

5. Лабораторная работа № 41

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы

Экспериментально определить горизонтальную составляющую вектора напряженности магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности

Учебная установка «Тангенс-гальванометр» с катушками Гельмгольца, источником и регулятором постоянного тока.

Подготовка к работе

По лекциям и приведенному ниже списку литературы изучите следующие вопросы:

- 1) магнитное поле и его характеристики;
- 2) закон Био – Савара – Лапласа,
- 3) принцип суперпозиции полей;
- 4) магнитное поле витка с током;
- 5) магнитное поле Земли и его составляющие.

Вопросы для допуска к работе

1. Как связаны между собой индукция и напряженность магнитного поля в среде (например, в воздухе)?
2. Чему равна напряженность магнитного поля на оси между катушками Гельмгольца?
3. Укажите составляющие магнитного поля Земли.

4. Изложите методику определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

5. Как изменяются составляющие магнитного поля Земли при переходе от экватора к полюсам?

Теоретическое введение

В пространстве, окружающем электрические токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое магнитным. Оно обнаруживается по силовому действию на внесенные в него проводники с током или на намагниченные тела. Силовой характеристикой этого магнитного поля является *вектор магнитной индукции* \vec{B} .

Магнитное поле изображают с помощью *линий магнитной индукции* – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} . Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с током, этим они отличаются от линий напряженности электростатического поля, которые начинаются на положительных зарядах, а заканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность.

В общем случае, магнитное поле в пространстве могут создавать как макротоки (токи, текущие в проводниках), так и микротоки (атомные и молекулярные токи в магнитных материалах). Поэтому вектор магнитной индукции \vec{B} характеризует результирующее магнитное поле.

Вектор напряженности $\vec{H} = (\vec{B} / \mu_0 \mu)$ количественно характеризует поле макротоков ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды).

Закон Био – Савара – Лапласа записывается в векторной (5.1) и скалярной (5.2) формах и позволяет определить магнитную индукцию \vec{dB} , создаваемую однородным элементом \vec{dl} проводника с током I на расстоянии \vec{r} от него:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \cdot [\vec{dl}, \vec{r}]}{r^3}; \quad (5.1)$$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \sin \alpha, \quad (5.2)$$

где α – угол между векторами \vec{dl} и \vec{r} , вектор \vec{dl} численно равен длине участка проводника и совпадает по направлению с током I (рис. 5.1).

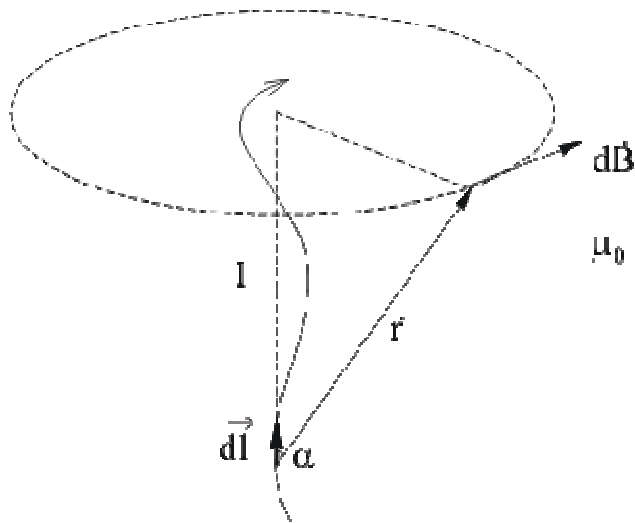


Рис. 5.1. Взаимное расположение в пространстве векторов \vec{dB} , \vec{dl} и \vec{r}

Для того чтобы определить в некоторой точке магнитную индукцию \vec{B} , создаваемую всем проводником, необходимо определить магнитную индукцию, создаваемую отдельными участками проводника \vec{dB} , и проинтегрировать по контуру:

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B}. \quad (5.3)$$

Каждый элемент тока, согласно закону Био – Савара – Лапласа, создает магнитное поле с индукцией \vec{dB} , определяемой формулой (5.1).

Чтобы найти поле в центре кольца с током, мысленно разобьем его на множество элементов тока (рис. 5.2).

