

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Оренбургский государственный университет"

Кафедра общей физики

А.А.ЧАКАК

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННО- СТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом государственно-  
го образовательного учреждения высшего профессионального образования  
"Оренбургский государственный университет".

Оренбург 2006

УДК 53 (07)  
ББК 22.3я 7  
Ч 16

Рецензент:  
доктор физико-математических наук, профессор Н.А.Манаков

Ч 16                    **Чакак А.А.**  
**Определение горизонтальной составляющей магнитного  
поля Земли: методические указания к лабораторным рабо-  
там/ А.А. Чакак. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. - 13 с.**

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по определению горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли студентами естественнонаучных и технических специальностей, выполняющих лабораторные работы по курсу общей физики. В работе изучается магнитное взаимодействие проводников с током, производятся измерения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и знакомство с элементами земного магнетизма.

Методические указания рекомендованы к изданию кафедрой общей физики ОГУ. Составитель – Чакак А.А.

ББК 22.3я 7

©Чакак А.А., 2006

© ГОУ ОГУ, 2006

## Содержание

1 Магнитное поле.....	4
2 Магнитная индукция.....	4
3 Закон Био-Савара-Лапласа.....	4
4 Напряженность магнитного поля .....	5
5 Элементы земного магнетизма .....	7
6 Тангенс-гальванометр.....	9
7 Измерения и обработка результатов измерений.....	10
8 Контрольные вопросы.....	13
9 Литература, рекомендуемая для изучения физики.....	14

## 1 Магнитное поле

С современной точки зрения взаимодействие токов обусловлено существование новой формы материи – **магнитного поля**. Этот термин ввел в 1845 г. Фарадей. Мы говорим, что ток в одном из проводников создает в окружающем пространстве магнитное поле. В результате возникает сила, действующая на второй проводник в магнитном поле, создаваемом током в первом проводнике. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, называется **силой Ампера**.

На основе явления взаимодействия проводников с током введена **единица силы тока**. Один ампер (А) – сила постоянного тока, протекающего по двум тонким и бесконечно длинным проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м, и вызывающего на каждый метр длины проводников силу взаимодействия  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

Таким образом, для нахождения силы взаимодействия между токами надо решить две задачи:

- 1) определить магнитное поле, создаваемое движущимися зарядами, т.е. токами;
- 2) определить силы, действующие со стороны магнитного поля на ток.

## 2 Магнитная индукция

Магнитное поле в каждой точке пространства может быть описано вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . Условились за направление магнитного поля  $\vec{B}$  в месте расположения магнитной стрелки принимать направление северного конца стрелки. Для графического изображения магнитного поля часто используют понятие силовых линий. Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$ , называют **силовыми линиями** магнитной индукции. Величина магнитной индукции, пропорциональна числу силовых линий, пересекающих единицу площади.

Как определить величину магнитной индукции, создаваемой током?

## 3 Закон Био-Савара-Лапласа

Элементом тока называется произведение силы тока  $I$ , протекающего по бесконечно малому отрезку проводника  $dL$ , на величину вектора  $d\vec{L}$ , направленного вдоль тока, т.е. величину  $I \cdot d\vec{L}$ .

Опыт дает, что правильные значения сил магнитного взаимодействия токов мы получим в том случае, если примем, что индукция магнитного поля элемента тока равна:

$$d\vec{B} = k \frac{I [d\vec{L} \cdot \vec{r}]}{r^3} \quad (1)$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный из элемента тока в рассматриваемую точку;

$k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единицы измерения.

В системе СИ для случая, когда элемент тока находится **в вакууме** или в воздухе, как в данной лабораторной работе,  $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная. Поэтому величина магнитной индукции, создаваемой элементом тока, в системе СИ выражается формулой:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot d\vec{L} \cdot \sin\vartheta}{r^2} \quad (2)$$

где  $\vartheta$  – угол между  $d\vec{L}$  и  $\vec{r}$  (рисунок 1).

Направление вектора  $d\vec{B}$  перпендикулярно к  $d\vec{L}$  и  $\vec{r}$ , т.е. перпендикулярно плоскости, в которой они лежат. Это направление подчиняется правилу правого винта: направление магнитной индукции  $d\vec{B}$  совпадает направлением движения головки винта, движущегося поступательно в направлении тока  $I$ .

