет равен моменту сил, действующих на «стрелку» со стороны магнитного поля Земли.

Выпишем все необходимые формулы.

Сила взаимодействия двух небольших постоянных магнитов, направленных вдоль прямой, соединяющей их:

$$F = -6 \frac{P_m^2}{r^4}$$

индукция магнитного поля  $\vec{B}_p$  на полюсах однородно намагниченного шара связана с величиной намагниченности  $\vec{p}_m$  и остаточной магнитной индукцией  $\vec{B}_r$  формулой:

$$\vec{B}_p = (8\pi/3)\vec{p}_m = \frac{2}{3}\vec{B}_r.$$

В магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  на точечный магнитный диполь  $\vec{P}_m$  действует механический момент сил:

$$\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}$$

Период колебаний крутильного маятника в зависимости от количества шаров:

$$T(n) = n \cdot \pi \sqrt{\frac{md^2}{3P_m B_h}}$$

Момент силы тяжести, уравнивающего груза в зависимости от количества шаров:

$$M(n) = n \cdot P_m B_\nu$$

## Ход работы

### Задание № 1. Метод А.

1. Взвесим шарики и измерим диаметр. В результате  $m = 0,876$  г;  $d = 6$  мм
2. Выясним, на каком максимальном расстоянии шарики удерживают друг друга в поле тяжести Земли.  $r_{max} = 17$  мм
3. Рассчитаем величину магнитного момента магнетика  $P_m$ :

$$F = \frac{6P_m^2}{r_{max}^4} = mg \Rightarrow P_m = r_{max}^2 \sqrt{\frac{mg}{6}} = (1,7 \text{ см})^2 \sqrt{\frac{0,876 \text{ г} \cdot 980 \text{ см/с}^2}{6}} = 34,57 \text{ эрг/Гс}$$

4. Рассчитаем величину намагниченности материала шариков:

$$p_m = P_m/V = \frac{34,57 \text{ эрг/Гс}}{\frac{4}{3}\pi \cdot 0,3^3 \text{ см}^3} \approx 305 \text{ Гс}$$

5. Рассчитаем величину  $B_p$  магнитного поля на полюсах шарика и сравним расчётное значение с измеренным:

$$B_p = \frac{2P_m}{R^3} = \frac{2 \cdot 34,57 \text{ эрг/Гс}}{0,3^3 \text{ см}^3} \approx 2,56 \text{ кГс}$$

Значение, измеренное с помощью магнетометра АТЕ-8702:

$$B_p = 194 \text{ мТ} = 1,94 \text{ кГс}$$

6. Рассчитаю величину остаточной магнитной индукции:

$$B_r = 4\pi p_m = 4\pi \cdot 305 \text{ Гс} \approx 3,8 \text{ кГс}$$

## Задание № 1. Метод В.

7. Минимальный вес  $F$  системы с цепочки с гирей, при котором она отрывается от верхнего шарика:

$$F = 3,136 \text{ Н} \Rightarrow F_0 = \frac{F}{1,08} \approx 2,9 \text{ Н}$$

8.

$$F_0 = \frac{6P_m^2}{d^4} \Rightarrow P_m = \sqrt{\frac{F_0 \cdot d^4}{6}} = \sqrt{\frac{2,9 \cdot 10^5 \text{ дин} \cdot 0,6^4 \text{ см}^4}{6}} \approx 80 \text{ эрг/Гс}$$

9. Рассчитаю величину поля на полюсах:

$$B_p = \frac{2P_m}{R^3} = \frac{2 \cdot 80 \text{ эрг/Гс}}{0,3^3 \text{ см}^3} \approx 5,93 \text{ кГс}$$

10. По результатам вычисления магнитных моментов **точнее всего оказался Метод А.**

## Задание № 2

11. Оценим влияние упругости нити на период колебаний, для этого свернём стрелку в кольцо и возбудим крутильные колебания. В таком случае период колебаний будет  $T = 136,4 \text{ с}$  Очевидно, упругостью можно пренебречь.
12. Измерим зависимость  $T(n)$

n	3	5	7	9	11	12
T, с	0,92	1,51	2,18	2,80	3,35	3,76

Таблица 1: Зависимость периода колебаний  $T$  от количества магнитных шариков  $n$

13. Построю график  $T(n)$ :

