

Измерение магнитного поля Земли

Алексей Гуденко

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.

Примечание: имейте ввиду, что магнитные предметы (ножницы, металлическая линейка, корпуса приборов и др.), близко расположенные к экспериментальной установке, могут существенно повлиять на результаты опыта по измерению индукции магнитного поля Земли.

Точечный магнитный диполь

Простейший магнитный диполь может быть образован витком с током или постоянным магнитом. По определению, магнитный момент \vec{P}_m тонкого витка площадью S с током I равен:

$$\vec{P}_m = (I/c) \vec{S} = (I/c) S \vec{n}$$

где c – скорость света в вакууме, $\vec{S} = S \vec{n}$ — вектор площади контура, образующий с направлением тока правовинтовую систему, \vec{n} — единичный вектор нормали к площадке S (это же направление \vec{P}_m принимается за направление $S \rightarrow N$ от южного (S) к северному (N) полюсу). Если размеры контура с током или магнитной стрелки малы по сравнению расстоянием до диполя, то соответствующий магнитный диполь \vec{P}_m называют элементарным или точечным.

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

$$\vec{B} = 3(\vec{P}_m \vec{r}) \vec{r} / r^5 - \vec{P}_m / r^3.$$

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

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

Под действием вращающего момента \vec{M} виток с током или постоянный магнит поворачивается так, чтобы его магнитный момент выстроился вдоль вектора индукции магнитного поля. Это — положение устойчивого равновесия: при отклонении от этого положения возникает механический момент внешних сил, возвращающий диполь к положению равновесия. В положении, когда \vec{P}_m и \vec{B} параллельны, но направлены противоположно друг другу, также имеет место равновесие ($M = 0$), но такое равновесие неустойчиво: малейшее отклонение от этого положения приведёт к появлению момента сил, стремящихся отклонить диполь ещё дальше от начального положения.

Магнитный диполь в магнитном поле обладает энергией:

$$W = -(\vec{P}_m, \vec{B}).$$

Из этой формулы следует, что энергия диполя в поле минимальна и равна $W_{min} = -P_m B$ при сонаправленных векторах $\vec{P}_m \uparrow \vec{B}$ (угол θ между \vec{P}_m и \vec{B} равен нулю), т.е., как и следовало ожидать, в положении устойчивого равновесия.

Обратим внимание на то, что формула для энергии диполя в магнитном поле очень удобна для выяснения единиц измерения магнитного диполя \vec{P}_m , причём, как в системе СИ, так и в системе СГСЭ, т.к. в обеих системах единиц формулы для энергии диполя выглядят одинаково:

в системе СИ размерность $[P_m] = [W]/[B] = \text{Дж}/\text{Тл}$;

в системе СГСЭ размерность $[P_m] = [W]/[B] = \text{эрг}/\text{Гс}$.

В неоднородном поле на точечный магнитный диполь, кроме момента сил, действует ещё и сила:

$$\vec{F} = (\vec{P}_m, \vec{\nabla})\vec{B},$$

где $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$ — дифференциальный оператор Гамильтона (векторный оператор «набла»).

Последняя формула аналогична формуле для силы, действующей на электрический диполь в электрическом поле:

$$\vec{F} = (\vec{P}_m, \vec{\nabla})\vec{E}.$$

Используя формулы для момента силы, силы и энергии, не сложно выяснить, как ведёт себя свободный магнитный диполь в неоднородном магнитном поле: он выстраивается вдоль силовых линий магнитного поля и, кроме того, под действием результирующей силы, возникающей из-за неоднородности поля, втягивается в область более сильного магнитного поля, т.е. в область, где он обладает меньшей энергией.