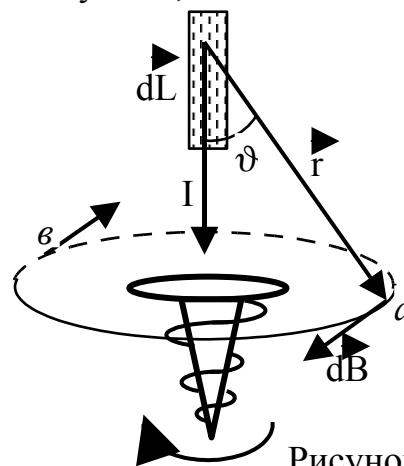


Рисунок 1

Так, например, если ток течет вертикально сверху вниз (рисунок 1), то правый винт нужно вращать по часовой стрелке (глядя сверху); поэтому магнитная индукция в точке  $a$  будет направлена от чертежа к читателю, в точке  $b$  она направлена противоположно, от читателя за чертеж. Формула (1) носит название **закона Био-Савара-Лапласа**.

#### 4 Напряженность магнитного поля

Для описания магнитного поля наряду с магнитной индукцией широко используют еще другую величину – напряженность магнитного поля. Если  $\vec{B}$  – магнитная индукция в какой-либо точке поля в вакууме (в воздухе), то напряженностью магнитного поля в той же точке поля называется:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (3)$$

Так как  $\mu_0$  есть скаляр, то  $\vec{H}$ , как и  $\vec{B}$ , вектор.

Для магнитного поля справедлив **принцип суперпозиции** или, иначе, индукция  $\vec{B}$  результирующего магнитного поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых отдельными токами:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i. \quad (4)$$

Отметим, что справедливость этого принципа заранее не очевидна и в его правильности нас убеждает только опыт. При вычислении индукции магнитного поля, создаваемого током в проводнике произвольной формы, в какой-либо точке пространства суммирование элементарных индукций  $d\vec{B}$ , определяемых законом Био-Савара-Лапласа (1), заменяем интегрированием по контуру  $L$ , по которому протекает ток:

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B} = \int_L \frac{\mu_0 I [d\vec{L} \cdot \vec{r}]}{4\pi r^3}; \quad |\vec{B}| = B = \int_L \frac{\mu_0 I \cdot dL \cdot \sin\vartheta}{4\pi r^2}. \quad (5)$$

Найдем индукцию магнитного поля в вакууме **в центре кругового проводника** (рисунок 2). В этом случае все элементы проводника перпендикулярны к радиус-вектору  $\vec{R}$  и  $\sin\vartheta = 1$ . Расстояние всех проводников в центре круга одинаково и равно радиусу круга  $R$ . Поэтому (2) дает:

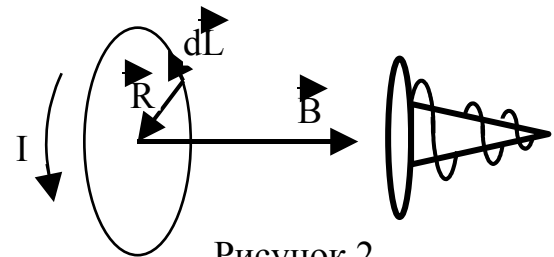


Рисунок 2

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{R^2} \cdot dL.$$

Все элементы тока создают магнитное поле одинакового направления, перпендикулярное к плоскости витка, и поэтому полная индукция поля в центре кругового витка равна:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_L dL = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \cdot 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (6)$$