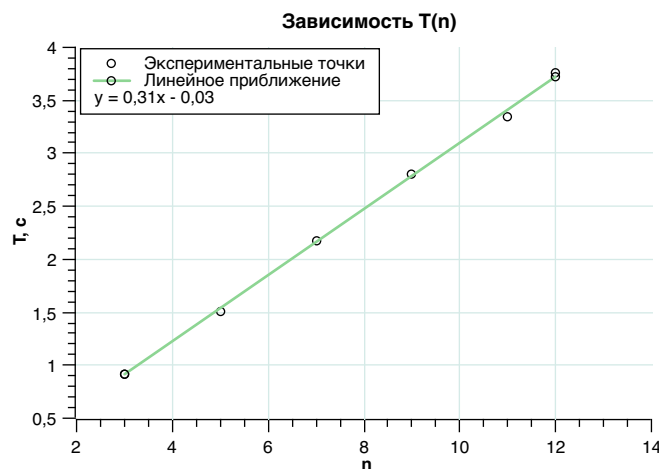


Рис. 1: График экспериментальной зависимости  $T(n)$

14. Аппроксимирую экспериментальную зависимость  $T(n)$ :

Получилась прямая  $T = 0,31n$ , соответственно, коэффициент наклона  $k = 0,31$

15. Рассчитаем величину горизонтальной составляющей магнитного поля Земли:

$$B_h = \pi^2 m d^2 / 3 k^2 P_m = \frac{\pi^2 \cdot 0,876 \text{ г} \cdot 0,36 \text{ см}^2}{3 \cdot 0,0961 \cdot 34,57 \text{ эрг/с}} = 0,3 \text{ Гс}$$

### Задание № 3

16. Уравновесим магнитные стрелки при разном значении количества шариков  $n$ . Результаты сведём в таблицу:

$n$	$l$	$m$ , г	$M$ , дин/см
4	1	0,182	107,0
6	2	0,202	237,6
8	2	0,250	294,0
10	3	0,195	344,0
12	3	0,225	396,9

Таблица 2: Зависимость механического момента  $M$  от количества магнитных шариков  $n$

17. Построю график  $M = M(n)$ :

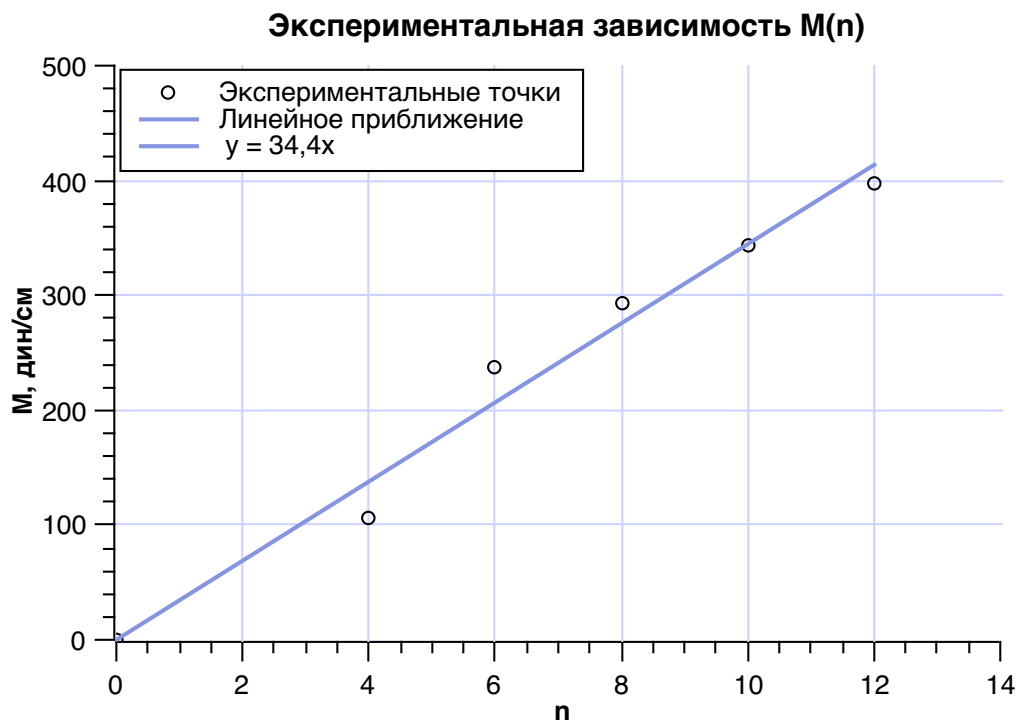


Рис. 2: График экспериментальной зависимости  $M(n)$

18. При аппроксимации экспериментальной зависимости  $M(n)$  прямой линией получается:

$M = 34,4x$ , соответственно, коэффициент наклона  $A = 34,4$  дин · см

19. Рассчитаю величину  $B_\nu$ :

$$B_\nu = \frac{A}{P_m} \approx 0,78 \text{ Гс}$$

20. Итоговая индукция магнитного поля Земли

$$B = \sqrt{B_\nu^2 + B_h^2} = 0,83 \text{ Гс}$$

Магнитное отклонение

$$\beta = \arctg \frac{B_\nu}{B_h} = 68^\circ$$

Магнитное поле на широте Долгопрудного по таблице:

$$B_{\text{табл}} = 50 \text{ Гс}$$