

Road to IPhO

Измерение магнитного поля Земли

Введение

В этой задаче измеряется горизонтальная составляющая магнитного поля Земли. Сначала характеристики магнита определяются с помощью весов Гуи, а затем он используется для измерения этого магнитного поля.

Во всей задаче погрешности нужно определять только по погрешности проведения аппроксимирующей прямой, не по погрешностям измерения отдельных точек.

Список оборудования

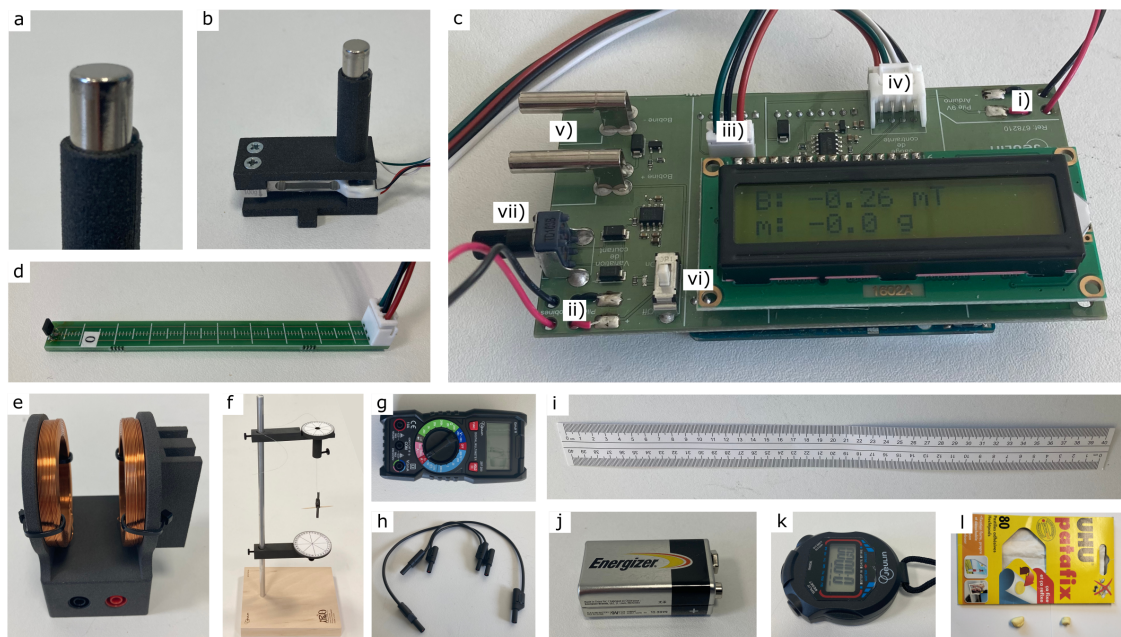


Рис. 1. Фотографии оборудования

Список оборудования приведен ниже, см. рис. 1. Если предметов больше одного, их количество указано в квадратных скобках. Если какое-то оборудование не работает, обратитесь за помощью.

- (a) Магниты [3]. Первый магнит прикреплен к датчику силы (b); не снимайте его. Второй магнит вставлен в держатель (f); не извлекайте его, пока не будет явно указано. Третий магнит будет использоваться в A5. Все магниты одинаковые.
- (b) Датчик силы. Он подключен к Arduino (c) и измеряет силу вдоль своей оси, значение обозначено m_f , в единицах грамм-силы («g»). Грамм-сила – это сила, действующая на тело массы 1 г в поле тяжести Земли ($g_0 = 9.81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$). К нему прикреплен один из магнитов (a). Каждый раз, когда датчик включается, его показания сбрасываются на 0, независимо от ситуации. **К датчику нельзя прикладывать силу, превышающую 200 g. Распаковывайте его аккуратно.**
- (c) Arduino с цифровым дисплеем. Этот элемент используется для питания катушек (e) и измерения силы и индукции магнитного поля. Измеренные значения отображаются в грамм-силе («g») и мТл. Батарейка (j), питающая Arduino, должна быть подключена к разъему (i), а батарейка (j), питающая катушки (e), – к разъему (ii) (обратите внимание на полярность подключения). Датчик силы (b) и датчик магнитного поля (d) должны быть подключены к разъемам (iv) и (iii) соответственно, а кабели питания катушек – к разъемам (v). Переключатель (vi) замыкает цепь питания катушки (при этом загорается светодиод), ток через которую можно регулировать с помощью (vii).
- (d) Датчик магнитного поля с линейкой. Подключен к Arduino (c), датчик измеряет проекцию поля B_z вдоль направления \vec{e}_z линейки, в мТл.