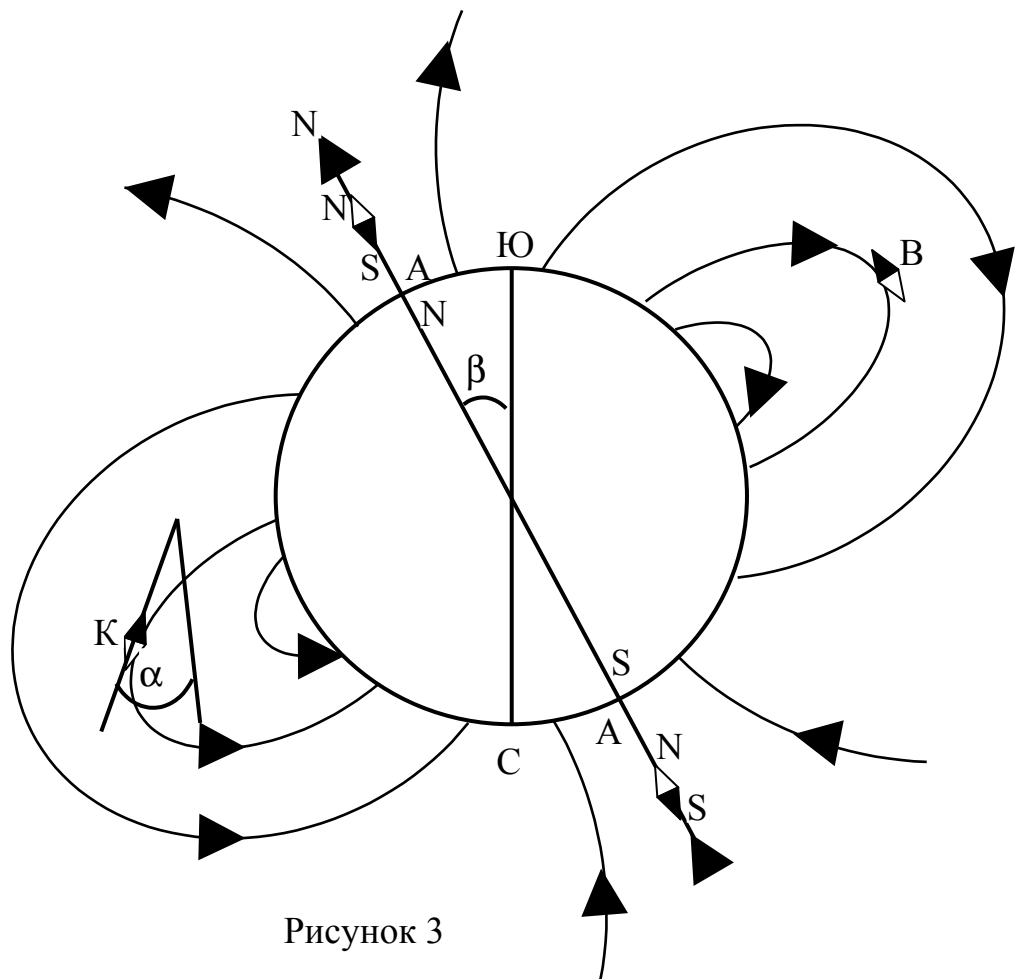
Соответственно, напряженность магнитного поля в центре кругового витка равна:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I}{2R}. \quad (7)$$

Направление магнитного поля находим по правилу правого винта, который нужно расположить перпендикулярно к плоскости витка; при вращении головки винта по кругу в направлении протекания тока поступательное движение винта укажет ориентацию поля.

## 5 Элементы земного магнетизма

Магнитное поле Земли имеет постоянную составляющую – основное поле (его вклад ~ 99 %) и переменную составляющую (~1 %). Основное магнитное поле Земли по форме близко к полю диполя, центр которого смещён относительно центра Земли, а ось наклонена к оси вращения Земли на  $11,5^\circ$ , так что геомагнитные полюса отстоят от географических на  $11,5^\circ$ , причем вблизи северного географического полюса **С** расположен южный магнитный полюс **S**, а вблизи южного географического **Ю** – северный магнитный **N**.



Линии маг-  
нитного поля

выходят приблизительно из центра Земли через южное полушарие и, обогнув Землю, возвращаются к ее центру через Северное полушарие (рисунок 3). Магнитное поле Земли на магнитном экваторе направлено горизонтально (точка В), а у магнитных полюсов вертикально (точки А). В остальных точках земной поверхности магнитное поле Земли направлено под некоторым углом к горизонту (точка К).

