

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Лабораторная работа 3.1.3
«Измерение магнитного поля Земли»

Овсянников Михаил Александрович
студент группы Б01-001
2 курс ФРКТ

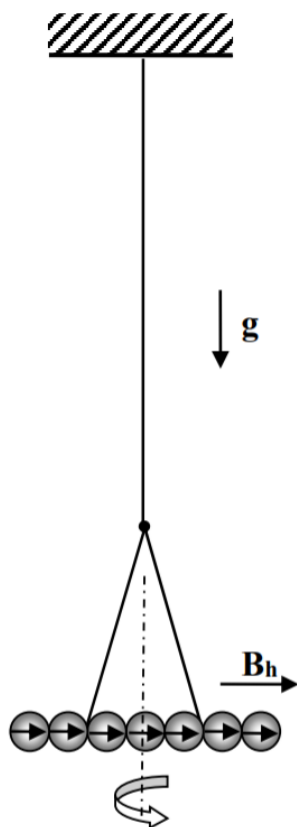
г. Долгопрудный
2021 г.

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 (25×30×60 мм³), 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.

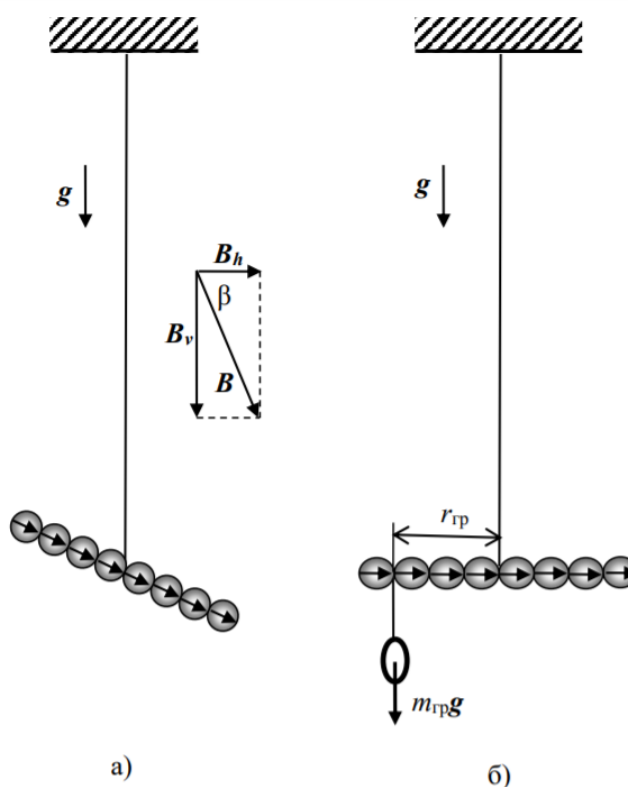
Магнитная стрелка» образована из сцепленных друг с другом противоположными полюсами шариков и с помощью Λ -образного подвеса подвешена в горизонтальном положении. Под действием вращательного

момента магнитный момент «стрелки» выстроится вдоль горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в направлении Юг → 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 Λ -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:

$$M(n) = n \cdot P_m B_v$$

Ход работы:

Берем два неодимовых шарика массой ~ 820 г каждый.

Получаем $m = (820 \pm 1)$ г.

Их диаметр $d = (5,9 \pm 0,1)$ мм.

Найдем расстояние r_{max} , на котором сила их взаимодействия пренебрежимо слаба.

Подкладывая листочки между шариками, экспериментально получаем $r_{max} = (23,9 \pm 0,1)$ мм.

Отсюда можно найти величину магнитного момента одного шарика:

$$P_m = \sqrt{\frac{mgr_{max}^4}{6}} \approx 6,6 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{м}^2$$

$$\sigma_{P_m} = P_m \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + 4 \left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2} \approx 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