Road to IPhO

- (e) Катушки в конфигурации анти-Гельмгольца (катушки намотаны в противоположных направлениях). Эти катушки должны быть соединены последовательно с амперметром (g) и с Arduino (c), чтобы создать магнитное поле.
- (f) Металлический штатив с деревянным основанием, с подвешенным держателем, в который первоначально вставлен магнит (a), и с транспортирами. Инструкция по сборке штатива приведена ниже.
- (g) Мультиметр. Используется только в качестве амперметра в режиме 10 А. Если оставить мультиметр в неактивном состоянии, он выключается. Его можно включить снова, вернув переключатель в положение «OFF» и обратно. Не используйте щупы, находящиеся в коробке мультиметра.
- (h) Электрические провода [3].
- (i) Линейка 40 см.
- (j) Батарейки 9 В [3]. Их емкость составляет порядка $300 \text{ мА} \cdot \text{ч}$.
- (k) Секундомер.
- (l) Клейкая масса. Ее можно использовать во всей задаче.

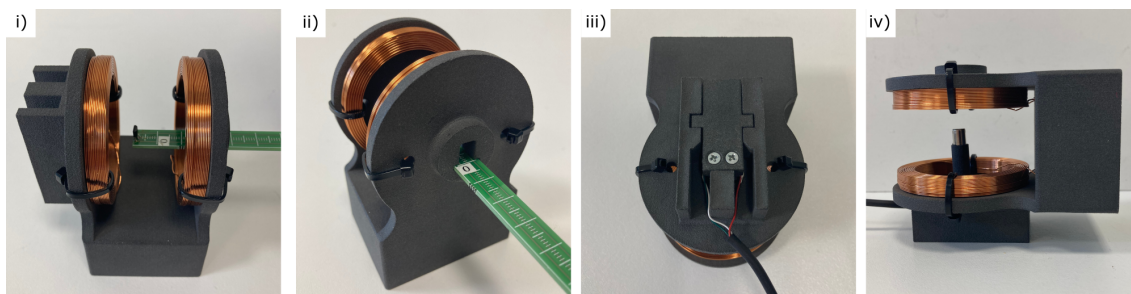


Рис. 2. Использование датчиков внутри катушек анти-Гельмгольца

Использование датчиков, подключаемых к Arduino (рис. 2)

Для измерения магнитного поля на оси, датчик магнитного поля (d) можно перемещать в катушках (e), как показано на рис. (i). Положение $z = 0$ для датчика показано на рис. (ii), и z увеличивается при перемещении датчика внутрь катушек.

Датчик силы (b) вставляется в катушку, как показано на (iii), после чего катушка разворачивается как на рис. (iv), чтобы датчик был расположен вертикально. Для этого не забудьте проложить электрические провода через предусмотренные желоба.

Инструкция по сборке штатива (f) (рис. 3), которая потребуется только перед началом части В, с использованием проволоки длиной 34 см

- Вставьте металлическую стойку (f0a) в деревянную пластину с пластиковыми ножками (f0b), чтобы получилась подставка (f0).
- Деталь (f1) находится на нижней части и используется для измерения угла поворота держателя. Установите кронштейн (f1b) на металлическую стойку с помощью винта (f4), затем закрепите на нем деталь (f1a) с помощью второго винта (f4).
- Деталь (f2) находится в верхней части, к ней крепится проволока, на которой подвешен держатель. Установите кронштейн (f2b) на металлическую стойку с помощью винта (f4), затем вставьте на него деталь (f2a).
- Чтобы собрать подвес (f3), вставьте массивный стержень (f3b) и зубочистку (f3c) в держатель (f3a), в которую уже вставлен магнит (a). Вставьте проволоку, поддерживающую держатель, в деталь (f2a) и закрепите ее винтом (f4). Поворачивая деталь (f2a), можно изменить угол закрепления проволоки. Зубочистка позволяет точно измерить угловое положение подвеса.

