

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»**

**Кафедра общей и технической физики**

## **ФИЗИКА**

# **ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ**

*Методические указания к лабораторной работе*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2016**

УДК 53:001.92 53:372.8  
53(075) 53.082.72/.78

Физика. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ: Методические указания к лабораторной работе / Сост.: А.С. Мустафаев, А.Ю. Грабовский. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2016. 37 с.

В методических указаниях к лабораторной работе «ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ» сформулированы: теория, методические указания и алгоритм выполнения работы.

Лабораторная работа дает возможность студентам изучить структуру магнитного поля Земли и экспериментально определить его горизонтальную и вертикальную составляющие, а также магнитное наклонение местного геомагнитного поля. Основная задача - овладеть техникой и методикой проведения эксперимента, а также приемами обработки его результатов и оформления заключительного отчета.

В зачетной работе практикума студент должен продемонстрировать умение в устной и письменной форме, логически верно и аргументировано защищать результаты своих исследований.

Методические указания к лабораторной работе предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата и магистратуры Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

Научный редактор профессор *Мустафаев А.С.*

© Национальный минерально-сырьевой университет  
«Горный», 2016 г.

# **ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ**

## **1. Цель работы**

Целью работы является изучение магнитного поля Земли и экспериментальное определение его горизонтальной и вертикальной составляющих, а также магнитного наклонения местного геомагнитного поля.

## **2. Теоретическое введение**

Несколько столетий естествоиспытатели пытаются понять, почему у земного шара есть магнитное поле, в чем природа и суть его образования глубоко в недрах Земли. Для современной науки это по-прежнему открытая проблема. Решив ее, удалось бы существенно расширить достоверные познания об эволюции нашей и других планет Солнечной системы.

С давних времен земное магнитное поле использовалось для решения ряда важных практических задач. Первостепенной из них была ориентация относительно сторон света при далеких путешествиях, особенно при пасмурной погоде, когда не видно Солнца или звезд и направление движения нельзя определить по светилам. В конце XIX в., и особенно в начале XX в., геомагнитное поле широко изучалось как в целях его использования в навигации, так и для решения других важных задач. К подобным задачам, прежде всего, следует отнести поиск месторождений железных руд и иных полезных ископаемых, проявляющих магнитные свойства, а также изучение внутреннего строения Земли и установление геологического возраста горных пород.

В практике было замечено, что магнитная стрелка не всегда устанавливается точно по направлению Полярной звезды. Первое время это объясняли ошибками самого прибора. Но со временем стало ясно, что дело не в компасе, а само магнитное поле не всегда

ориентировано строго на север. Оно направлено под некоторым углом  $D$  к географическому меридиану, т. е., как стали говорить позднее, может иметь склонение. Более того, вектор индукции магнитного поля направлен под углом  $J$  к горизонтальной плоскости. Неизбежный поворот вектора индукции относительно горизонтальной плоскости получил название наклонения магнитного поля Земли. При этом оказалось, что как магнитное наклонение  $J$ , так и магнитное склонение  $D$ , имеют значения, зависящие от географических координат точки наблюдения. Геометрическое место точек, имеющих магнитное склонение  $D$  равное нулю, образуют магнитный экватор - замкнутую дугу (окружность) на поверхности земного шара, не совпадающую с географическим экватором. В свою очередь совокупность точек земной поверхности, в которых магнитное наклонение  $J$  равно нулю, образуют магнитный меридиан, совпадающий с географическим меридианом. В других точках земного шара наклонение  $J$  не равно нулю и, соответственно, географический меридиан и магнитный отличны друг от друга.

На рис. 1 показан вектор индукции магнитного поля Земли  $\vec{B}_E$  (Earth - Земля, англ.) и его проекции  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ . В выбранной системе координат  $B_x$  - проекция вектора  $\vec{B}_E$  на ось  $x$ , направленную на север;  $B_y$  - проекция вектора  $\vec{B}_E$  на ось  $y$ , направленную на восток;  $B_z$  - проекция вектора  $\vec{B}_E$  на ось  $z$ , направленную по вертикали (в Северном полушарии  $B_z < 0$ ). Здесь же указана проекция  ${}^h\vec{B}_E$  (horizontal - горизонтальный, англ.) вектора  $\vec{B}_E$  на горизонтальную плоскость, в которой лежат  $x$  и  $y$ . Плоскость, определяемая векторами  ${}^h\vec{B}_E$  и  $\vec{B}_E$ , называется плоскостью магнитного меридиана. По аналогии с горизонтальной составляющей  ${}^h\vec{B}_E$  вертикальную составляющую магнитного поля Земли  $B_z$  будем обозначать  ${}^v\vec{B}_E$  (vertical - вертикальный, англ.). Склонение  $D$ , наклонение  $J$ , горизон-

тальная составляющая  ${}^h\vec{B}_E$ , северная -  $B_x$ , восточная -  $B_y$ , вертикальная -  $B_z$  носят название элементов земного магнетизма.

