

Лабораторная работа №7 Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли¹

Цель работы: определить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли; сравнить с международной моделью главного магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности:



тангенс-гальванометр



вольтамперметр М2044



источник ВС 4-12



реостат РПШ-2 100 Ом 2А



переключатель двухполюсный



соединительные провода
(одна пара проводов должна быть
достаточно длинной и витой)

¹ Работа подготовлена в рамках выполнения ВКР студентом группы 5 «Д» факультета МФиИ Авсянником Вадимом Сергеевичем. Научный руководитель Романов Р.В. – 2013 год.

Теоретическое введение

1. Некоторые сведения о магнитном поле

Пусть имеется очень тонкий проводник с током.

Элементом тока называется величина $I d\vec{l}$, где $d\vec{l}$ – бесконечно малый вектор, направленный вдоль проводника по току. Понятие элемента тока в магнетизме играет ту же роль, что и пробный заряд в электростатике.

Магнитное поле – это объективная реальность, и, следовательно, его можно характеризовать, измерять и использовать.

Для характеристики данного поля вводят векторную величину, которую называют индукцией магнитного поля \vec{B} .

Если там, где находится элемент тока, существует магнитное поле с индукцией \vec{B} , то оно действует на проводник с силой $d\vec{F}$ (рис. 7.1.1)

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \vec{B}]. \quad (7.1.1)$$

Можно установить единицу измерения магнитной индукции, исходя из (7.1.1)

$$[\vec{B}] = \left[\frac{F}{Il} \right] = 1 \frac{\text{НЬЮТОН}}{\text{ампер} \cdot \text{метр}}.$$

Однако принято другое определение.

def: 1 тесла – единица СИ индукции магнитного поля, равная магнитной индукции однородного магнитного поля в котором на плоский контур с током, имеющий магнитный момент $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, действует максимальный вращающий момент равный $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

$$[\vec{B}] = \left[\frac{M}{P_m} \right] = \left[\frac{Fl}{IS} \right] = \left[\frac{mal}{IS} \right] = 1 \frac{\text{КГ}}{\text{А} \cdot \text{С}^2} = 1 \text{ тесла} = 1 \text{ Тл}.$$

Часто величину магнитного поля выражают не в единицах СИ – теслах (Тл), а в единицах СГС¹ – гауссах (Гс), так как к этой величине слишком привыкли физики-профессионалы.

Так же как в электростатике, в магнитостатике вводят дополнительный вектор, который называется напряжённостью магнитного поля.

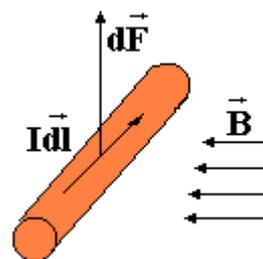


Рис. 7.1.1

¹ СГС система единиц (SGS) - система единиц физических величин с основными единицами: сантиметр-грамм-секунда. Применяется главным образом в трудах по физике и астрономии. В электродинамике использовались две системы единиц СГС: электромагнитная (СГСМ) и электростатическая (СГСЭ). В XX веке наибольшее распространение получила симметричная (смешанная) система единиц СГС (её называют также Гаусса системой единиц). В этой системе магнитные единицы равны единицам СГСМ (максвелл, гаусс, эрстед и др.), электрические — единицам СГСЭ.

В однородных изотропных средах

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}, \quad (7.1.4)$$

где μ – характеристика магнитных свойств среды, которую называют магнитной проницаемостью среды. Она показывает, во сколько раз индукция поля в среде **больше** индукции поля в вакууме. μ_0 – магнитная постоянная, равная

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Генри/метр} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Таблица 1.1

величина	SI	СГС
Индукция	1 тесла = 10^4 Гс	1 гаусс = 10^{-4} Тл
Напряжённость	1 ампер/метр = 0,0126 Э	1 эрстед = 79,5775 А/м

Полезная связь: В(Тл) = $10^{-4} \cdot$ Н(Э).