Road to IPhO

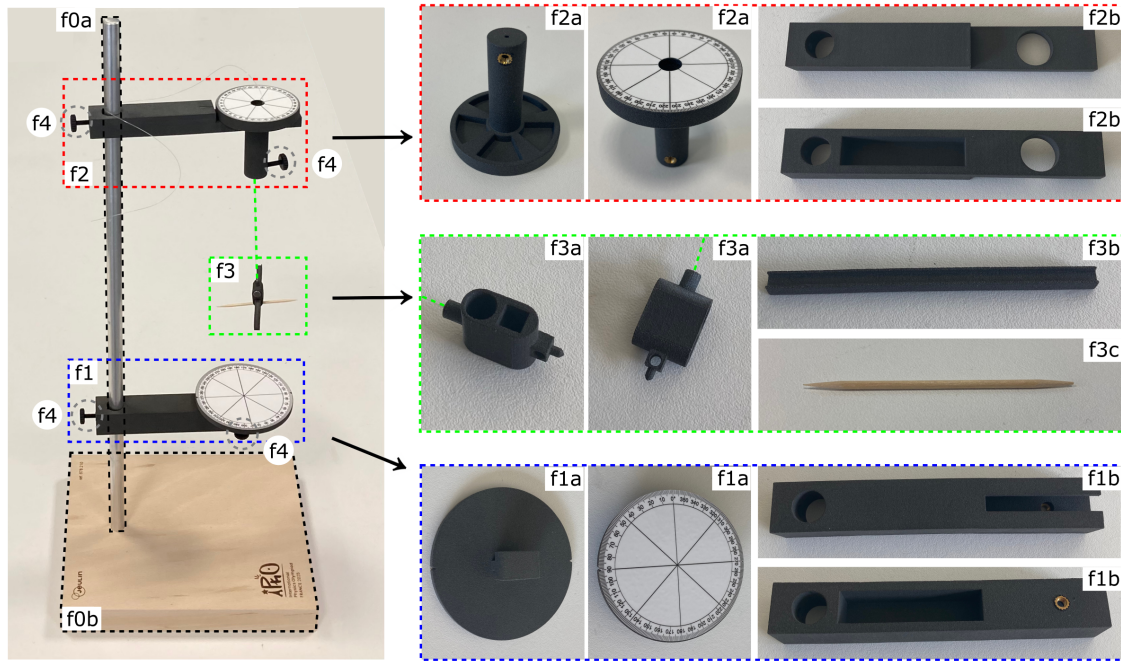


Рис. 3. Сборка штатива с подвесом. Детали (f1a), (f1b), (f2a), (f2b) и (f3a) показаны с двух разных сторон. Имеется четыре одинаковых пластиковых винта (f4)

Часть А. Весы Гуи и магнитный момент (4.2 балла)

Модель

Будем считать, что магнит можно рассматривать как магнитный диполь с магнитным моментом \vec{m}_m . Сила, действующая на такой диполь с магнитным моментом $\vec{m}_m = m_m \vec{e}_z$ в магнитном поле $\vec{B} = B(z)\vec{e}_z$, равна

$$\vec{F} = m_m \frac{dB(z)}{dz} \vec{e}_z.$$

Когда через катушки анти-Гельмгольца течет ток i , поле \vec{B} на их оси \vec{e}_z вращения равно

$$\vec{B}(z) = \alpha i (z - z_0) \vec{e}_z.$$

Это выражение справедливо только вблизи центра устройства, координата которого $z = z_0$.

Магнитное поле в катушках

A1 Численно оцените характерное время работы τ одной из батареек, предназначенных для эксперимента, в случае протекания тока силой порядка 2 А. **0.2**

Этот результат необходимо учитывать при выборе метода измерения. Учтите, что катушки используются только в части А. Обратите внимание, что у вас есть запасная батарейка.

Вставьте датчик магнитного поля внутрь катушек, как показано на рис. 2. См. также этот рисунок для определения положения датчика в катушках.

A2 При фиксированной силе тока $i_0 \simeq 1.0$ А измерьте зависимость магнитного поля B_z от положения z датчика на оси катушек и постройте её график. Определите наибольшую область $[z_{\min}, z_{\max}]$, где экспериментальная зависимость магнитного поля от координаты линейна. **0.8**

A3 Разместив датчик в двух положениях (z_1, z_2) в области линейной зависимости, постройте график, чтобы проверить зависимость \vec{B} от силы тока, заданную уравнением (2). Определите значение α и его погрешность. **0.9**

Road to IPhO

Весы Гуи

Извлеките датчик магнитного поля из катушек и поместите внутрь катушек датчик силы, как показано на рис. 2. Обратите особое внимание на расположение электрических проводов в желобах.

A4 Проведите экспериментальные измерения грамм-силы m_f в зависимости от силы тока i . Постройте график, с помощью которого определите значение магнитного момента m_m магнита и его погрешность. **0.8**

Альтернативное измерение магнитного момента

В дипольном приближении магнитное поле магнита с магнитным моментом m_m на оси вращения z имеет вид

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 m_m}{2\pi(z - z_a)^3},$$

где z_a – не обязательно геометрический центр магнита, и где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$.