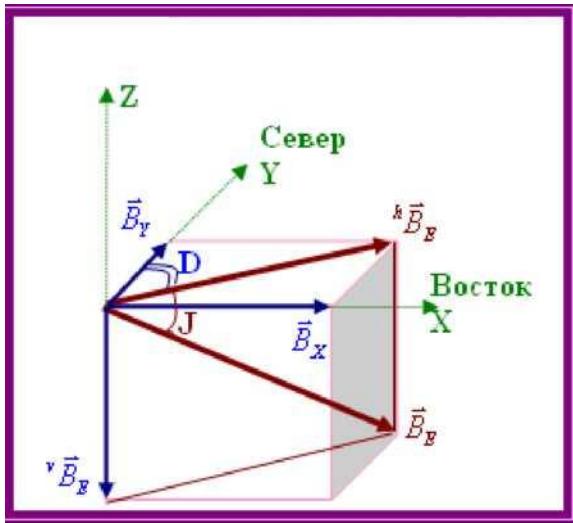


Рис. 1. Местное геомагнитное поле в Северном полушарии

Количественно и качественно наблюдаемое геомагнитное поле хорошо укладывается в рамки представлений, выдвинутых еще Гауссом, о помещенном в центре Земли достаточной силы магнитном диполе.

Магнитное поле на достаточно большом расстоянии  $\vec{r}$  от диполя  $\vec{m}$  рассчитывается по известной формуле

$$\vec{B} = \left[ \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})}{r^5} \vec{r} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right] \cdot \frac{\mu_0}{4\pi}. \quad (1)$$

Ниже, на рис. 2 изображен магнитный диполь  $\vec{m}$  и вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  в точке наблюдения, задаваемой полярным

углом  $\theta$  и расстоянием  $r$  между диполем и точкой наблюдения. Не трудно найти уравнение силовых линий магнитного поля в полярной системе координат. Разложим вектор  $\vec{m}$  на составляющую  $\vec{m}_{\parallel}$  вдоль радиуса  $\vec{r}$  и составляющую  $\vec{m}_{\perp}$ , к нему перпендикулярную.

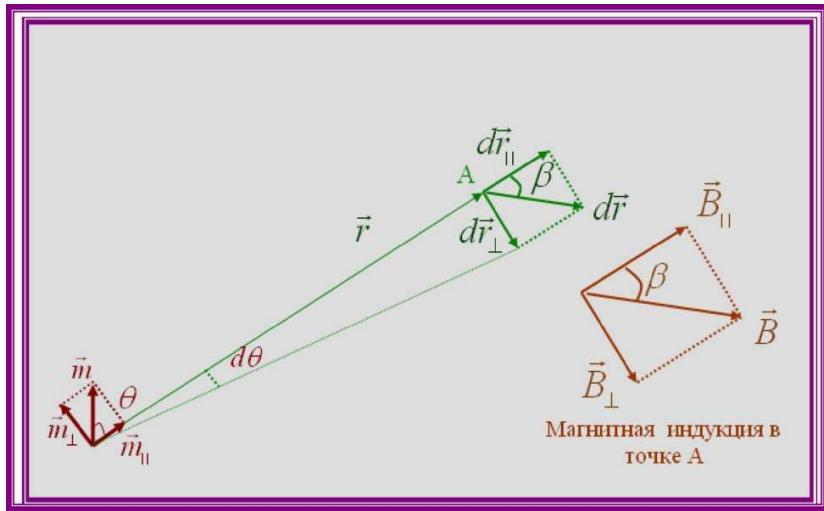
Как следует из (1) соответствующие им поля в точке наблюдения будут

$$\vec{B}_{\parallel} = \frac{\mu_0}{4\pi} 2\vec{m}_{\parallel} / r^3, \quad \vec{B}_{\perp} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \vec{m}_{\perp} / r^3. \quad (2)$$

