

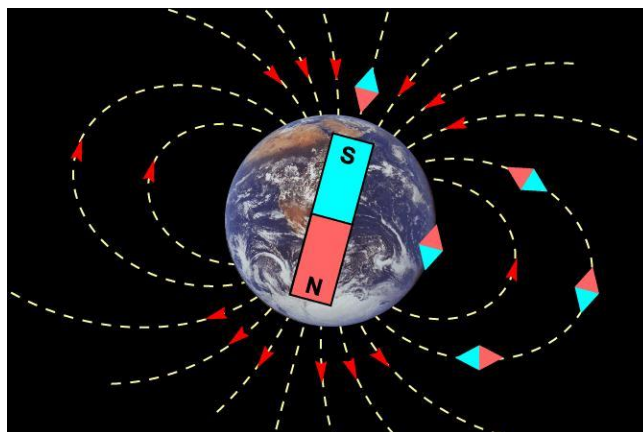
Иркутский государственный технический университет
Кафедра общеобразовательных дисциплин

ФИЗИКА

Лабораторная работа

«Определение горизонтальной составляющей
напряженности магнитного поля Земли»

Доц. Щепин В.И.
«e-mail shch@istu.edu»



Иркутск 2016

Лабораторная работа «Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли»

Цель работы: изучение магнитного поля постоянного тока и применение закона Био-Савара-Лапласа для определения горизонтальной составляющей напряженности земного магнитного поля с помощью тангенс-гальванометра.

Краткая теория.

Магнитное поле Земли.

Земля представляет собой магнит, полюса которого находятся вблизи географических полюсов: вблизи северного географического полюса (рис.1) расположен южный магнитный полюс S , а вблизи южного географического – северный магнитный полюс N .



Рис. 1. Географические и геомагнитные полюса Земли

До настоящего времени нет законченной теории, объясняющей происхождение магнитного поля Земли и его особенностей. По последним гипотезам поле Земли связано с токами, циркулирующими по поверхности ядра Земли, а также отчасти с намагниченностью горных пород и токами в радиационных поясах, охватывающих Землю.

Существование земного магнетизма и свойства магнитной стрелки были известны издавна. В китайских летописях указывается, что для определения направления на север в X–XI веках до нашей эры пользовались магнитными стрелками. По свидетельству греческих и римских историков, уже в VII веке до нашей эры знали о том, что некоторые камни притягивают к себе железо.

Первые упоминания о применении магнитной стрелки европейскими мореплавателями относятся к XII веку. Постоянные магниты и проводники с током окружены магнитным полем.

Магнитное поле Земли действует на магнитную стрелку. Свободно подвешенная магнитная стрелка устанавливается в каждой точке земного шара в определенном положении, по направлению магнитного поля. На этом основано устройство компаса. Измерение напряженности магнитного поля Земли имеет очень важное практическое значение, так, например, в мореплавании, при геофизической разведке, в навигации, и т.д.

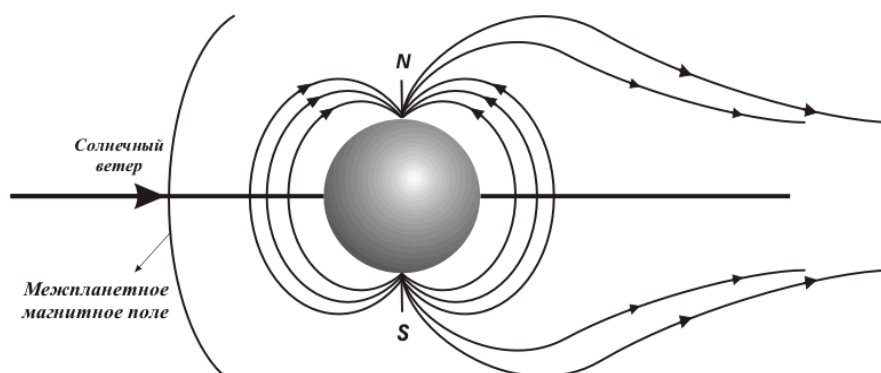


Рис. 2. Магнитное поле Земли

За направление магнитного поля принимают направление силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки, помещенный в данную точку поля. Магнитное поле Земли намагничивает находящееся в нем железо, индуцирует в движущихся проводниках электрические токи и обладает всеми свойствами магнитного поля. Магнитное поле Земли еще называют геомагнитным полем.