Индукция магнитного поля и напряжённость электрического поля являются основными характеристиками электромагнитного поля, так как определяют силу, действующую на движущуюся заряженную частицу, – силу Лоренца.

$$\vec{F} = q \left\{ \vec{E} + [\vec{v} \vec{B}] \right\}. \quad (7.1.6)$$

Модуль магнитной составляющей силы Лоренца

$$F = |q| v B \sin \alpha, \quad (7.1.7)$$

где α – угол между скоростью и магнитной индукцией.

Движением заряженных частиц в магнитном поле Земли, которое сопровождается излучением, объясняют красивейшее явление, которое наблюдается в высоких широтах – северное (полярное) сияние.

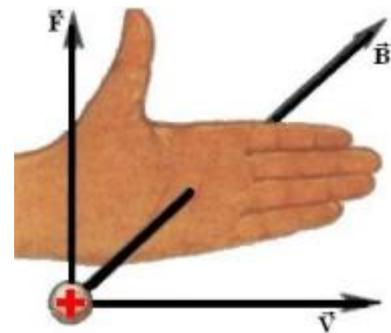


Рис. 7.1.2

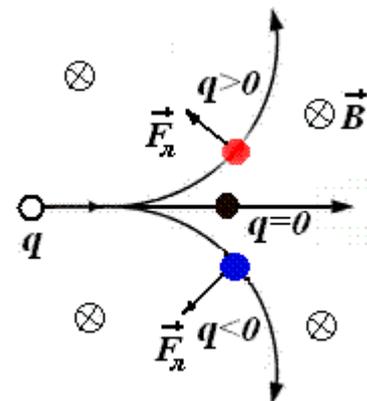


Рис. 7.1.3



Рис. 7.1.4

Рис. 7.1.5



2. Магнитное поле Земли

Земля обладает собственным магнитным полем, или по выражению Гилберта «Земля – большой магнит». Магнитное поле Земли до расстояний $3R$ (R – радиус Земли) соответствует полю однородно намагниченного шара с напряжённостью поля $55,7 \text{ А/м}$ ($0,70 \text{ Э}$) у полюсов и $33,4 \text{ А/м}$ ($0,42 \text{ Э}$) на экваторе. Индукция геомагнитного поля убывает от магнитных полюсов к магнитному экватору от 70 до 40 мкТл .

На больших расстояниях поле Земли имеет более сложное строение.

Магнитная ось наклонена к географической оси примерно на $11,5^\circ$. Южный магнитный полюс находится на Севере. Примерно с начала XVII века располагавшийся под паковыми льдами в границах нынешней канадской Арктики, он вышел за пределы 200-мильной зоны Канады и движется в направлении Таймыра (рис. 7.1.5) (данные 2009 года). Северный магнитный полюс с края Антарктиды вышел в Индийский океан.

Наличие у Земли магнитного поля объясняют процессами, протекающими в жидком металлическом ядре Земли.

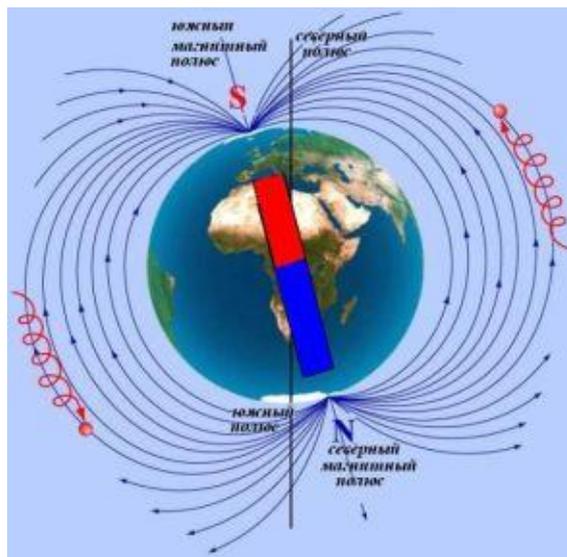


Рис.7.2.1

3. Составляющие земного магнетизма

Полное представление о величине магнитного поля Земли в данной точке можно получить, зная значения трёх величин, называемых элементами земного магнетизма: горизонтальной составляющей индукции магнитного поля, магнитного склонения и магнитного склонения.