Величину проекции напряженности (индукции) земного магнитного поля  $\vec{H}$  ( $\vec{B}$ ) на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $H_{гор}$  ( $B_{гор}$ ). Направление этой составляющей принимает-

ся за **направление магнитного меридиана**, а вертикальную плоскость, проходящую через него, называется **плоскостью магнитного меридиана**. Угол  $\alpha$  между направлением магнитного поля Земли и горизонтом называют **углом склонения**, а угол  $\beta$  между географическим и магнитным меридианом – **углом наклона**. 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. Это свойство магнитной стрелки используют в тангенс-гальванометре в данной работе для определения  $H_{гор}$  ( $B_{гор}$ ).

Компоненты магнитного поля Земли на поверхности планеты меняются в следующих пределах: полный вектор индукции магнитного поля  $B_0$  от +62 до – 73 мкТл, горизонтальная составляющая  $B_0$  от 0 до 41 мкТл.

Магнитные полюса и ось со временем изменяют свое положение. Так, например, в последнее время Северный магнитный полюс начал ускоренно перемещаться с территории Канады и, проходя мимо Аляски, в скором времени может оказаться на территории Сибири (России). В итоге знаменитое северное сияние Русский Север может потерять, зато эффектное зрелище станет предметом восхищения жителей европейских стран. Каждый год магнитный полюс смещается на расстояние от 10 до 40 км. Но, согласно наблюдениям ученых, за последние 25 лет этот процесс значительно ускорился. Никто не может сказать наверняка, как полюс поведет себя дальше. По мнению ученых, планете предстоит очередная смена магнитных полюсов – полярности (инверсия).

Магнитное поле Земли претерпевает вековые вариации (в настоящее время поле уменьшается примерно на 1 % за каждые 10 лет). Через некоторое время величина магнитного поля Земли может снова достичь нормального уровня и опять сохраняться достаточно долго ( $10^5 - 10^7$  лет) или за относительно короткий переходный период ( $10^3 - 10^4$  лет) может измениться знак магнитного поля (инверсия).

На магнитное поле Земли влияют местные аномалии, связанные с намагниченностью горных пород, слагающих земную кору. В итоге поле Земли имеет сложную конфигурацию – добавляются поля неоднородных материковых плит, магнитных аномалий верхней части земной коры (в районе Курской магнитной аномалии поле  $B_0$  достигает 200 мкТл), внеземные магнитные поля. На постоянное поле  $B_0$  накладываются так же более слабые ( $<0,02 B_0$ ) переменные поля различной природы.

Переменная составляющая магнитного поля Земли сильно зависит от **солнечного ветра** – потока заряженных частиц, создаваемых активными процессами на Солнце. Замкнутые линии магнитного поля Земли являются геомагнитной ловушкой для заряженных частиц, образующих радиационные пояса Земли. Во время магнитных бурь переменная составляющая магнитного поля Земли может изменяться до 1 мкТл, что существенно влияет на показания компаса в высоких широтах.

Предполагается, что главным источником магнитного поля являются конвективные движения электропроводящего вещества в жидком ядре Земли. Разработанной количественной теории геомагнитного поля в настоящее время не

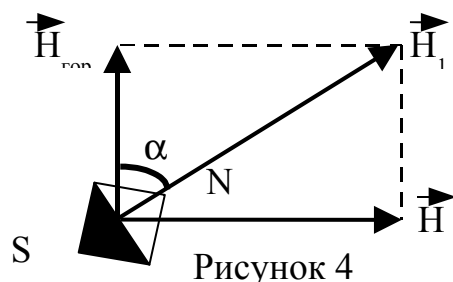


существует. Затруднения связаны как с недостатком сведений об источниках энергии, возбуждающих конвективное движение в ядре Земли, так и с математическими трудностями решения полной системы уравнений магнитной гидродинамики.

## 6 Тангенс-гальванометр

Тангенс-гальванометр представляет собой плоскую вертикальную катушку радиуса  $r$  с некоторым числом витков  $n$ . Величина радиуса катушки  $r$  и число витков  $n$  указаны в разделе «Измерения и обработка результатов измерений». В центре катушки находится магнитная стрелка (компас), вращающаяся вокруг вертикальной оси. Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке будет расположена по магнитному меридиану Земли  $NS$ .