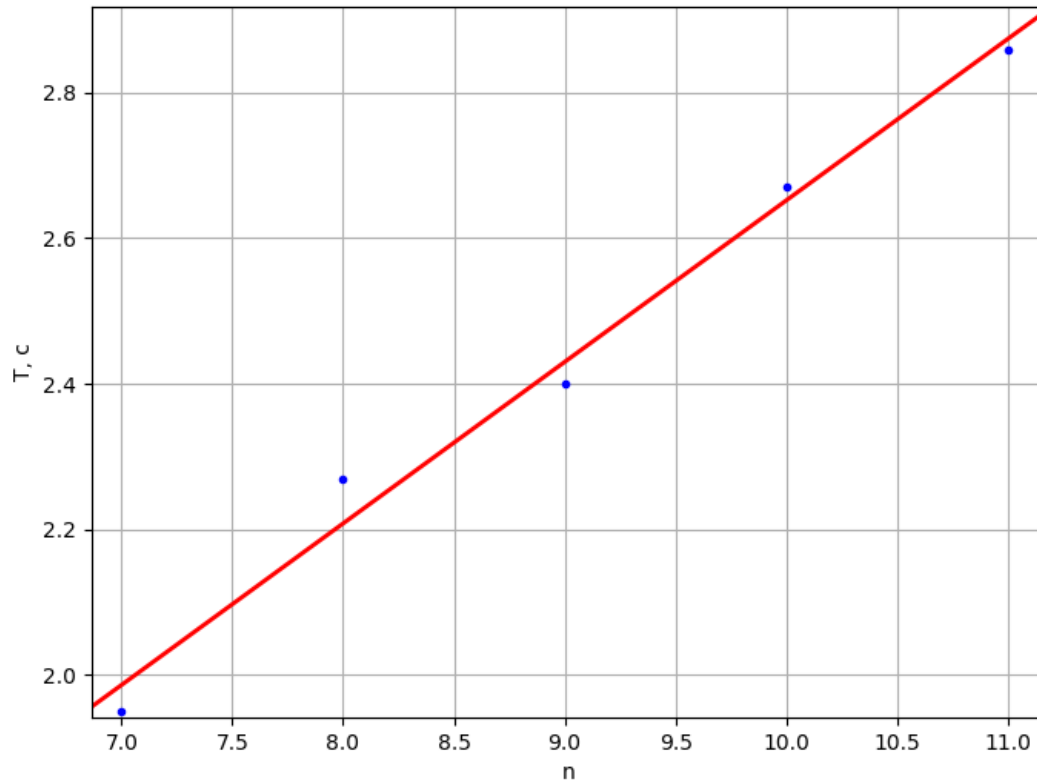
Итого:

$$P_m = (6,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

Измерим горизонтальную составляющую магнитного поля Земли по периоду крутильных колебаний маятника. Для этого снимем зависимость периода колебаний T от количества шариков n . Получаем следующую таблицу:

n	$5T$, с	\overline{T} , с
7	9,86	1,95
	9,61	
	9,79	
8	11,23	2,27
	11,27	
	11,03	
9	11,83	2,40
	12,01	
	12,21	
10	13,11	2,67
	13,11	
	13,76	
11	14,22	2,86
	14,03	
	14,70	

Строим график $T(n) = kn$. Получаем следующее:



По МНК получаем для коэффициента наклона:

$$k = (0,269 \pm 0,02) \text{ с.}$$

Тогда горизонтальная составляющая магнитного поля Земли:

$$B_h = \frac{\pi^2 m d^2}{3 P_m k^2} \approx 19,6 \text{ мкТл.}$$

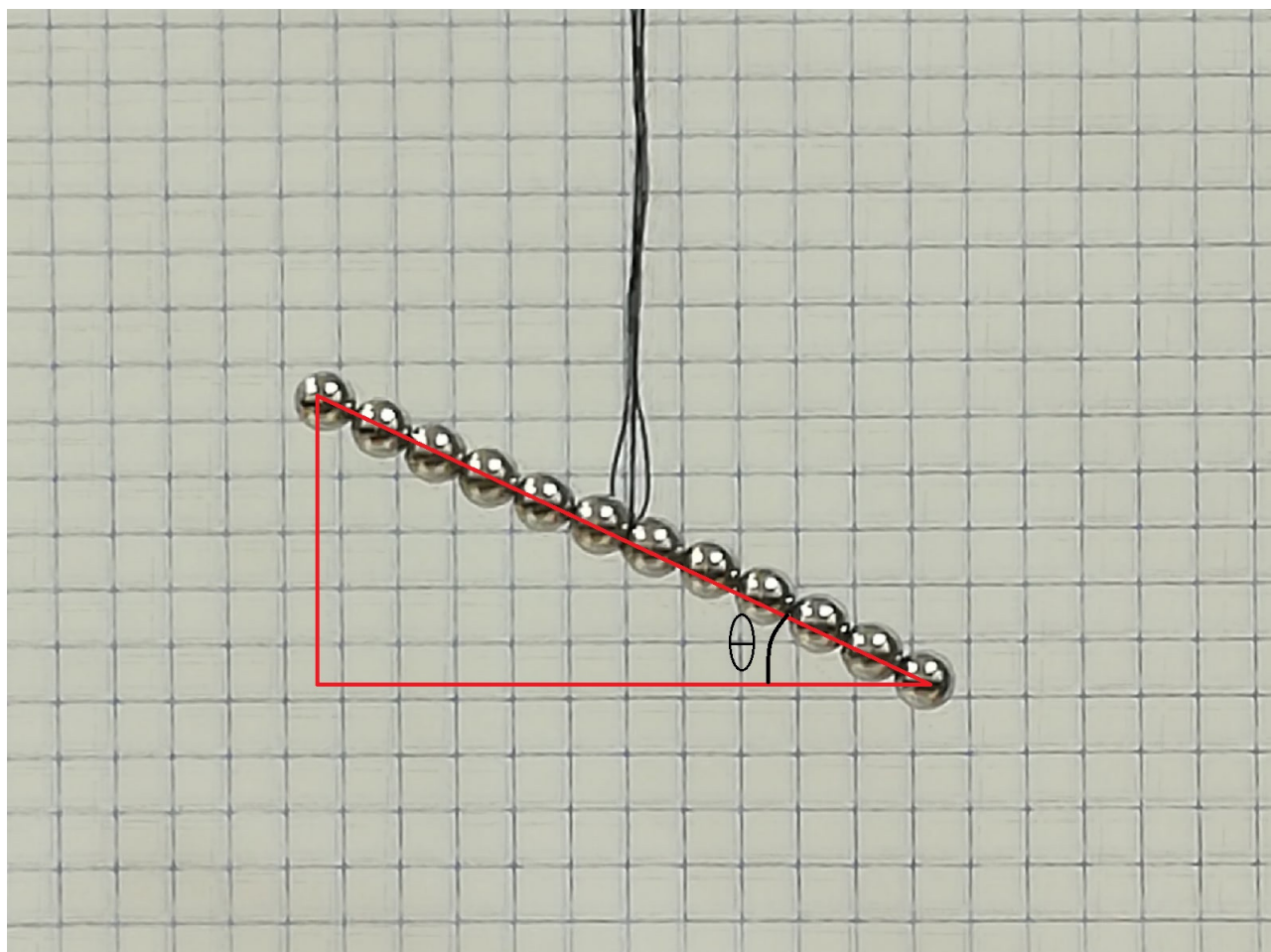
$$\sigma_{B_h} = B_h \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + 4 \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{P_m}}{P_m}\right)^2 + 4 \left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2} \approx 2,9 \text{ мкТл.}$$

Итого:

$$B_h = (19,6 \pm 2,9) \text{ мкТл.}$$

Теперь найдем вертикальную составляющую магнитного поля Земли двумя способами.

1) По углу наклона линии из 12 шариков.



Из рисунка видно, что $\operatorname{tg} \theta \approx 0,5$. Откуда $B_\nu = \frac{B_h}{\operatorname{tg} \theta} \approx 39,6$ мкТл.

2) Подвешивание грузика.

Подвесим грузик такой массы $m_{\text{гр}}$ на расстоянии от точки подвеса $r_{\text{гр}}$, чтобы линия из шариков была горизонтальна.

В нашем случае $m_{\text{гр}} = 128$ мг, $r_{\text{гр}} = 5d = 29,5$ мм.

Получаем: $B_\nu = \frac{m_{\text{гр}} g r_{\text{гр}}}{n P_m} \approx 47$ мкТл.

Как видим, результаты по обоим способам достаточно близки друг к другу.

Среднее $\overline{B_\nu} = 43,3$ мкТл.