Магнитное склонение (на рис.7.3.1 – D) – угол между географическим и магнитным меридианами в точке земной поверхности. Магнитное склонение считается положительным, если северный конец магнитной стрелки отклонен к востоку от географического меридиана, и отрицательным – если к западу. Значение магнитного склонения указывается на магнитных картах и используется для определения истинного меридиана по

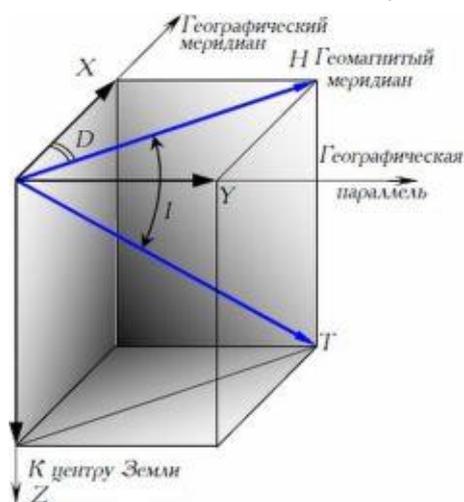


Рис. 7.3.1

показанию магнитного компаса.

Магнитное наклонение (на рис. 7.3.1 – I) – угол между магнитной силовой линией и горизонтальной плоскостью. На магнитных полюсах Земли, а также в районах крупных магнитных аномалий магнитное наклонение равно 90° .

Направление магнитных силовых линий устанавливается с помощью магнитной стрелки (компаса). Если подвесить магнитную стрелку NS на нити так, чтобы точка подвеса совместилась с центром тяжести, то стрелка установится по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли (на рис. 7.3.1 – направление T). Вертикальная плоскость, проходящая через ось установившейся магнитной стрелки, называется плоскостью геомагнитного меридиана.

Проекция вектора магнитной индукции на плоскость горизонта представляет горизонтальную составляющую магнитной индукции магнитного поля. Эта проекция, как и вектор магнитной индукции, лежит в плоскости магнитного меридиана. Проекция вектора \vec{B} на ось OX называется северной составляющей и обозначается B_x , проекция на OY – восточной составляющей и обозначается B_y , а на ось OZ – вертикальной составляющей B_z .

$$B_r = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad B = \sqrt{B_r^2 + B_z^2} \quad (7.3.1)$$

Напряжённости магнитного поля Земли измеряются в гауссах (Гс) или гаммах (γ). $1 \gamma = 10^{-5} \text{Гс}$.

Если магнитная стрелка может свободно вращаться лишь вокруг вертикальной оси, то она будет устанавливаться под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в плоскости магнитного меридиана.

4. Тангенс-гальванометр

В работе для измерения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли используется тангенс-гальванометр (рис. 7.4.1).

Он состоит из катушки, в центре которой на вертикальной оси располагается магнитная стрелка. Стрелка может свободно вращаться внутри круглой коробки с прозрачной крышкой (компас). По контуру дна коробки намечена круговая шкала, проградуированная в угловых градусах.



Рис. 7.4.1

Катушка состоит из N витков и её диаметр значительно больше длины стрелки. Если в катушке течет ток I , то в её центре возникает магнитное поле, индукция которого равна

$$B_K = \frac{\mu_0 I}{2r} N, \quad (7.4.1)$$

где r – радиус катушки.

Вектор \vec{B}_K перпендикулярен плоскости катушки. Если расположить плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана, то магнитная стрелка устанавливается в направлении результирующего поля \vec{B} (рис. 7.4.2).