Зная магнитные моменты P_1 и P_2 двух небольших постоянных магнитов, можно рассчитать силу их взаимодействия. Если магнитные моменты $P_1 = P_2 = P_m$ двух одинаковых небольших магнитов направлены вдоль соединяющей их прямой, а расстояние между ними равно r , то магниты взаимодействуют с силой:

$$F = P_m \partial B / \partial r = P_m \partial (2P_m / r^3) / \partial r = -6P_m^2 / r^4.$$

Магниты притягиваются, если их магнитные моменты сонаправлены ($\vec{P}_1 \uparrow \uparrow \vec{P}_2$) и отталкиваются, если моменты направлены противоположно друг другу ($\vec{P}_1 \uparrow \downarrow \vec{P}_2$).

Если магнитные моменты направлены перпендикулярно соединяющей их прямой, то сила их взаимодействия окажется в два раза меньшей: $F = 3p^2 / r^4$ (в этом случае диполи притягиваются при $\vec{P}_1 \uparrow \downarrow \vec{P}_2$ и отталкиваются при $\vec{P}_1 \uparrow \uparrow \vec{P}_2$).

Неодимовые магнитные шары

В настоящей работе используются неодимовые магниты¹ шарообразной формы.

Для нас важно то, что:

- 1) шары намагничены однородно;
- 2) вещество, из которого изготовлены магниты, является магнитожёстким материалом.

Магнитное поле однородно намагниченного шара радиуса R на расстояниях $r \geq R$ от центра шара совпадает с полем точечного магнитного диполя \vec{P}_m , равного полному магнитному моменту шара и расположенного в его центре. (Можно показать (см. контрольный вопрос № 6), что внутри ($r < R$) такого шара поле однородно и равно $B_0 = 2P_m / R^3$)

Магнитожёсткость материала означает, что магнитные моменты шаров в нашей работе не изменяются под действием внешних магнитных полей, т.е. шар ведёт как жёсткий диполь. Поэтому, при расчетах можно считать, что шары взаимодействуют как жёсткие точечные магнитные диполи, расположенные в центрах шаров.

Полный магнитный момент \vec{P}_m постоянного магнита определяется намагниченностью \vec{p}_m вещества, из которого он изготовлен. По определению, намагниченность — это магнитный момент единицы объёма. Для однородно намагниченного шара намагниченность, очевидно, равна:

$$\vec{p}_m = \vec{P}_m / V,$$

где V — объём шара.

¹ Неодимовые магниты, состоящие из сплава неодим-железо-бор (NdFeB) на сегодняшний день являются самыми мощными постоянными магнитами, с помощью которых можно поднимать грузы порядка тонны. Они нашли широкое применение в изготовлении жёстких дисков, DVD-приводах, динамиках. Неодимовые магниты впервые были получены в 1983 году.

Намагниченность — важная характеристика вещества постоянных магнитов, определяющая, в частности, величину остаточной магнитной индукции $B_r = 4\pi p_m$ (остаточная индукция B_r — одна из величин, которая, как правило, указывается в справочниках по магнитожёстким материалам).

Не сложно показать (см. контрольный вопрос № 7), что 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:

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

Электрическим аналогом магнитного шара из магнитожёсткого материала является диэлектрический шар, изготовленный из *электрета* — материала с «замороженной» поляризацией. По своей топологии внешнее поле шара из электрета не отличается от поля постоянного шарообразного магнита. Шар, изготовленный из электрета, ведёт себя в электрическом поле точно также, как магнитный шар в магнитном поле. Это означает, что формулы, описывающие взаимодействие постоянных шарообразных магнитов между собой и с магнитным полем, полностью — с точностью до обозначений — идентичны формулам, описывающих поведение электрических диполей в электрическом поле.

Экспериментальное определение величины магнитного момента магнитных шариков (Метод А).

Величину магнитного момента P_m одинаковых шариков можно рассчитать, зная их массу m и определив максимальное расстояние r_{\max} , на котором они ещё удерживают друг друга в поле тяжести (см. рис. 1). При максимальном расстоянии сила тяжести шариков равна силе их магнитного притяжения:

$$6P_m^2 / r_{\max}^4 = mg, \quad P_m = \sqrt{\frac{mgr_{\max}^4}{6}}.$$

По величине магнитного момента P_m можно рассчитать величину индукции магнитного поля вблизи любой точки на поверхности шара радиуса R . Максимальная величина индукции наблюдаются на полюсах:

$$\vec{B}_p = 2\vec{P}_m / R^3.$$

Определение величины магнитного момента по силе сцепления магнитных шариков (Метод В).