A5 Измерьте магнитное поле B_z вдоль оси вращения свободного магнита в зависимости от расстояния z . Постройте график для проверки модели, заданной уравнением (3), в том числе в области отклонения от теоретической зависимости. Получите новое значение для m_m , и его погрешность. **1.3**

A6 Учитывая оба результата, полученные в A4 и A5, получите окончательное экспериментальное значение m_m и его погрешность. **0.2**

Часть В. Определение магнитного поля Земли (5.8 балла)

Модель

В этой части для определения горизонтальной составляющей B_e магнитного поля Земли исследуются колебания магнита в горизонтальной плоскости. Схема установки и инструкции по сборке приведены на рис. 3. и выше. На подвес с магнитом (**f3**) действуют два момента сил относительно вертикальной оси:

- момент силы со стороны проволоки, задаваемый выражением $\Gamma_f = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0)$, где C_f – постоянная величина, L – расстояние между точками крепления проволоки, а θ_0 – угол, при котором проволока не испытывает деформации кручения.
- момент силы со стороны магнитного поля Земли, задаваемый выражением $\Gamma_e = -m_m B_e \sin(\theta - \theta_e)$, где угол θ_e задаёт направление магнитного поля Земли.

Обозначим за J момент инерции подвеса с магнитом относительно вертикальной оси. Тогда уравнение моментов примет вид:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = \Gamma_f + \Gamma_e = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0) - m_m B_e \sin(\theta - \theta_e).$$

В приближении $\sin(\theta - \theta_e) \simeq \theta - \theta_e$ решением будут гармонические колебания с периодом T . В этой части задачи вы можете лепить клейкую массу (**1**) в любую форму и прикреплять к любым устройствам.

Внимание: Во избежание влияния внешних магнитных полей магнит должен располагаться на расстоянии не менее 20 см от любых металлических предметов и источников магнитного поля (в том числе и других магнитов).

Road to IPhO

Экспериментальная установка и первые измерения

В пунктах В1–В5 используйте проволоку длиной $L = 34$ см и убедитесь, что она не скручена. Предположим сначала, что момент сил со стороны проволоки пренебрежимо мал по сравнению с моментом сил со стороны магнитного поля Земли, и вернёмся к этому предположению позже.

Чтобы θ_0 совпал с θ_e , с помощью детали (f2a) отрегулируйте θ_0 так, чтобы подвес (f3) не вращался при извлечении магнита. Затем снова вставьте магнит в держатель и не меняйте θ_0 вплоть до пункта В5.

В1 Предложите метод экспериментального определения B_e . Перечислите величины, которые вы будете измерять, и их единицы измерения. Изобразите эти величины на подробной схеме и запишите уравнения, связывающие их с величинами, введёнными в условии. Для каждой величины укажите, является ли она фиксированной (F) или изменяется (V) в рамках ваших измерений. **0.3**

В2 Используя описанный вами метод, постройте график и вычислите B_e и его погрешность. **1.1**

Оценка момента силы со стороны проволоки

В3 Не меняя длину проволоки $L = 34$ см, исследуйте колебания подвеса без магнита и вычислите C_f и ее погрешность, используя по одному измерению периода для двух конфигураций установки. Запишите уравнение, связывающее C_f с измеренными величинами. **0.7**

В4 Используя результаты измерений предыдущего пункта, запишите выражение и вычислите критическую длину L_c , при которой множители C_f/L и $m_m B_e$ в выражениях для моментов сил Γ_f и Γ_e равны. Вычислите отношение $(C_f/L)/(m_m B_e)$ для измерений пункта В2 и выберите один из интервалов: $[0, 1\%)$, $[1\%, 5\%)$, $[5\%, 20\%)$, $[20\%, 50\%)$, $[50\%, \infty)$. **0.3**

Статические измерения

Теперь измерим магнитное поле Земли статическим методом. Снова вставьте магнит в держатель. Вращая деталь (f2a) на рис. 3, можно менять угол θ_0 , что приводит к скручиванию проволоки.

В5 Не меняя длину проволоки $L = 34$ см, снимите зависимость равновесного положения магнита θ_{eq} от угла θ_0 , постройте подходящий график и вычислите B_e и его погрешность. **1.1**

В6 Измените L и повторите измерения предыдущего пункта для двух других значений длины, чтобы убедиться, что момент сил со стороны проволоки зависит от L . Построив итоговый график, учитывающий все зависимости, вычислите B_e и его погрешность. **2.3**