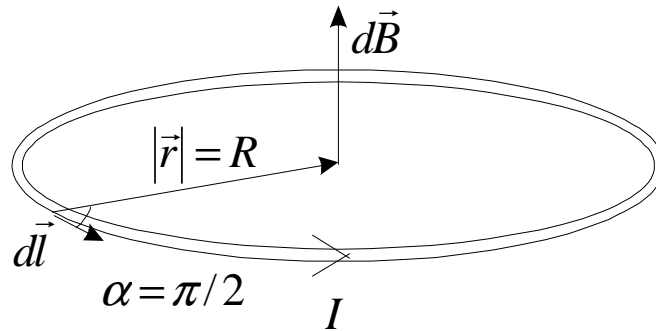


Рис. 5.2. Магнитная индукция в центре кольца с током

Прежде всего, проверим, как направлены векторы \overrightarrow{dB} , создаваемые каждым элементом тока. Пользуясь *правилом правого винта* для определения направления \overrightarrow{dB} , легко убедиться, что в центре кольца все векторы \overrightarrow{dB} направлены в одну сторону, перпендикулярно плоскости кольца. Следовательно, векторную сумму $\sum_{i=1}^n \overrightarrow{dB}$ можно заме-

нить арифметической $\sum_{i=1}^n dB$, и для магнитной индукции в центре кольца получим выражение

$$B = \oint_l \frac{\mu_0 \mu I \sin \alpha}{4\pi r^2} dl. \quad (5.4)$$

Из геометрии задачи видно, что $\alpha = \frac{\pi}{2}$; $\sin \alpha = 1$; $r = R = \text{const}$.

Вынося из-под знака интеграла постоянные величины, получаем:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R^2} \oint_l dl. \quad (5.5)$$

Так как интеграл $\oint_l dl = 2\pi R$, то индукция в центре кольца находится как

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}. \quad (5.6)$$

Направление вектора магнитной индукции \vec{B} на оси кольца с током показано на рис. 5.3.

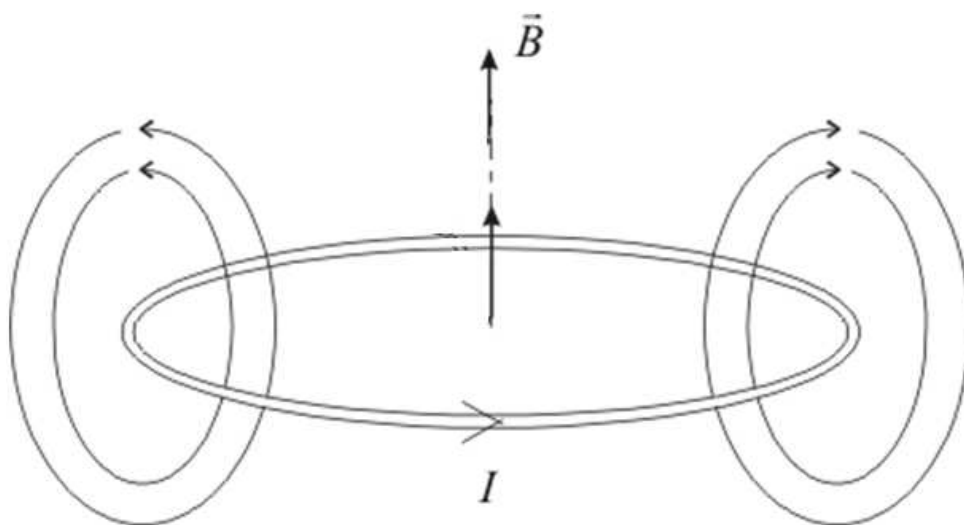


Рис. 5.3. Линии магнитной индукции кольца с током

Вектор магнитной индукции \vec{B} направлен перпендикулярно плоскости кольца, направление вектора \vec{B} определяется *по правилу правого винта* для кольцевого тока.

Методика определения магнитного поля Земли

Существование магнитного поля у Земли объясняется токами, протекающими по поверхности жидкого металлического ядра Земли, а также намагниченностью горных пород. Положение магнитных полюсов Земли не совпадает с положением географических полюсов: вблизи северного географического полюса находится южный магнитный полюс S , а северный магнитный полюс N находится в Антаркти-

де вблизи южного географического полюса. Магнитное поле Земли показано на рис. 5.4.