Величину магнитного момента шариков можно определить также по силе их сцепления. Она определяется как сила, необходимая для разрыва двух сцепившихся магнитных шариков. Сила сцепления максимальна, если шары соединяются своими противоположными полюсами.

Максимальную силу сцепления можно определить по весу магнитной цепочки, которую способен удержать самый верхний магнитный шарик. Если цепь состоит из одинаковых магнитных шариков (см. рис. 2, а), то при определённой длине она отрывается от верхнего шарика. При этом, учитывая, что сила притяжения убывает как r в четвёртой степени (r — расстояния между центрами шаров) $F \sim 1/r^4$, для расчёта прочности цепочки достаточно учитывать силу взаимодействия верхнего шара с тремя-четырьмя ближайшими соседями.

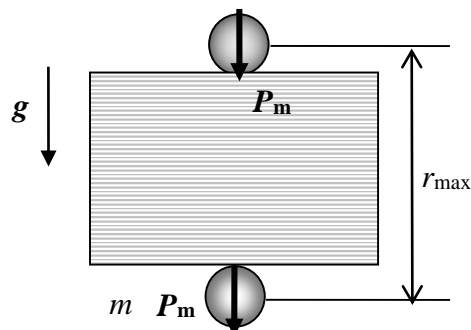


Рис. 1. Определение магнитного момента шариков по силе тяжести (метод А).

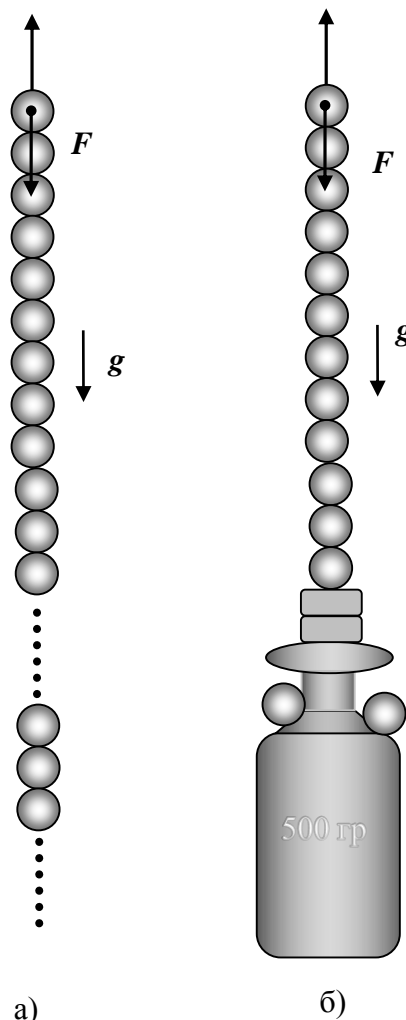


Рис. 2. Определения магнитного момента шарика по силе сцепления (Метод В).

Если сила сцепления двух одинаковых шаров диаметром d с магнитными моментами P_m равна:

$$F_0 = 6P_m^2 / d^4,$$

то минимальный вес цепочки, при которой она оторвётся от верхнего шарика равен:

$$F = 6P_m^2 / d^4 + 6P_m^2 / (2d)^4 + \dots = F_0(1 + 1/2^4 + 1/3^4 + 1/4^4 + \dots) \approx 1,08F_0$$

(мы ограничились четырьмя членами ряда; точность такого приближения предлагается оценить самостоятельно).

Таким образом, сила сцепления двух шаров равна:

$$F_0 = F / 1,08.$$

Совсем не обязательно составлять цепочку только из одинаковых шариков: на расстояниях, превышающих 20-30 диаметров шариков, можно подцепить всё, что примагничивается (см. рис. 2, б), — на результат это практически не повлияет (в этом не сложно убедиться экспериментально).