Угол  $\beta$  между радиусом  $\vec{r}$  и магнитной линией определяется формулой

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} = \frac{m_{\perp}}{2m_{\parallel}} = \frac{1}{2} \operatorname{tg}\theta. \quad (3)$$

Проекция бесконечно малого участка силовой линии на направление вектора  $\vec{m}_{\perp}$  может быть, с одной стороны, представлена как  $dr \cdot \operatorname{tg}\beta = \frac{dr}{2} \operatorname{tg}\theta$ , с другой стороны, как  $r \cdot d\theta$ .



**Рис. 2.** Магнитное поле диполя

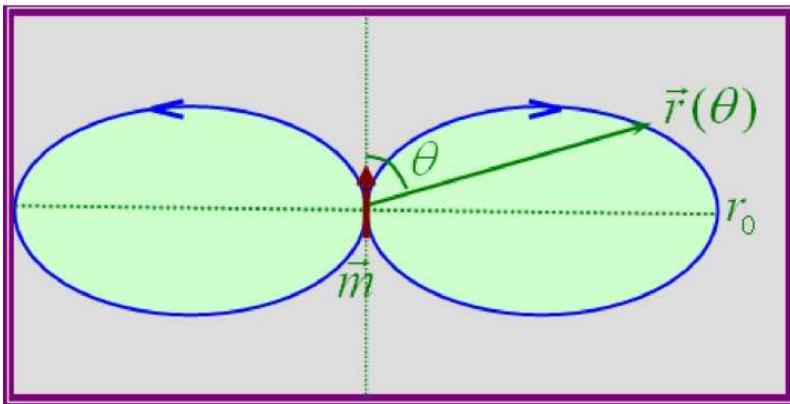
Поэтому

$$\frac{dr}{2} \operatorname{tg} \theta = r \cdot d\theta. \quad (4)$$

Интегрируя это уравнение, получаем уравнение магнитной линии:

$$r(\theta) = r_0 \sin^2 \theta. \quad (5)$$

Постоянная  $r_0$  имеет смысл длины радиус-вектора  $\vec{r}$  в экваториальной плоскости, т.е. при  $\theta=\pi/2$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Линии магнитной индукции диполя

Достаточной силы магнит-диполь, помещенный в центре Земли, создает на ее поверхности магнитное поле, которое сравнительно хорошо совпадает с наблюдаемым геомагнитным полем. Однако на основе формулы Гаусса было показано, что более точно это поле воспроизводится, если такой магнит повернуть на угол 11,5° относительно оси вращения нашей планеты, а еще более точно, при смещении его на 450 км в сторону Тихого океана.

Любопытно, что если бы мы попытались воссоздать магнитное поле Земли с помощью рукотворного магнита даже из самых лучших в магнитном отношении современных марок стали, то такой магнит имел бы внушительные размеры - около 2000 км в длину и 250 км в диаметре.

Точки пересечения поверхности земного шара, с осью упомянутого выше смещенного относительно земного центра магнита-диполя названы геомагнитными полюсами. В северном полушарии расположен Северный геомагнитный полюс, а в южном - Южный геомагнитный полюс, хотя расположение полюсов указанного модельного магнита в этих полушариях противоположно (рис. 4), т.е. силовые магнитные линии начинаются на Южном геомагнитном

полюсе, следовательно, ему должен быть приписан положительный знак, Северному геомагнитному полюсу следует приписать отрицательный знак, в него входят магнитные линии. Магнитная стрелка (магнитный диполь), своим северным концом направленная вдоль силовых линий, таким образом, указывает направление на Северный геомагнитный полюс.

Итак, магнитное поле, создаваемое ядром Земли, должно иметь магнитный "юг" около географического Северного полюса для того, чтобы притягивать "северный" конец магнитной стрелки компаса.

Именно поэтому магнитный "юг", хотя и расположен около географического Северного полюса, называется геомагнитным Северным полюсом. Иногда ошибочно называют эту точку "северным" магнитным полюсом потому, что туда указывает "северный" полюс магнита. Вспомним, однако, случай с направлением движения электронов и направлением электрического тока, которые ориентированы в противоположные стороны.