Магнитное поле Земли играет очень важную роль защищая все живое от Солнечного ветра (рис. 2) *Солнечный ветер* – это поток ионизированных части, выбрасываемых с поверхности Солнца во всех направлениях с большой скоростью 400 км/с и более. С солнечным ветром связано много природных явлений, например, магнитные бури, полярные сияния, и др.

Магнитное поле Земли в первом приближении совпадает с магнитным полем диполя (рис. 3). Северным магнитным полюсом (N), или положительным полюсом – называется участок поверхности магнита (Земли) из которого выходят силовые линии, а участок, в который входят, – южным (S), или отрицательным.

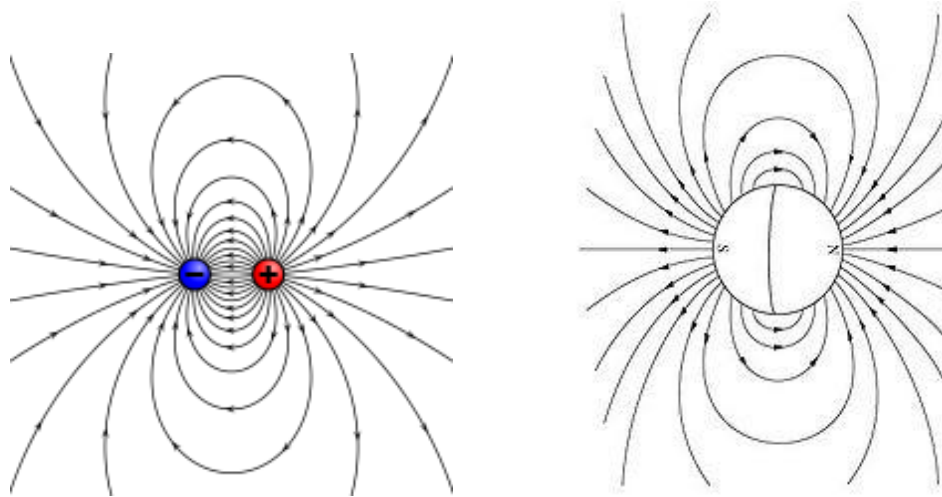


Рис. 3. Магнитное поле диполя слева и Земли – справа

Диполь (двойной полюс) – совокупность двух одинаковых по абсолютной величине и противоположных по знаку электрических q (или магнитных m) зарядов, расстояние l между которыми во много раз меньше, чем расстояния от центра диполя до рассматриваемых точек его поля. Электрический дипольный момент, это вектор, направленный вдоль оси диполя от отрицательного заряда к положительному и численно равный $p_e = q \cdot l$. Магнитный момент диполя определяется как $\vec{p}_m = m \cdot \vec{l}$, где вектор \vec{l} направлен от южного полюса ($-m$) к северному (m).

Закон Био-Савара-Лапласа

Постоянные магниты и проводники с током окружены магнитным полем, которое действует на магнитную стрелку или проводник с током.

Величину и направление вектора индукции магнитного поля тока можно определить, используя закон Био-Савара-Лапласа, в векторной форме

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot [d\vec{l} \cdot \vec{r}]}{r^3}, \quad (1)$$

или скалярной

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin(\vec{dl}, \vec{r})}{r^2} \quad (2)$$

где \vec{dB} - индукция магнитного поля, возбуждаемого элементом проводника dl с током I в точке, удаленной от этого элемента на расстояние r (рис. 4);

\vec{dl} - вектор, равный длине элемента dl и совпадающий с направлением тока в нем;

\vec{r} - радиус-вектор, проведенный от начала элемента dl в заданную точку поля;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная,

μ – магнитная проницаемость среды.

Результирующий вектор \vec{dB} перпендикулярен плоскости, в которой лежат перемножаемые вектора \vec{dl} и \vec{r} (рис 5) и его направление определяется по правилу векторного произведения.

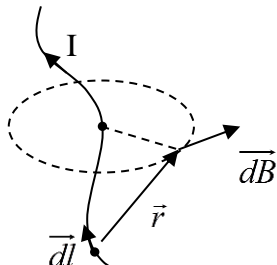


Рис. 4

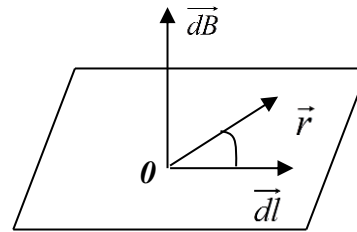


Рис. 5

Индукция \vec{B} магнитного поля проводника с током конечных размеров и произвольной формы в любой точке может быть определена в соответствии с принципом суперпозиции как векторная сумма индукции магнитных полей, возбуждаемых отдельными элементами этого проводника,

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_i + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i,$$

или интегрированием

$$\vec{B} = \int_l \vec{dB}. \quad (3)$$

Например, для магнитного поля в центре витка радиуса R с током I из закона Био-Савара-Лапласа, интегрированием по длине окружности получим

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 \mu}{2R} I \quad (4)$$

Формула (4) позволяет определить величину магнитного поля в центре витка радиуса R с током I .