Измерение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли

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

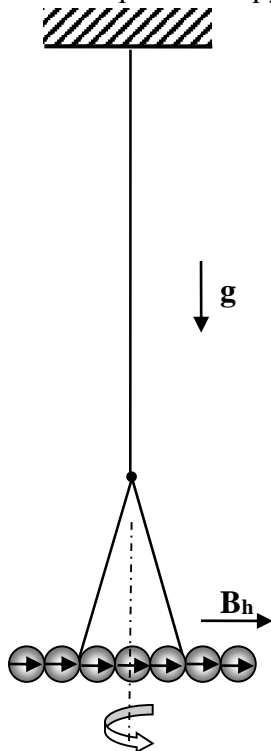


Рис. 3. Крутильный маятник.

«Магнитная стрелка» образована из сцепленных друг с другом противоположными полюсами шариков и с помощью Λ -образного подвеса подвешена в горизонтальном положении (см. рис. 3). Магнитные моменты шариков направлены в одну сторону вдоль оси «стрелки». Под действием вращательного момента $\vec{M} = \vec{P}_0 \times \vec{B}$ магнитный момент «стрелки» \vec{P}_0 выстроится вдоль горизонтальной составляющей магнитного поля Земли \vec{B}_h в направлении Юг \rightarrow Север. При отклонении «стрелки» на угол θ от равновесного положения в горизонтальной плоскости возникают крутильные колебания вокруг вертикальной оси, проходящей через середину стрелки. Если пренебречь упругостью нити, то уравнение крутильных колебаний такого маятника определяется возвращающим моментом сил $M = -P_0 B_h \sin \theta$, действующим на «стрелку» со стороны магнитного поля Земли, и моментом инерции I_n «стрелки» относительно оси вращения.

При малых амплитудах ($\sin \theta \approx \theta$) уравнение колебаний «стрелки» имеет вид:

$$I_n d^2 \theta / dt^2 = -P_0 B_h \theta, \quad \text{или} \quad I_n \ddot{\theta} + P_0 B_h \theta = 0.$$

Период колебаний

$$T = 2\pi \sqrt{I_n / P_0 B_h} = 2\pi \sqrt{I_n / n P_m B_h},$$

где $P_0 = n P_m$ — полный магнитный момент магнитной «стрелки», составленной из n шариков.

Момент инерции «стрелки», состоящей из n шариков, как не сложно убедиться (см. контрольный вопрос № 14), с хорошей точностью равен моменту инерции тонкого однородного стержня массой $m_{\text{ст}} = n m$ и длиной $\ell_{\text{ст}} = n d$:

$$I_n = (1/12) m_{\text{ст}} \ell_{\text{ст}}^2 = (1/12) n m (n d)^2 = (1/12) n^3 m d^2.$$

Даже для трёх шариков момент инерции, рассчитанный по приближённой формуле, отличается от точного результата (см. контрольный вопрос № 14) примерно на 2 %, а для $n \geq 5$ — различие не превышает процента; если же учесть, что $T \sim \sqrt{I_n}$, то для всех $n \geq 3$ погрешность наших расчетов для периода колебаний T не превысит процента, что освобождает нас от необходимости вводить поправочные коэффициенты.

Таким образом, в нашем приближении период колебаний маятника оказывается пропорциональным числу шаров n , составляющих «стрелку»:

$$T(n) = 2\pi\sqrt{I_n/nP_mB_h} = 2\pi\sqrt{n^3md^2/12nP_mB_h} = \pi n\sqrt{md^2/3P_mB_h} = kn,$$

где $k = \pi\sqrt{md^2/3P_mB_h}$.

При выводе этой формулы предполагалось, что магнитный момент — величина аддитивная: полный магнитный момент системы магнитов («стрелки») равен векторной сумме магнитных моментов шариков, составляющих «стрелку». Экспериментальное подтверждение этой зависимости ($T \sim n$) будет являться косвенным доказательством наших предположений о магнитожёсткости материала магнитов и, соответственно, свойства аддитивности магнитных моментов шаров.