Поворотом катушки около вертикальной оси можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если по катушке пропустить ток  $I$ , то возникает магнитное поле с напряженностью  $H$ , направленное перпендикулярно к плоскости катушки. Таким образом, на магнитную стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных магнитных поля: магнитное поле Земли и магнитное поле тока. Напряженности обоих полей взаимно перпендикулярны. На рисунке 4 изображено сечение катушки горизонтальной плоскостью. Здесь  $\vec{H}$  – вектор напряженности поля, созданного круговым током,  $\vec{H}_{гор}$  – горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли. Стрелка устанавливается по направлению равнодействующей  $\vec{H}_1$ , т.е. по диагонали параллелограмма, сторонами которого будут вектор напряженности магнитного поля кругового тока  $\vec{H}$  и  $\vec{H}_{гор}$ .



Из рассмотрения рисунка 4 получим  $H = H_{гор} \cdot \operatorname{tg} \alpha$ . С другой стороны, напряженность магнитного поля в центре катушки вычисляется по формуле (8) с учетом числа витков  $n$ :

$$H = \frac{nI}{2r}. \quad (8)$$

Тогда,

$$\frac{nI}{2r} = H_{гор} \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

откуда

$$H_{\text{гор}} = \frac{n \cdot I}{2 \cdot r \cdot \text{tg}\alpha} \quad (9)$$

Соответственно, горизонтальная составляющая индукции  $B_{\text{гор}}$  магнитного поля Земли в соответствии с (3) вычисляется по формуле:

$$B_{\text{гор}} = \mu_0 \cdot H_{\text{гор}} = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot I}{2 \cdot r \cdot \text{tg}\alpha} \quad (10)$$

Формулами (9) и (10) пользуются для опытного определения  $H_{\text{гор}}$  и  $B_{\text{гор}}$ .

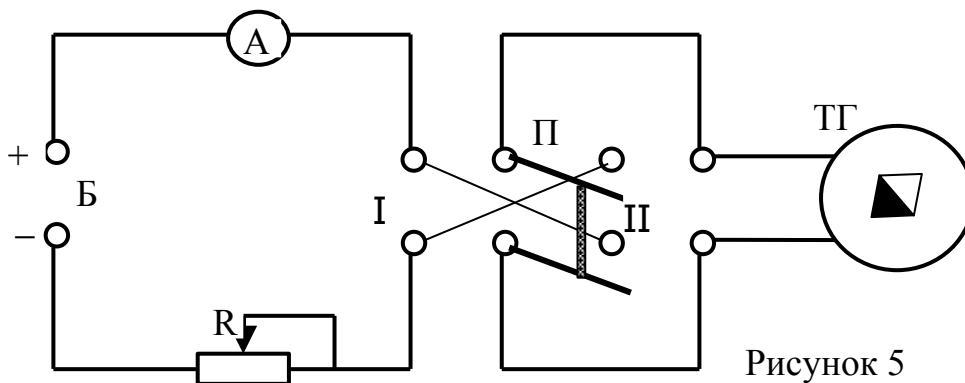
## 7 Измерения и обработка результатов измерений

Цель работы:

- 1 Познакомиться с элементами земного магнетизма.
- 2 Изучить магнитное взаимодействие проводников с током.
- 3 Измерить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли на широте г. Оренбурга.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, реостат, источник постоянного тока, переключатель.

- 1 Соберите электрическую цепь из тангенс-гальванометра ТГ, амперметра А, реостата R, ключа-переключателя П, источника постоянного тока Б типа АГАТ (рисунок 5).



- 2 Поворачивая подставку тангенс-гальванометра и компаса, установите плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана так, чтобы один конец магнитной стрелки компаса совпадал с 0.

- 3 Установите подставку тангенс-гальванометра в горизонтальное положение и, соответственно, катушку тангенс-гальванометра в вертикальной плоскости магнитного меридиана, используя регулировочные винты на подставке.



$$\Delta I = \gamma \frac{I_B}{200}, \quad (13)$$

где  $\gamma$  – класс точности амперметра (приведенная относительная погрешность амперметра в процентах),

$I_B$  – верхний предел измерения амперметра.