Вектор магнитной индукции \vec{B} характеризует результирующее магнитное поле, создаваемое всеми макро- и микротоками. Для описания магнитного поля в среде используют дополнительную характеристику магнитного поля которая называется напряженностью магнитного поля \vec{H} .

Напряженностью магнитного поля \vec{H} называется векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле, созданное движущимися зарядами и токами, и не зависящая от магнитных свойств среды

В случае однородной изотропной среды напряженность магнитного поля

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \cdot \mu} \quad (5)$$

В системе СИ напряженностью магнитного поля измеряется в А/м, магнитная индукция в теслах (Тл). Один А/м это напряженность такого поля, магнитная индукция которого в вакууме равна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Тл.

В научной практике исследования геомагнитного поля применяется величина гамма $\gamma = 1 \text{ нТл} = \text{Тл} \cdot 10^{-9}$. Магнитное поле Земли можно также описать вектором напряженности магнитного поля \vec{H} .

Магнитное поле Земли складывается из двух частей, различных по происхождению, постоянного и переменного.

Постоянное (или точнее «устойчивое») поле. Оно различно в различных точках земной поверхности и подвержено медленным («вековым») изменениям. Существование его обусловлено магнетизмом самого земного шара.

Переменное поле (или магнитные вариации), не превышающее, как правило, по величине 1% постоянного поля, вызывается электрическими токами, текущими в верхних проводящих слоях земной атмосферы (ионосферы) или даже за ее пределами.

В некоторых районах земного шара наблюдается существенные отклонения от нормальных значений магнитного поля Земли. Эти отклонения называются магнитными аномалиями. Они могут охватить как значительные части земной поверхности, так и сравнительно небольшие области (локальные аномалии) – от нескольких десятков тысяч километров до нескольких квадратных метров. Наиболее интенсивные магнитные аномалии связаны с залежами железных магнетитовых руд и других пород, обладающих магнетизмом.

Основные характеристики магнитного поля Земли [4] представлены в прямоугольной системе координат (x, y, z) на рис. 6. Ось x ориентирована по направлению географического меридиана к северу, y – по направлению параллели к востоку и ось z направлена к центру Земли. Вертикальная плоскость, в которой лежит вектор напряженности \vec{H} магнитного поля Земли, называется *плоскостью магнитного меридиана*. Она не совпадает с плоскостью географического меридиана (рис.1).

В плоскости геомагнитного меридиана напряженность магнитного поля Земли \vec{H} можно разложить на горизонтальную $H_H = H_0$ и вертикальную $H_B = H_V$ составляющие.

К характеристикам магнитного поля Земли относятся также: магнитное наклонение, это – угол между направлением вектора напряженности магнитного поля Земли \vec{H} и горизонтальной плоскостью (угол i на рис. 6) и магнитное склонение, – это угол α между направлениями на географический и магнитный полюса называется углом склонения.

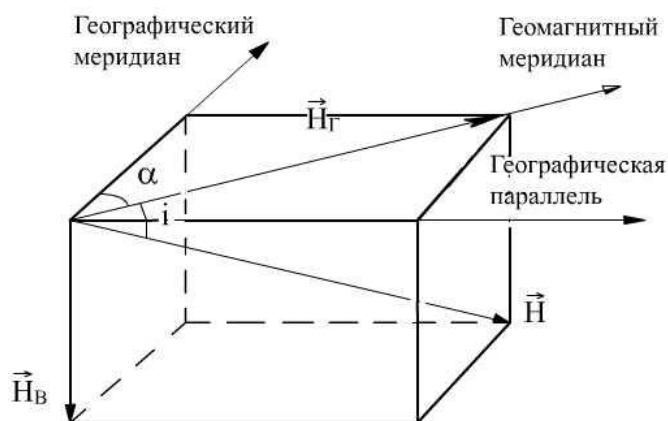


Рис. 6. Составляющие магнитного поля Земли

При таком расположении осей координат, положительным склонением будет восточное, т.е. когда вектор \vec{H} отклонен от севера к востоку, а отрицательным – западное. Наклонение (угол i) положительно, когда вектор \vec{H} направлен вниз от горизонтальной плоскости, это в северном полушарии, и отрицательно, когда вектор \vec{H} направлен вверх, т.е. в южном полушарии.