Измерение вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

Магнитное наклонение.

Для измерения вертикальной B_v 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 (см. рис. 4, а). Это связано с тем, что вектор \vec{B} индукции магнитного поля Земли в общем случае не горизонтален, а образует с горизонтом угол β , зависящим от географической широты φ места, где проводится опыт. Величина угла β называется магнитным наклонением.

С помощью небольшого дополнительного грузика «стрелку» можно «выровнять», расположив её горизонтально (см. рис. 4, б): в этом случае момент силы тяжести груза относительно точки подвеса будет равен моменту сил, действующих на «стрелку» со стороны магнитного поля Земли. Если масса уравнивающего груза равна $m_{гр}$, плечо силы тяжести $r_{гр}$, а полный магнитный момент «стрелки» $P_0 = nP_m$, то в равновесии:

$$m_{гр}gr_{гр} = P_0B_v = nP_mB_v$$

(B_v — вертикальная составляющая поля Земли). Видно, что момент $M(n)$ силы тяжести уравнивающего груза пропорционален числу n шариков, образующих магнитную «стрелку»:

$$M(n) = An, \text{ где } A = P_mB_v.$$

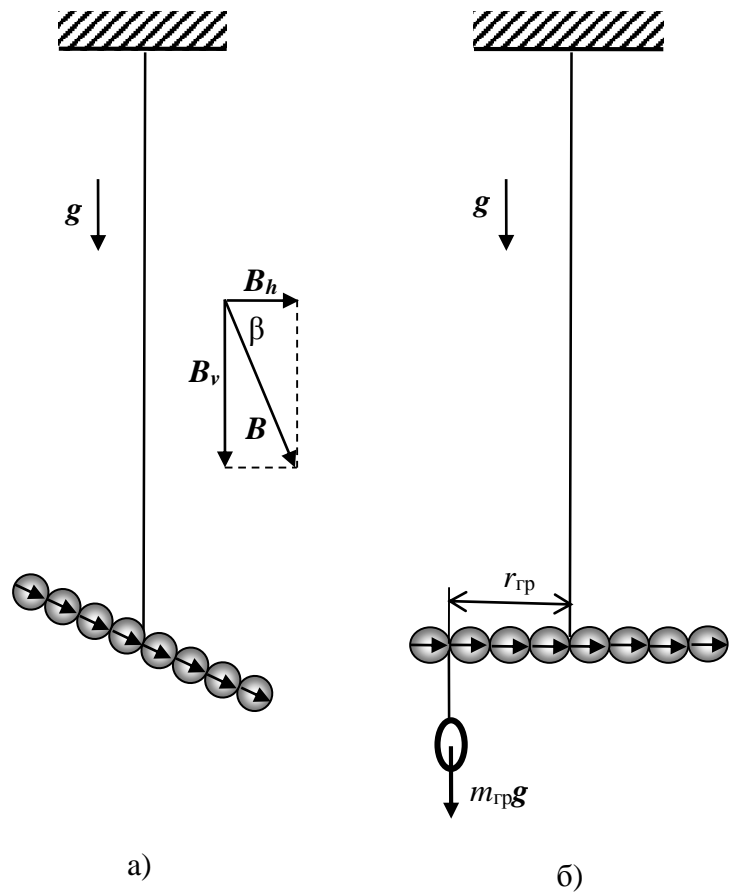


Рис. 4. Определение вертикальной составляющей поля Земли.