Значит полное поле Земли $B = \sqrt{B_h^2 + B_\nu^2} \approx 47,5$ мкТл, что почти совпадает с табличным значением магнитного поля в г.Долгопрудном $B_{\text{табл}} = 50$ мкТл.

$$n = 7$$

$$1) \quad \Delta T = 9,86 \text{ C}$$

$$2) \quad \Delta T = 9,01 \text{ C}$$

$$3) \quad \Delta T = 9,79 \text{ C}$$

$$\bar{T} = 1,95 \text{ C}$$

$$\bar{T}(n) = kn;$$

$$k \approx 0,269 \text{ C.}$$

$$P_m \approx 8,61 \cdot 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

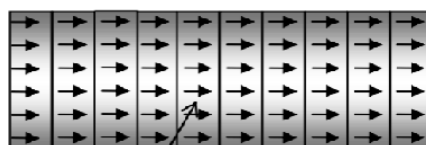
$$B_h = \frac{\pi^2 m d^2}{3 P_m k^2} \approx 1,96 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m} =$$

$$= 19,6 \text{ мкТ.}$$

$$B_z = \frac{m_{\text{рег}} r_{\text{рег}}}{n P_m} = 5 \frac{m_{\text{рег}} d}{n P_m} \approx 0,97 \cdot 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m} =$$

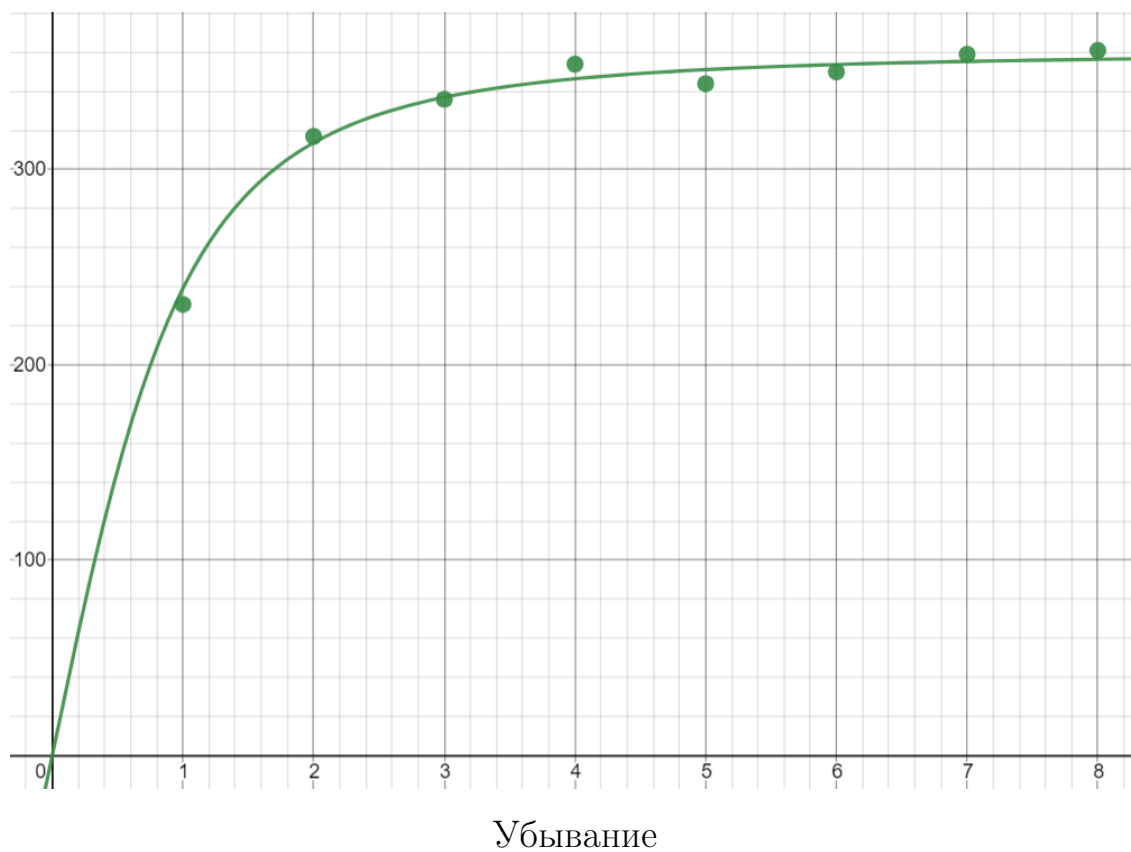
$$= 9,7 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m} = 97 \text{ мкТ} \cdot \text{м}$$

Исследуем зависимость магнитного поля соленоида от количества магнитиков толщиной $h = 4 \text{ мм}$ и радиусом $R = 4,5 \text{ мм}$.