На магнитном полюсе угол магнитного наклонения равен 90^0 , на экваторе 0^0 . Магнитное поле Земли на экваторе направлено горизонтально, а у магнитных полюсов вертикально. В остальных точках земной поверхности вектор напряженности магнитного поля Земли \vec{H} направлен под некоторым углом к горизонтальной плоскости.

Горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля, склонение и наклонение носят название *элементов земного магнетизма*.

Методика эксперимента.

Электрическая схема лабораторной установки представлена на рис 7 и состоит из источника постоянного тока (ИП), реостата (r), миллиамперметра (P_1) переключателя (S) и тангенс-гальванометра (G). Общий вид тангенс-гальванометра приведен на (рис. 8). Этот прибор состоит из нескольких последовательно соединенных вертикально расположенных круговых витков проволоки, в центре которых нанизана на вертикальной оси магнитная стрелка.

Перед началом измерений витки тангенс-гальванометра располагают в плоскости магнитного меридиана (плоскость, проходящая через данную точку земной поверхности и магнитный полюс Земли), то есть по направлению магнитной стрелки.

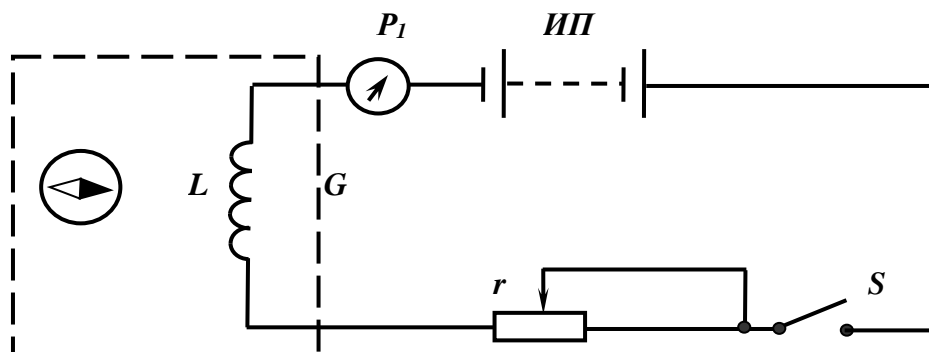


Рис. 7. Электрическая схема установки

Принцип работы прибора заключается в сравнении магнитного поля известного тока с магнитным полем Земли.

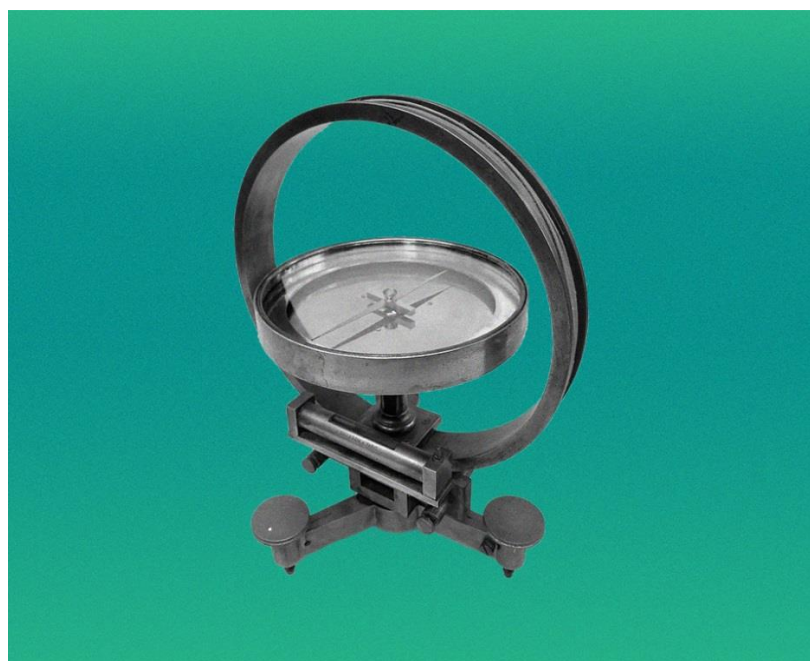


Рис. 8. Тангенс-гальванометр (<https://nplus1.ru>)

К катушке (L) подводим ток, который создает магнитное поле. В результате взаимодействия с полем тока стрелка компаса отклонялась на угол α , тангенс которого равен отношению двух магнитных полей, поле тока и поля Земли $tg \alpha = B_{тока} / B_{земли}$. Величина угла отклонения стрелки задается магнитным

полем, создаваемым током в центре витков H_1 и горизонтальной составляющей земного магнитного поля H_0 (рис. 9).