Задание № 1**Определение магнитного момента, намагниченности и остаточной магнитной индукции вещества магнитных шариков****Метод А**

1. Взвесьте шарики на весах. При этом имейте в виду, что весы могут давать некорректные показания, если магниты класть непосредственно на платформу весов. Определите диаметр шариков.
2. Проложите между двумя магнитными шариками брусок из немагнитного материала. Подкладывая между бруском и верхним магнитиком листы бумаги (см. рис. 1), выясните, на каком максимальном расстоянии r_{max} шарики удерживают друг друга в поле тяжести Земли.
3. Рассчитайте величину магнитного момента магнетика P_m , приравняв силу притяжения двух магнитных диполей $F = 6P_m^2/r_{max}^4$ силе тяжести $F_T = mg$. Оцените погрешность измерений.
4. Рассчитайте величину намагниченности материала шариков $p_m = P_m/V$.
5. По величине магнитного момента (намагниченности) шарика, рассчитайте величину B_p магнитного поля на полюсах шарика. С помощью магнетометра АТЕ-8702 измерьте индукцию поля на полюсах шарика. Сравните расчетное B_p значение с измеренным. При сильном расхождении результатов повторите измерения магнитного момента шарика.
6. Рассчитайте величину $B_r = 4\pi p_m$ остаточной магнитной индукции материала, из которого изготовлен магнитный шарик. Сравните ваш результат с табличными значениями B_r для соединения неодим-железо-бор.

Метод В

7. Используя дополнительные шарики, составьте цепочку из 20-30 шариков и, с помощью неодимовых магнитов в форме параллелепипедов, подсоедините цепочку к гире и разновесам, так, чтобы общая масса системы составила ~ 500 г (рис. 2. б). Добавляя или удаляя шарики (шарики можно примагничивать непосредственно к гире), подберите минимальный вес F системы цепочки с гирей, при котором она отрывается от верхнего шарика.
8. С помощью весов определите вес F оторвавшейся цепочки с гирей.
9. По формуле $F_0 = F/1,08$ определите силу сцепления двух шаров.
10. Из формулы $F_0 = 6P_m^2/d^4$ определите магнитный момент шарика P_m . Оцените погрешность результата.
11. Рассчитайте величину поля на полюсах и сравните расчетное значение с измеренным магнетометром АТЕ-8702.
12. Сравните значения магнитных моментов, полученные методом А и методом В. Какой метод даёт более точный результат для величины P_m ?
13. Окончательный результат измерений P_m занесите в Таблицу.

Задание № 2

Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Схема установки, предназначенной для измерения горизонтальной составляющей поля Земли, показана на рис. 5. Это крутильный маятник в виде магнитной «стрелки» закреплённой на тонкой нити. Магнитная «стрелка» собирается из $n = 3, 4, \dots, 12$ магнитных шариков и подвешивается в горизонтальном положении с помощью Λ -образного подвеса. Маятник совершает крутильные колебания вокруг вертикальной оси, проходящей через центр масс «стрелки». Для крепления нити в работе используется штатив, изготовленный из немагнитного материала.

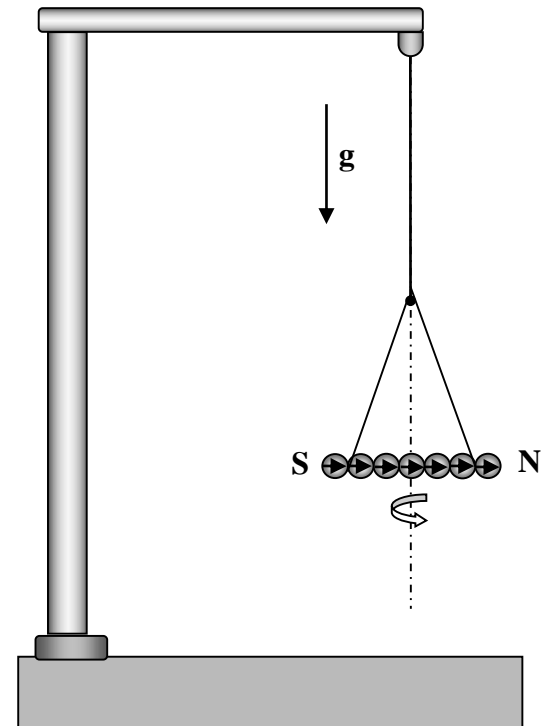


Рис. 5. Схема установки для определения горизонтальной составляющей поля Земли.