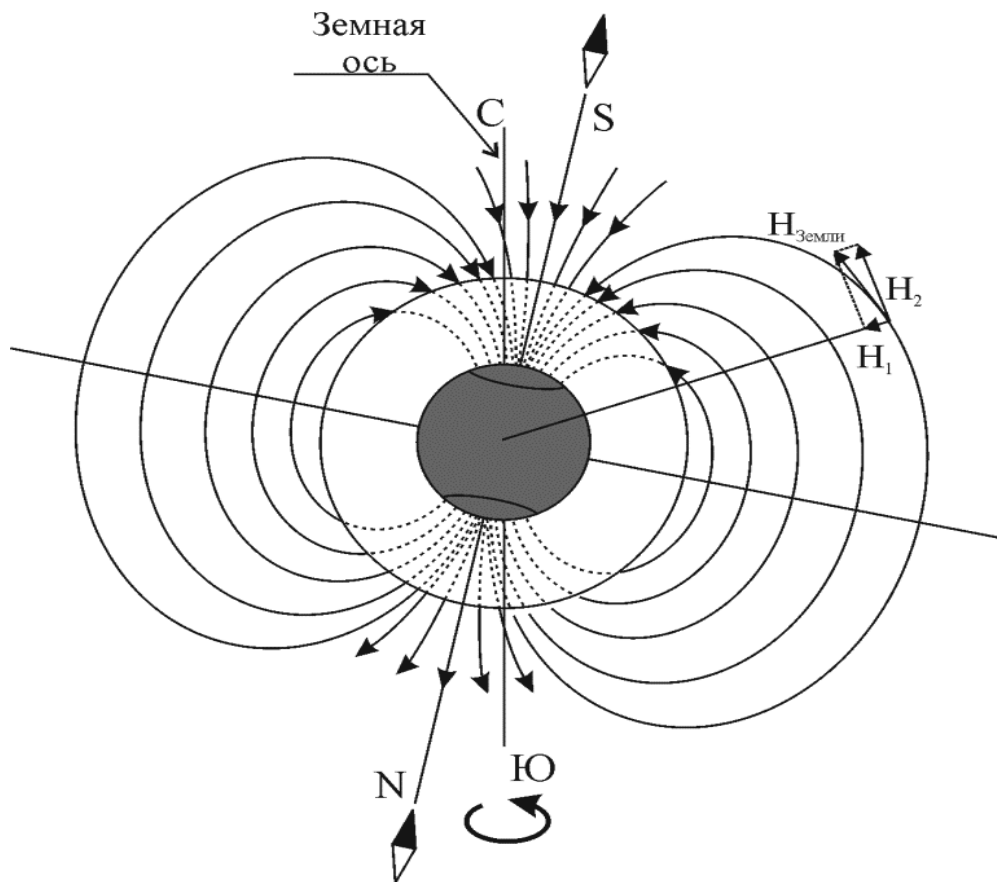


Рис. 5.4. Магнитное поле Земли:

\vec{H}_1 – вертикальная составляющая; \vec{H}_2 – горизонтальная составляющая

Плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка компаса, называют плоскостью геомагнитного меридиана данного места, а прямую, по которой горизонтальная плоскость пересекается с плоскостью меридиана, называют геомагнитным меридианом. Угол между направлениями геомагнитного и географического меридианов называют магнитным склонением, эта величина зависит от географической широты местности и указана на картах.

На практике с помощью магнитной стрелки наиболее удобно определять горизонтальную составляющую \vec{H}_2 , направленную вдоль геомагнитного меридиана.

Лабораторная установка для определения горизонтальной составляющей \vec{H}_2 магнитного поля Земли (рис. 5.5) состоит из двух катушек с одинаковым числом витков N , расположенных соосно на расстоянии друг от друга, равном радиусу катушки (катушки Гельмгольца), и компаса, установленного в центре на осевой линии. Магнитное поле катушек \vec{H}_k отклоняет магнитную стрелку компаса от плоскости магнитного меридиана на угол β . Суммарное магнитное поле \vec{H} , вдоль которого устанавливается магнитная стрелка, может быть найдено как

$$\vec{H} = \vec{H}_2 + \vec{H}_k.$$

Из геометрических соображений можно выразить величину горизонтальной составляющей H_2 через известные величины H_k и β :

$$H_2 = \frac{H_k}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (5.7)$$

Магнитное поле катушек H_k на оси, проходящей через центры катушек в точке, равноудаленной от плоскостей обеих катушек, вычисляется по формуле

$$H_k = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{N \cdot I}{R}, \quad (5.8)$$

где N – число витков в катушке; I – протекающий по катушке ток; R – радиус катушки.