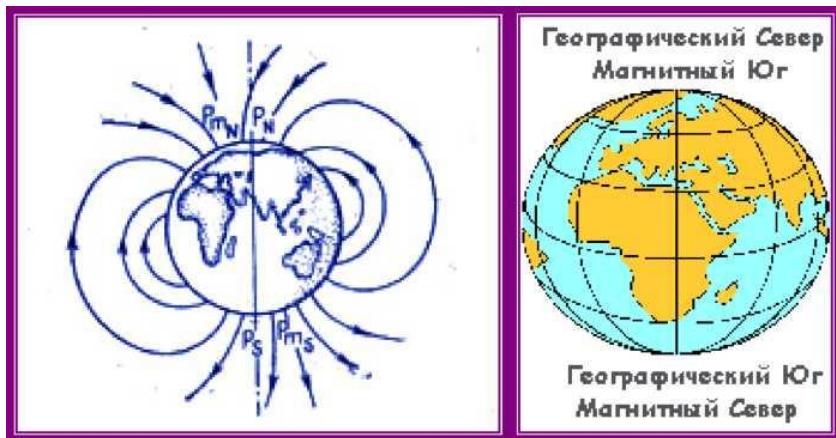


Рис. 4. Магнитное поле Земли

Координаты геомагнитных полюсов не совпадают с координатами географических полюсов земного шара, и соответственно геомагнитный экватор - линия на поверхности Земли, для всех точек которой наклонение дипольного поля равно нулю не совпадает с географическим экватором.

Проекции  $B_z$  (или  ${}^v \vec{B}_E$ ) и  ${}^h \vec{B}_E$  индукции дипольного поля однородного намагничивания на поверхности Земли, можно найти с помощью простых формул, являющихся следствием (1) и (2):

$$B_z = \mu_0 \frac{m}{2\pi R^3} \sin \varphi_M ; \quad {}^h B_z = \mu_0 \frac{m}{2\pi R^3} \cos \varphi_M , \quad (6)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $m$  - магнитный момент земного шара,  $\varphi_M$  - геомагнитная широта, отсчитываемая от геомагнитного экватора и связанная с полярным углом  $\theta$  соотношением:  $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi_M$ .

При этом надо учесть, что  $r=R$ , проекция на радиус-вектор  $r$  геомагнитного поля  $B_{||}$  совпадает с  $B_z$ , а проекция  $B_{\perp}$  есть ничто иное, как  ${}^h \vec{B}_E$ , т.е. горизонтальная составляющая магнитного поля Земли. Последние утверждения есть очевидные следствия элементарного геометрического факта: радиус-вектор, проведенный из центра сферической поверхности, перпендикулярен поверхности в любой ее точке.

Из приведенных выше формул следует, что индукции поля однородного намагничивания земного шара на поверхности Земли равна:

$$B_E = \sqrt{{}^v B_E^2 + {}^h B_E^2} = \mu_0 \frac{m}{4\pi R^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi_M} . \quad (7)$$

Связь наклонения  $J$  рассматриваемого поля с геомагнитной широтой  $\varphi_M$  легко найти из отношения проекций  $B_z$  и  ${}^h B_E$ :

$$B_z / {}^h B_E = \operatorname{tg} J = 2 \operatorname{tg} \varphi_M . \quad (8)$$

Физик Уолтер Морис Эльзессер выдвинул гипотезу о том, что вращение Земли приводит к медленным завихрениям в расплавленном

никелево-железном ядре, направленным с запада на восток. Эти вихри индуцируют электрический ток, который также движется с запада на восток. Кольцевые токи создают характерную для магнитного диполя систему силовых линий индукции, совпадающую с проверенной практикой феноменологической моделью Гаусса. Получается что-то вроде электромагнита внутри земного шара, чьи полюса находятся в районе географических полюсов Земли (рис.5).