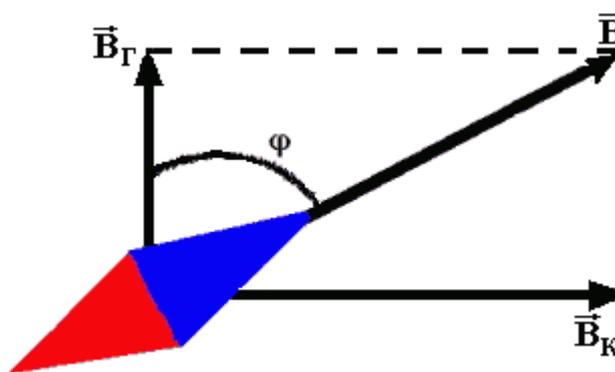


Рис. 7.4.2

По принципу суперпозиции это поле равно векторной сумме слагаемых полей: горизонтальной составляющей индукции B_G магнитного поля Земли и индукции B_K магнитного поля катушки.

Из рис. 7.4.2 видно, что

$$\operatorname{tg} \varphi = B_K / B_G. \quad (7.4.2)$$

Из уравнений (7.4.1) и (7.4.2) получим

$$B_G = \frac{\mu_0 N}{2r} \cdot \frac{I}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{\mu_0 N}{D} \cdot \frac{I}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (7.4.3)$$

где D – диаметр катушки.

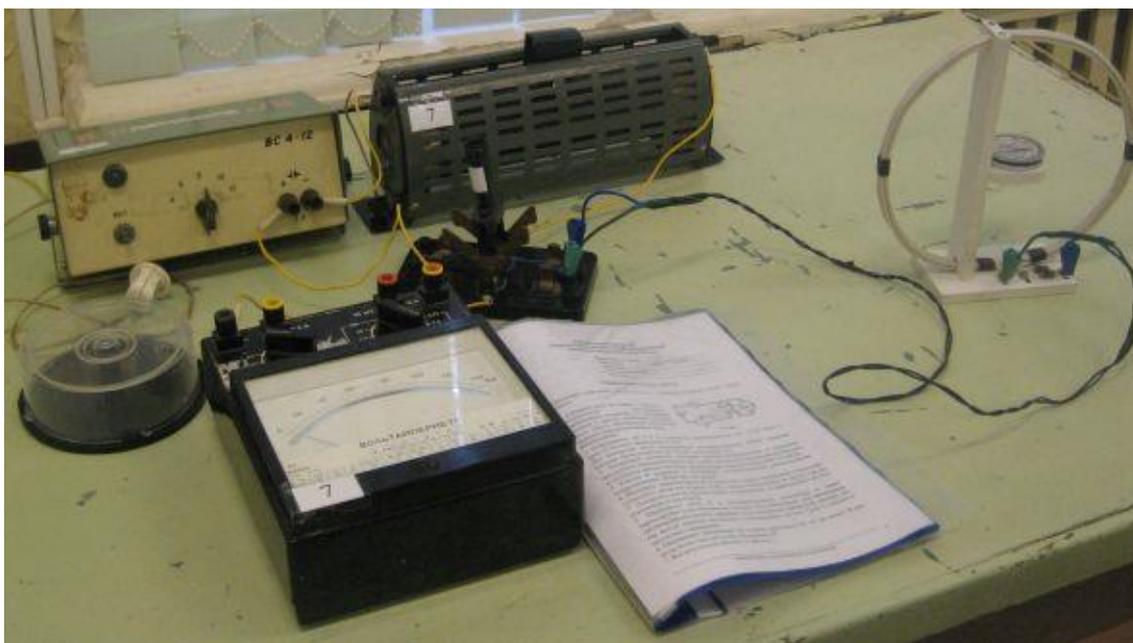


Рис. 7.4.3.

Общий вид установки

Лабораторная работа №7
Определение горизонтальной составляющей
индукции магнитного поля Земли

Выполнил студент _____
Факультет _____ курс _____ группа _____
Проверил _____
Показания сняты _____
Зачтено _____

Порядок выполнения работы

Параметры установки: $D = 2r = 0,215$ м – диаметр катушки; $N = 6$ – число витков.

1. Соберите цепь по схеме 7.1. Тангенс-гальванометр постарайтесь расположить подальше от источника питания и других приборов, которые могут иметь собственные достаточно сильные электромагнитные поля.