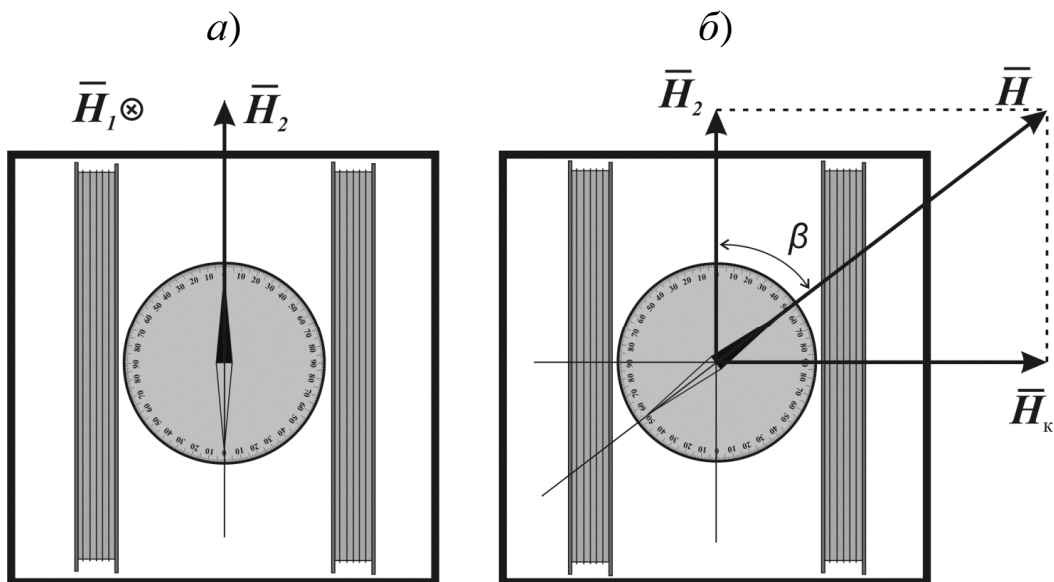


Рис. 5.5. Лабораторная установка для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (вид сверху)

Чтобы повысить точность измерений, угол отклонения магнитной стрелки компаса измеряют дважды, изменяя направление тока в катушках на противоположное, при этом магнитная стрелка отклоняется в противоположную сторону на угол β_2 . Окончательно горизонтальная составляющая магнитного поля Земли может быть определена из выражения:

$$H_2 = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{N \cdot I}{R \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right)}. \quad (5.9)$$

Порядок выполнения работы

1. При отсутствии тока в катушках сориентируйте установку так, чтобы магнитная стрелка компаса была параллельна плоскостям катушек (установка должна находиться вдали от массивных металлических предметов и проводов с электрическим током).

2. Включите прибор и установите переключателем на передней панели минимальное значение тока в катушках, при этом стрелка компаса отклонится на некоторый угол β_1 , измерьте значение этого угла в градусах, результаты измерений занесите в табл. 5.1.

3. Переключателем измените направление тока в катушках и измерьте значение угла β_2 , результаты измерений занесите в табл. 5.1.

4. Проведите измерения углов отклонения магнитной стрелки β_1 и β_2 при других значениях тока в катушках и результаты измерений занесите в табл. 5.1.

5. Вычислите значение $\operatorname{tg}\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right)$ и значение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля H_2 по формуле (5.9).

6. Определите среднее значение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля $\langle H_2 \rangle$ и среднеквадратичную погрешность σ_H по формулам из введения.

Таблица 5.1

$I, \text{ мА}$	80	110	140	170	200
β_1					
β_2					
$\operatorname{tg}\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right)$					
H_2					
$\langle H_2 \rangle$					
ΔH_2					
σ_H					

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Био – Савара – Лапласа для участка проводника с током в векторной и скалярной форме. Ответ проиллюстрируйте.
2. Получите выражение для магнитной индукции в центре кругового тока.
3. Получите рабочую формулу для определения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли.
4. Что такое магнитное склонение и как оно зависит от географической широты местности?

Список литературы

1. Тюшев А. Н., Дикусар Л. Д. Курс лекций по физике. Часть 3 : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2011. – С. 93–102.
2. Трофимова Т. И. Курс физики : учеб. пособие. – М. : Академия, 2015. – С. 207–222, гл. 14.
3. Савельев И. В. Курс общей физики в 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм : учеб. пособие для втузов – М. : Астрель, 2016. – С. 137–142, гл. 6.2, 6.3.