14. Соберите крутильный маятник и, используя Λ -образный подвес, установите «магнитную стрелку» из 12 магнитных шариков в горизонтальном положении (юстировка системы).
15. Возбудите крутильные колебания маятника вокруг вертикальной оси и определите их период. Оцените влияние упругости нити на период колебаний, возбудив крутильные колебания «стрелки», свёрнутой в кольцо (очевидно, что магнитный момент такого кольцеобразного маятника равен нулю) (см. рис. 6). Покажите, что упругость нити при расчете периода колебаний можно не учитывать.
16. Исследуйте зависимость периода T крутильных колебаний «стрелки» от количества магнитных шариков n , составляющих «стрелку». Измерения проведите для значений $n = 3, 4, 5, \dots, 12$. (Не забывайте для каждого значения n юстировать систему, выставляя перед каждым измерением «стрелку» горизонтально).
17. Постройте график экспериментальной зависимости $T(n)$.
18. Аппроксимируйте экспериментальную зависимость $T(n)$ прямой $T = kn$.
19. По значению углового коэффициента k рассчитайте величину горизонтальной составляющей магнитного поля Земли по формуле:

$$B_h = \pi^2 m d^2 / 3 k^2 P_m.$$
Оцените погрешность измерений.

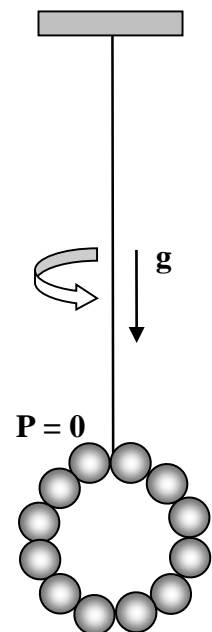


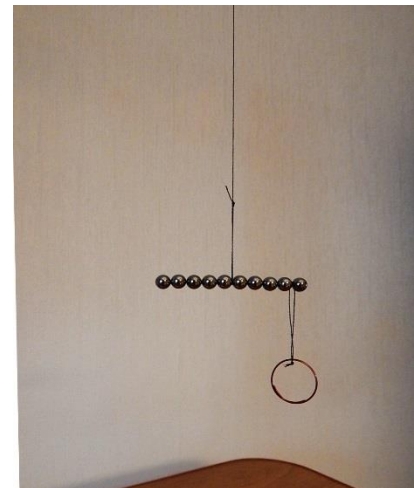
Рис. 6. Магнитная «стрелка», свёрнутая в кольцо.

Задание № 3**Определение вертикальной составляющей магнитного поля Земли**

20. Изготовьте магнитную «стрелку» из $n = 10$ шариков и подвесьте её за середину с помощью нити на штативе (см. рис. 7, а).
21. Определите механический момент сил, действующий со стороны магнитного поля Земли на *горизонтально* расположенную магнитную «стрелку». Для этого, с помощью одного или нескольких кусочков проволоки, уравновесьте «стрелку» в горизонтальном положении (см. рис. 7, б).
22. С помощью весов определите массу уравнивающего груза $m_{\text{гр}}$.
23. Из условия равновесия рассчитайте механический момент сил M , действующих на горизонтальную «стрелку» со стороны поля Земли. Измерения момента сил $M(n)$ проведите для чётных значений $n = 4, 6, 8, 10, 12$ (у таких «стрелок» есть «хорошая серединка» для подвешивания на нити).
24. Постройте график экспериментальной зависимости $M = M(n)$.
25. Аппроксимируйте экспериментальную зависимость $M(n)$ прямой линией $M = An$. Какой вывод об аддитивности магнитного момента можно сделать на основании этого графика?
26. По значению углового коэффициента A зависимости $M = An$ рассчитайте величину B_v вертикальной составляющей магнитного поля Земли $B_v = A/P_m$. Оцените погрешность измерений B_v .
27. Используя результаты измерений B_h и B_v , определите магнитное наклонения β и полную величину индукции магнитного поля Земли на широте Долгопрудного. Сравните полученное значение наклонения с расчётным (см. контрольный вопрос № 17), полученным в предположении, что магнитное поле Земли соответствует полю однородно намагниченного вдоль оси вращения шара. Широту Долгопрудного возьмите равной $\varphi = 56^\circ$ с.ш. (северной широты). Оцените также полный магнитный момент P_3 Земли.
28. Сравните полученные в работе результаты с современными справочными данными параметров магнитного поля Земли в Московском регионе.