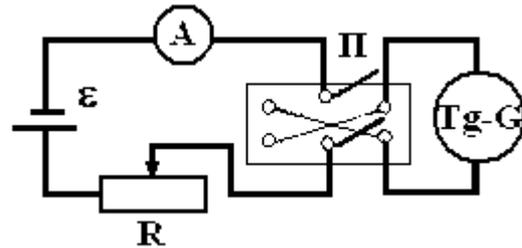


Схема 7.1

ВНИМАНИЕ!

ε – выпрямитель ВС 4-12 в положении

переключателя «8». Сила тока в цепи не должна превышать 0,70 А.

*Для измерения тока используется вольтамперметр М2044 (крайние клеммы, переключатель на 750 мА, множитель X1). **Соблюдайте полярность!***

2. Установите плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана Земли так, чтобы магнитная стрелка расположилась в плоскости витков катушки, указывая при этом на Север и Юг (*N and S*).

3. Реостат *R* выведите в положение, соответствующее максимальному сопротивлению. Включите источник.

4. Поставьте переключатель *П* в левое или правое положение. Реостатом установите такой ток в цепи, чтобы стрелка отклонилась не менее, чем на 5° . Дождитесь, когда стрелка придёт в равновесие, зафиксируйте её угол отклонения и ток в цепи.

5. Перекиньте ключ *П* в противоположное положение и также зафиксируйте угол отклонения стрелки. Это необходимо для нахождения среднеарифметического значения угла отклонения магнитной стрелки, так как всегда имеется неточность в установлении витков Tg-G в плоскости магнитного меридиана.

6. Постепенно увеличивая ток в цепи, выполните пп. 4 – 5 не менее 10 раз, но не более чем для углов отклонения 70° .

7. Все результаты заносите в таблицу 1.

Таблица 1

№	I, A	φ_+	φ_-	$\varphi_{cp} = \frac{\varphi_+ + \varphi_-}{2}$	$\text{tg } \varphi_{cp}$	$B_{\Gamma},$ мкТл	$\Delta B_{\Gamma},$ мкТл
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
<i>среднее</i>							

8. По формуле (7.4.3) рассчитайте горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли для каждого случая.

9. Рассчитайте среднее значение индукции и отклонение от среднего для каждого случая.

10. Вычислите абсолютную погрешность

$$\Delta B = t_{\alpha N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - \langle B \rangle)^2}{N(N-1)}}, \quad (\text{II.1})$$

где N – число опытов, $t_{\alpha N}$ – коэффициент Стьюдента (вероятность α задаёт преподаватель).

11. Запишите результат

$$B_{\Gamma} = \pm \quad \text{мкТл}, \quad \delta_B = \quad \%$$

12. Сравните полученные данные со значениями международной модели главного магнитного поля Земли (см. приложение).

II. Задание для студентов физических специальностей

1. Выберите результат наиболее близкий к среднему и для него рассчитайте относительную погрешность по формуле

$$\varepsilon_B = \sqrt{\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\text{tg } \varphi)}{\text{tg } \varphi}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\varphi}{\sin 2\varphi}\right)^2}, \quad (\text{II.2})$$

а затем вычислите абсолютную погрешность.

2. Запишите результат

$$B_{\Gamma} = \pm \quad \text{мкТл}, \quad \delta_B = \quad \%$$

3. Постройте график зависимости $\text{tg } \varphi_{cp} = f(I)$. Методом наименьших квадратов определите коэффициент наклона прямой и значение индукции магнитного поля.