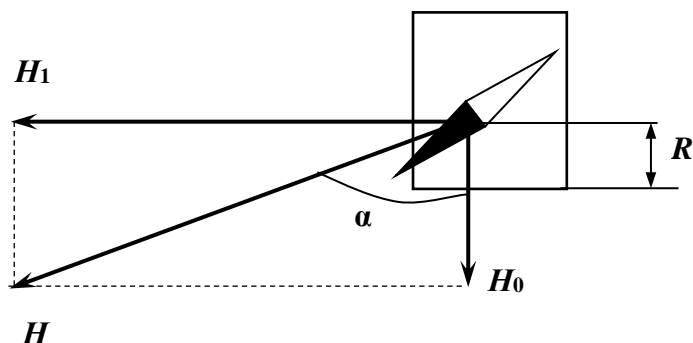


Рис.9. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра

Из закона Био-Савара-Лапласа следует, что индукция магнитного поля в центре витка с током определяется как

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2R}, \quad (6)$$

где I – величина тока, R – радиус витков; а напряженность магнитного поля центре n витков с током тогда будет равна

$$H_1 = \frac{I \cdot n}{2R}. \quad (7)$$

Из чертежа на рис. 9 следует, что $H_1 = H_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha$, следовательно, горизонтальную составляющую Земного магнитного поля можно определить по формуле

$$H_0 = \frac{I \cdot n}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (8)$$

Порядок выполнения работы

Данная работа может выполняться как на лабораторной установке, так и на электронном тренажере (виртуальной лабораторной установке) в системе ДО «ГЕКАДЕМ».

1. Установить плоскость витков тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана используя магнитную стрелку компаса.
2. Вращением лимба компаса добиться совпадения северного конца стрелки с нулем градусов на лимбе.

3. Включите электрическую цепь с помощью ключа S (рис. 7) и установите свой вариант задания нажатием на кнопку **ВАРИАНТ 1**
Внимание! Вариант задания выдается преподавателем или определяется по номеру зачетной книжки.

4. Изменяя с помощью реостата (r) силу тока, добейтесь отклонения стрелки тангенс-гальванометра на угол приблизительно равный 30° . Полученное значение силы тока запишите в таблицу измерений.

5. Повторите измерения (аналогично п.4) для углов 45° , 60° .

6. Рассчитайте горизонтальную составляющую магнитного поля Земли по формуле (8) для всех углов 30° , 45° и 60° .

$$H_0 = \frac{I \cdot n}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha}$$

Параметры установки $n = 30$ и $R = 14$ см.

Класс точности миллиамперметра – 0,5. Значение $\Delta \alpha = 1^\circ = 0,0175$ рад.

7. Найдите среднее значение горизонтальной составляющей \bar{H}_0 .

8. Рассчитайте абсолютную ΔH_0 и относительную ε погрешности и представьте результат измерения в виде доверительного интервала:

$$H_0 = (\bar{H}_0 \pm \Delta H)$$

9. Воспользуйтесь полученными данными, таблицей значений составляющих магнитного поля Земли (см. Приложение) и определите в какой обсерватории (городе) проводили измерения.

10. Сделать выводы и написать отчет.

Таблица

α	I, mA		$H_i, \text{A/m}$	$\bar{H}_0, \text{A/m}$	$B_0, \text{мкТл}$	$\Delta H_0, \text{A/m}$	ε
	дел	mA					
30°							
45°							
60°							

Погрешности измерений

Величина горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли H_0 определяется по формуле (8), т.е. непосредственно не измеряется. Она является функцией прямых измерений величины силы тока I , угла

отклонения магнитной стрелки α и радиуса витков R . При таких измерениях, называемых косвенными, ошибка измерения оценивается по формуле

$$\Delta H = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \alpha} \Delta \alpha\right)^2}, \quad (9)$$

где ΔI и $\Delta \alpha$ – ошибки, связанные с погрешностями средств измерений.