Результаты расчетов занесите в таблицу.

$$8 \text{ По формулам (9) и (10) } \bar{H}_{\text{гор}} = \frac{n \cdot \bar{I}}{2 \cdot \bar{r} \cdot \text{tg} \bar{\alpha}}, \quad \bar{B}_{\text{гор}} = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot \bar{I}}{2 \cdot \bar{r} \cdot \text{tg} \bar{\alpha}}$$

вычислите средние значения горизонтальных составляющих напряженности  $\bar{H}_{\text{гор}}$  и индукции  $\bar{B}_{\text{гор}}$  магнитного поля Земли, подставляя в приведенные формулы значения  $n = 9$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м и средние значения  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{I}$  и  $\bar{r} = 0,13$  м – радиуса витка катушки.

Затем рассчитайте ошибки  $H_{\text{гор}}$  и  $B_{\text{гор}}$ :

$$\Delta H_{\text{гор}} = \varepsilon \cdot \bar{H}_{\text{гор}} \quad \text{и} \quad \Delta B_{\text{гор}} = \varepsilon \cdot \bar{B}_{\text{гор}}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \varepsilon &= \frac{1}{\bar{H}} \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial I} \cdot \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial r} \cdot \Delta r\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{\bar{I}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{\bar{r}}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \delta \cdot \Delta \alpha}{\sin(2\bar{\alpha})}\right)^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь  $\delta = \frac{\pi}{180} \approx 1,75 \cdot 10^{-2}$  рад/град – коэффициент перехода от градусов к радианам.

9 Запишите окончательный результат в виде:

$$H_{\text{гор}} = \bar{H}_{\text{гор}} \pm \Delta H = \dots \frac{\text{А}}{\text{м}},$$

$$B_{\text{гор}} = \bar{B}_{\text{гор}} \pm \Delta B = \dots \text{Тл},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{\bar{H}_{\text{гор}}} \cdot 100\% = \frac{\Delta B}{\bar{B}_{\text{гор}}} \cdot 100\% = \dots \%$$

10 Сделайте выводы по результатам выполненной работы.

## 8 Контрольные вопросы

- 1 Определите элементы земного магнетизма.
- 2 Как устанавливается магнитная стрелка в магнитном поле?
- 3 Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа. Как определить направление вектора индукции  $d\vec{B}$ , создаваемой элементом тока в какой-либо точке пространства?
- 4 Чему равна напряженность магнитного поля в центре кругового тока? Как ее рассчитать?
- 5 Объясните устройство и принцип действия тангенс-гальванометра.
- 6 Почему следует ориентировать катушку тангенс-гальванометра в направлении магнитного меридиана?
- 7 Каковы характеристики магнитного поля?

## 9 Литература, рекомендуемая для изучения физики

- 1 **Трофимова, Т.И.** Курс физики / Т.И. Трофимова.–М.: Высшая школа, 2004.–544 с.
- 2 **Детлаф, А.А.** Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.–М.: Высшая школа, 2000.–718 с.
- 3 **Савельев, И.В.** Курс общей физики: учебное пособие для вузов в 5 кн. / И.В. Савельев.–М.: Астрель, АСТ, 2003.  
Кн.2: Электричество и магнетизм.–336 с.
- 4 **Яворский, Б.М.** Справочное руководство по физике / Б.М. Яворский, Ю.А. Селезнев.–М.: Наука, 1989.–576 с.
- 5 **Иродов, И.Е.** Электромагнетизм. Основные законы / И.Е. Иродов.–М.: Лаборатория Базовых знаний, 2001.–352 с.
- 6 **Сивухин, Д.В.** Общий курс физики: учебное пособие для вузов в 5 т. / Д.В. Сивухин.–М.: ФИЗМАТЛИТ МФТИ, 2002.  
Т.3: Электричество.–656 с.
- 7 **Калашников, С.Г.** Электричество / С.Г. Калашников.–М.: Наука, 1977.–592 с.
- 8 **Трофимова, Т.И.** Сборник задач по курсу физики с решениями / Т.И. Трофимова, З.Г. Павлова.–М.: Высшая школа, 2003.–591 с.