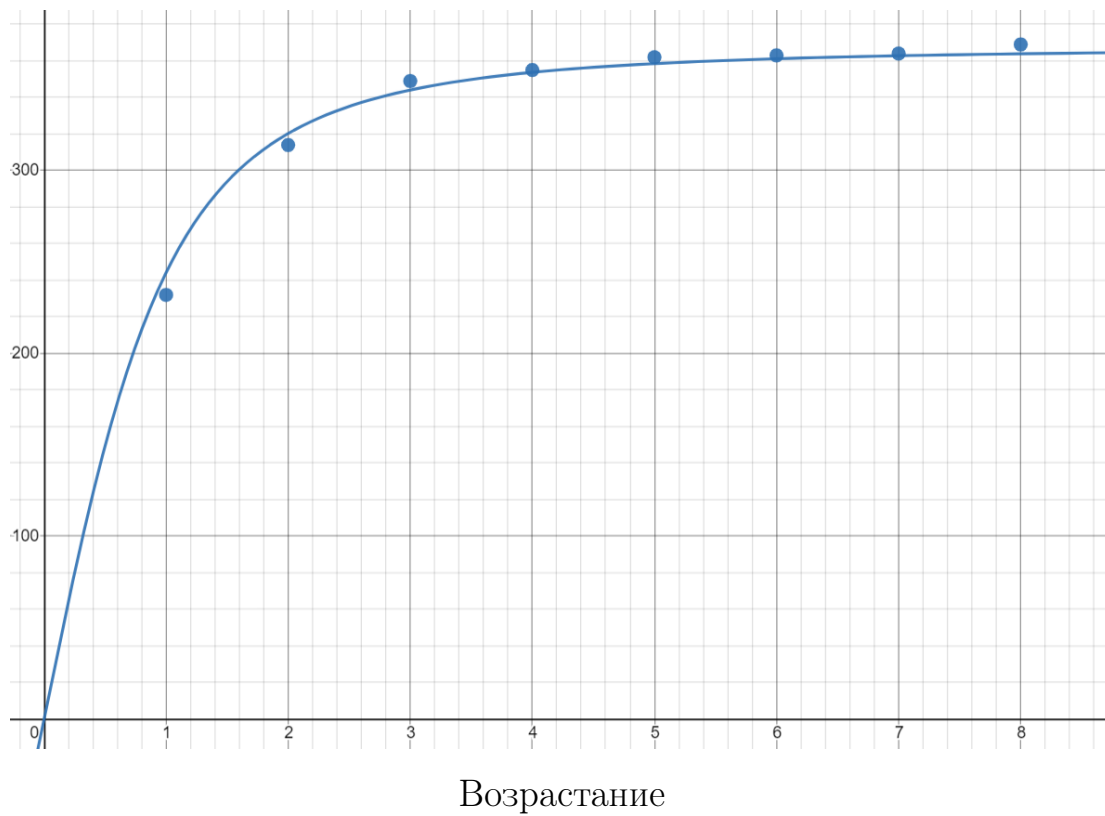


n	B , убывание	B , возрастание
8	361	369
7	359	364
6	350	363
5	344	362
4	354	355
3	336	349
2	317	314
1	231	232