Контрольные вопросы

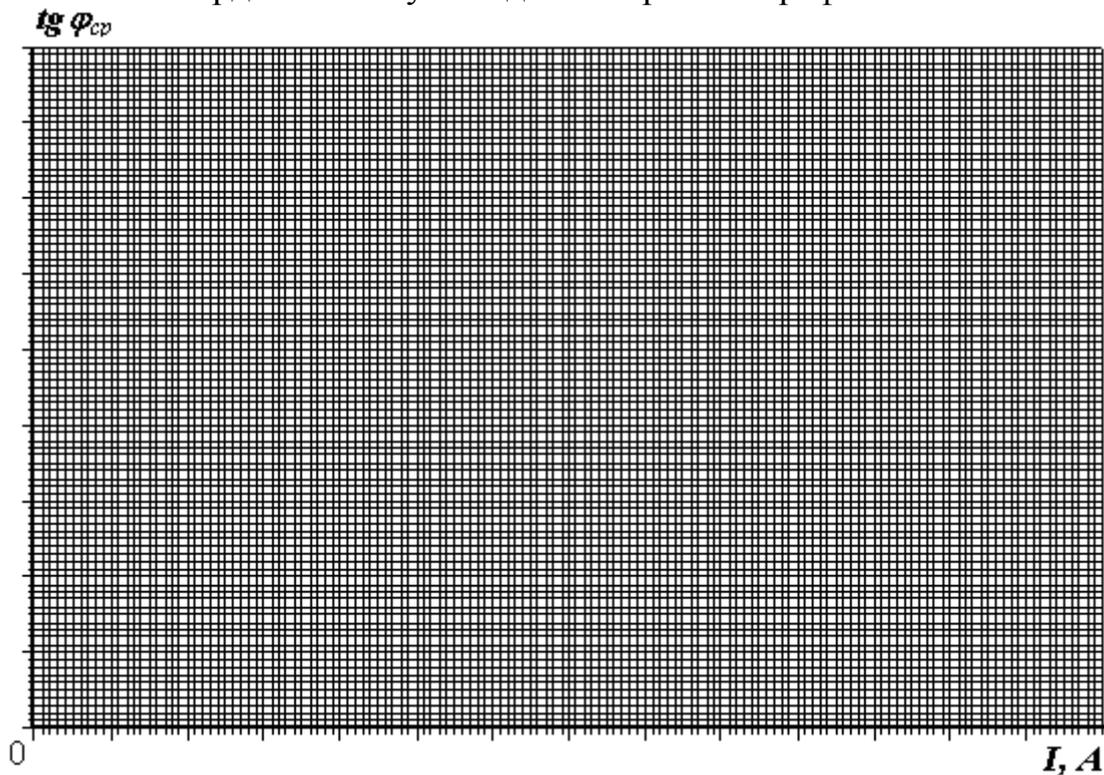
1. Характеристики магнитного поля и их единицы измерения в СИ.
2. Закон Био-Савара-Лапласа. Поле прямого и кругового тока.
3. Теорема о циркуляции \vec{H} . Поле соленоида и тороида.
4. Объясните методику определения горизонтальной составляющей магнитной индукции магнитного поля Земли.

Литература

(см. основной список литературы)

Приложение

масштабно-координатная бумага для построения графиков



Приложение

Значения магнитного поля Земли в разных городах
(данные собраны из разных источников, не всегда достоверных)

		B_H , мкТл	B_V , мкТл	B , мкТл
экватор		41,00	0,00	41,00
Симферополь	44°56'53" с. ш. 34°06'15" в. д.	21,36		
Мариуполь	47°07'50" с. ш. 37°33'50" в. д.	19,99		
Иркутск	52°17'00" с. ш. 104°18'00" в. д.	19,22		
Тула	54°12'00" с. ш. 37°37'00" в. д.			
Челябинск	55°09'00" с. ш. 61°24'00" в. д.	19,78		
Москва	55°45'20.83" с. ш. 37°37'03.48" в. д.	20,00	50,00	53,85
Эстония (Таллинн)	59°26'00" с. ш. 24°45'00" в. д.	16,34		
Санкт-Петербург	59°57'00" с. ш. 30°19'00" в. д.	14,92	50,09	52,26
полюс магнитный	84°54'00" с.ш. 131°00'00" з.д.	0,00	66,00	66,00

**Международная модель главного магнитного поля Земли
на декабрь 2012 года для 37°37'00" в. д.
высота над уровнем моря – 170-204 м**

URL: <http://serv.izmiran.ru/cgi-bin/igrf-11a.py>.