Здесь ΔI – предел допустимой погрешности прибора, определяемый по формуле

$$\Delta I = \frac{I_{ном} \cdot \varepsilon_{пр}}{100}, \quad (10)$$

где $I_{ном}$ – номинальное значение тока; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная погрешность прибора, выражаемая в процентах и равная классу точности прибора, $\Delta \alpha$ – цена деления компаса, по которому производится отчет угла α (в радианах). Погрешности, связанные с измерением радиуса витков R мы не учитываем ввиду их малости.

Таким образом, ошибка конечного результата ΔH_0 определяется погрешностями всех входящих в расчетную формулу измеряемых величин.

Для получения окончательной формулы для расчета ΔH_0 , продифференцируем H_0 по I и α

$$\frac{\partial H_0}{\partial I} = \frac{n}{2r \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad \frac{\partial H_0}{\partial \alpha} = \frac{I \cdot n}{2r} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha}.$$

Подставляем полученные производные в формулу (9) и после соответствующих преобразований получаем окончательную формулу для расчета абсолютной погрешности

$$\Delta H_0 = H_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta \alpha}{\sin 2\alpha}\right)^2}. \quad (11)$$

Из полученного выражения видно, что абсолютная ошибка ΔH_0 будет уменьшаться при увеличении силы тока I и синуса угла 2α . Максимальное значение $\sin 2\alpha$ равно единице, отсюда следует, что угол α равен 45° .

Таким образом, расчет горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_0 следует проводить при углах $\alpha \approx 45^\circ$, то есть в области наименьших ошибок.

Контрольные вопросы

1. Что называется, индукцией магнитного поля? Какова единица ее измерения?
2. Что называется, напряженностью магнитного поля? Какова ее связь с магнитной индукцией?
3. Сформулировать закон Био-Савара-Лапласа и вычислить на его основе индукцию магнитного поля в центре кругового тока.
4. Как определяется направление индукции магнитного поля прямого и кругового токов?
5. Объясните принцип суперпозиции и его применение в выводе расчетной формулы.
6. Описать принцип работы тангенс-гальванометра. Почему он так называется?
7. Почему магнитное поле Земли сравнивают с магнитным полем диполя.
8. Расскажите об основных элементах земного магнетизма.
9. Каким образом можно определить направление силовых линий магнитного поля Земли?
10. Почему измерение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля желательно проводить при угле отклонения стрелки в 45° ?

Литература

1. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 18-е изд., стер. – М. : Академия, 2010. – 557 с.
2. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 9-е изд., стер. – М. : Академия, 2012. – 719 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. – М. : Наука, 2012. Т. 1, 2, 3.

Дополнительная литература

4. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1978, 592 с.
5. Тамм И. Е. Основы теории электричества. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица значений составляющих магнитного поля Земли*

№	Обсерватория	Геогр. координаты		Геомагн. координаты		B_0 , мкТл	B_z , мкТл
		$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	$\Phi, ^\circ$	$\Lambda, ^\circ$		
1	Магадан	60,7	151,1	50,6	210,1	18,1	52,7
2	Ленинград	59,6	30,4	56,2	117,4	15,2	48,8
3	Свердловск	56,4	61,4	48,5	140,7	16,1	52,1
4	Казань	55,5	48,5	49,3	130,4	16,6	49,8
5	Москва	55,3	37,2	50,8	120,5	17,2	48,4
6	Иркутск	52,1	104,3	41,0	176,9	19,6	57,1
7	Якутск	62,1	129,4	51,0	193,8	15,0	58,3
8	Новосибирск	55,2	82,5	45,0	167,5	17,2	56,6
9	Владивосток	43,4	132,1	33,0	198,0	27,0	45,0
10	Подкаменная Тунгуска	61,4	90,0	50,2	175,0	12,3	59,2
11	Мурманск	68,2	33,5	63,5	126,2	11,8	51,3
12	Петропавловск- Камчатский	52,5	158,3	44,4	218,2	22,1	45,9
13	о. Диксон	73,3	80,3	63,0	161,6	6,4	58,1
14	м. Челюскин	77,4	104,2	66,2	176,5	3,5	59,0
15	ст. Восток (Антарктида)	-78,3	106,5	89,2	91,4	12,7	-60,2

* – таблица составлена на основе данных опубликованных литературе [4]

B_0 – горизонтальная составляющая вектора магнитной индукции;

B_z – вертикальная составляющая вектора магнитной индукции.