а)



б)

Рис. 7. Определение вертикальной составляющей поля

Контрольные вопросы и задачи

1. Что такое магнитный момент тока, и в каких единицах он измеряется?
2. Чему равняется магнитный момент тонкого плоского контура площадью $s = 1 \text{ см}^2$, если по нему циркулирует ток $I = 1 \text{ А}$? Решите эту задачу как в системе СИ, так и в системе СГСЭ. Какой ток I_0 должен циркулировать по контуру, чтобы его магнитный момент оказался равным магнитному моменту неодимовых шариков, используемых в вашей работе?
3. Как ведёт себя магнитный диполь в магнитном поле?

4. Рассчитайте энергию и силу взаимодействия двух точечных магнитных диполей, направленных вдоль или перпендикулярно соединяющих их прямой.
5. 'Что такое вектор намагниченности \vec{p}_m ? В каких единицах измеряется намагниченность в системе СГСЭ и в системе СИ?
6. Покажите, что поле внутри однородно намагниченного шара радиуса R однородно и равно $\vec{B}_0 = 2\vec{P}_m/R^3$, где \vec{P}_m — полный магнитный момент шара.
7. Найдите зависимость индукции магнитного поля $B(\theta)$ от угла θ вблизи поверхности однородно намагниченного шара (полярный угол θ отсчитывается от северного полюса шара).
8. Найдите распределения токов намагничивания $i(\theta)$ на поверхности однородно намагниченного шара (i — линейная плотность поверхностных токов, θ — полярный угол).
9. Приведите примеры материалов, используемых для изготовления постоянных магнитов. Каковы их характеристики?
10. Изменяется ли «сила» постоянных магнитов с течением времени? Как размагнитить постоянный магнит? Как размагнитить намагниченную в поле магнита стальную отвертку, пинцет, механические часы?
11. Как сила сцепления двух одинаковых неодимовых шарообразных магнитов зависит от их диаметров (намагниченность шаров одинаковая)? Какую силу надо приложить, чтобы разорвать два сцепившихся полюсами неодимовых шара диаметром $D = 3$ см, если известно, что для разрыва шариков диаметром $d = 6$ мм требуется сила $f \sim 0,5$ кГ?
12. Неодимовый шарообразный магнит диаметром $R = 6$ см разрезали пополам. Какую минимальную силу надо приложить, чтобы оторвать (без сдвига) одну половинку от другой. Считайте, что остаточная индукция неодимового сплава $B_r = 1,15$ Тл.
13. Для чего в конструкции крутильного маятника используется Λ -образный подвес?
14. Получите точные значение момента инерции крутильного маятника I_n относительно оси вращения, составленного из $n = 3, 4, 5 \dots$ шариков и сравните их с соответствующими значениями момента инерции, рассчитанными по приближённой формуле для тонкого стержня массой $m_{\text{ст}} = nm$ и длиной $\ell_{\text{ст}} = nd$
15. Получите формулу для периода крутильных колебаний горизонтальной магнитной стрелки вблизи положения равновесия.
16. Поясните идею опыта, с помощью которого выясняется влияние упругости нити на период крутильных колебаний.
17. Считая, что магнитное поле Земли соответствует полю однородно намагниченного вдоль оси вращения шара, выясните, как магнитное склонение β связано с географической широтой φ . Какой угол с горизонтом образует магнитное поле в г. Долгопрудном, расположенном на широте $\varphi = 56^\circ$ с.ш.?