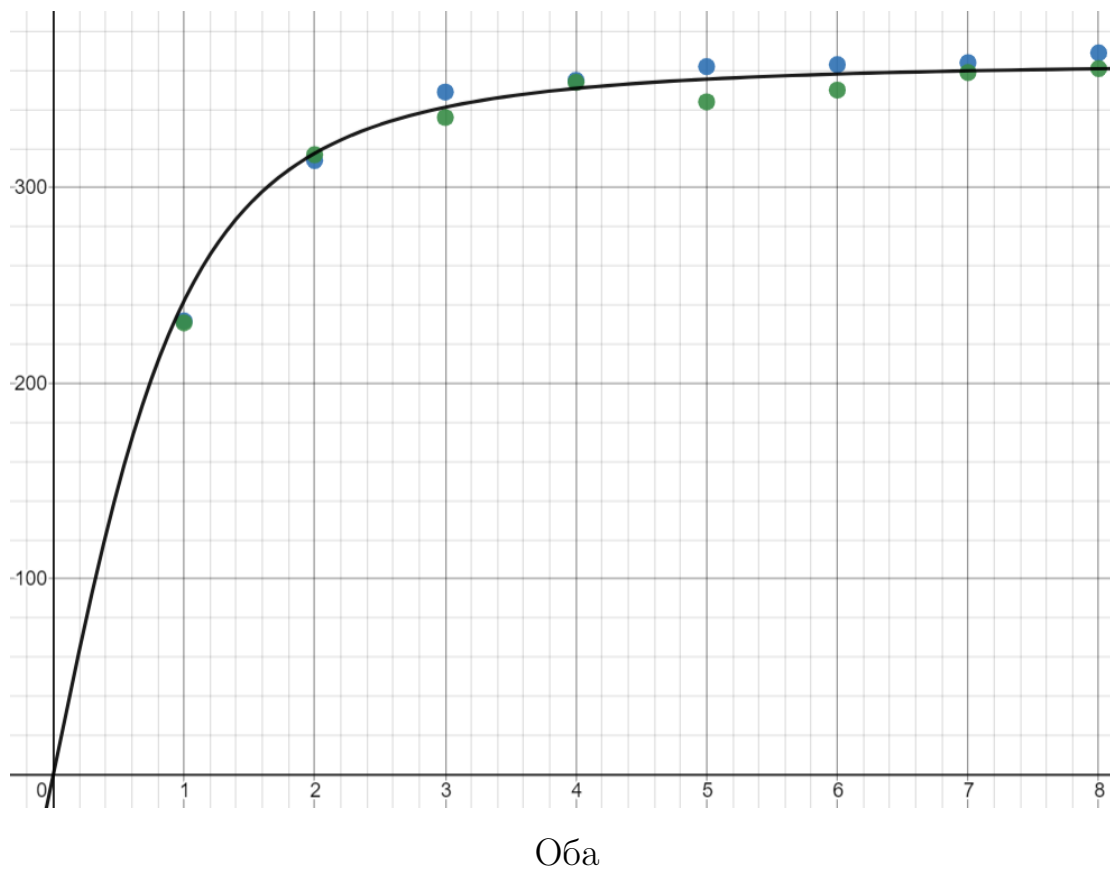
Построим графики. По оси абсцисс количество магнитов, а по оси ординат - индукция магнитного поля (мТл).



То же самое на возрастание количества магнитиков.



И сразу оба:



Как видно из графиков, зависимость подчиняется закону вида $B(n) = C_0 \cdot \frac{n}{\sqrt{C_1^2 + n^2}}$, что подтверждает теорию.

Теоретически, зависимость такая:

$$B(n) = \frac{B_r}{2} \frac{nh}{\sqrt{R^2 + (nh)^2}}.$$

Из обоих же графиков видно, что при $h \rightarrow \infty$ магнитное поле соленоида $B \rightarrow \frac{B_r}{2} \approx 370$ мТл. Откуда $B_r \approx 740$ мТл.

Вывод: в данной работе были определены характеристики шарообразных неодимовых магнитов: $m = (820 \pm 1)$ г, $d = (5,9 \pm 0,1)$ мм, $P_m = (6,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$ А · м². Были найдены горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля Земли соответственно: $B_h = (19,6 \pm 2,9)$ мкТл, $B_v = 43,3$ мкТл; а также полное магнитное поле Земли $B = 47,5$ мкТл, что неплохо соответствует табличному значению $B_{\text{табл}} = 50$ мкТл для г.Долгопрудного. Помимо этого, в данной работе была исследована зависимость магнитного поля соленоида - в нашем случае цилиндрика из соединенных магнитов - от количества этих самых магнитов, то есть от длины соленоида, и получено предельное значение поля такого соленоида $B_r \approx 740$ мТл. Все ошибки связаны с неточностью измерения.