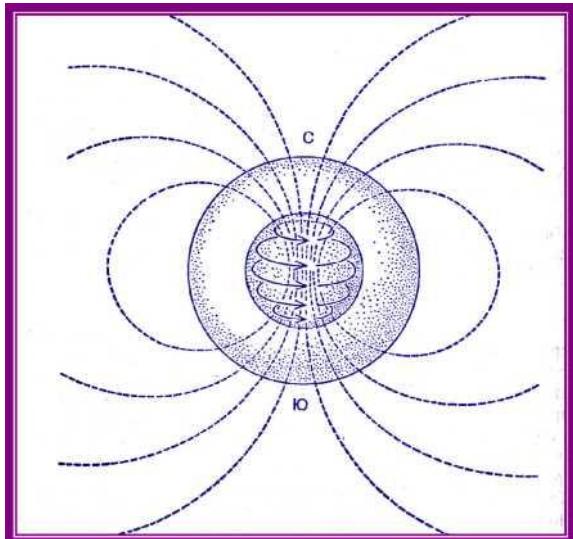


Рис. 5. Гипотеза Эльзессера о возникновении магнитного поля Земли

Этот магнит и создает общее магнитное поле Земли, ориентированное приблизительно вдоль оси вращения, так что магнитные полюса располагаются вблизи Северного и Южного географических полюсов. Итак, магнитное поле Земли создаётся её ядром. Внешнее ядро Земли жидкое и металлическое. Металл - проводящее ток вещество, и если бы существовали в жидком ядре постоянные течения, то соответствующий электрический ток создавал бы магнитное поле.

Благодаря вращению Земли, как мы уже выяснили, такие течения в ядре существуют, т.е. Земля в некотором приближении является магнитным диполем, своеобразным магнитом с двумя полюсами: южным и северным.

Незначительная часть магнитного поля (около 1%) имеет внеземное происхождение. Возникновение этой части приписывают электрическим токам, текущим в проводящих слоях ионосферы и поверхности Земли. Сюда же следует отнести магнитные возмущения от непрерывно происходящих вблизи поверхности планеты гроз. Эта часть магнитного поля Земли подвержена слабому изменению со временем, которое называется вековой вариацией.

Северный магнитный полюс был открыт в 1831 г. англичанином Джеймсом Россом в районе Канадского Арктического архипелага на расстоянии около 1200 миль от Северного географического полюса. Через десять лет экспедиция того же Джеймса Росса достигла района Южного магнитного полюса, расположенного вблизи побережья Антарктиды приблизительно в 900 милях от Южного географического полюса. Магнитные полюсы дрейфуют вдоль поверхности Земли со скоростью около 10 км в год. Настоящие их географические координаты находятся на значительном расстоянии от измеренных Джеймсом Россом.

В структуре магнитного поля Земли можно выделить четыре вида полей: дипольное поле, рассмотренное выше, поле материковых аномалий, поле региональных аномалий и поле локальных аномалий. Каждое из этих полей отличают важные и интересные в научном и практическом отношении особенности. Их изучают геофизики и геологи, так как они отображают состав и строение глубинных слоев Земли, а также физические процессы в ее недрах.

Обычно интенсивность дипольного поля во много раз больше, чем интенсивность материковых аномалий. Крайне редко встречаются участки земной поверхности, на которых эти аномалии по интенсивности близки к главному магнитному полю Земли. Среди этих участков уникален район Курской магнитной аномалии.

### **3. Описание экспериментальной установки**

Экспериментальная установка изображена на рис. 6. Два контура Гельмгольца представляют собой две кольцевые катушки в  $N$  витков каждая. Витки расположены в параллельных плоскостях с единой осью симметрии. Расстояние между ними равно радиусу  $R$  витка. При выполнении работы плоскости контуров располагают таким образом, чтобы кольцевые проводники находились в плоскости магнитного меридиана Земли. Небольшие отклонения от плоскости магнитного меридиана допустимы и учтены в методике эксперимента. Питание контуров, соединенных последовательно, осуществляется от универсального источника постоянного тока. Значения тока можно изменять с помощью реостата. Величина тока контролируется цифровым мультиметром, работающим в режиме амперметра. Изменяя величину тока в контурах Гельмгольца, мы изменяем величину внешнего магнитного поля, которое пропорционально току. Известное магнитное поле, создаваемое контурами Гельмгольца, накладывается на неизвестное магнитное поле Земли. Магнитное поле Земли можно определить (вычислить) по значению и направлению результирующей индукции магнитного поля. Для измерения величины магнитного поля используется цифровой тесlamетр. Датчик Холла, показания с которого поступают на тесlamетр, крепится на конце несущего стержня, который размещают внутри катушек Гельмгольца, располагая его вдоль оси катушек. Поскольку исследуемая точка располагается точно посередине между контурами на оси симметрии, необходимо поместить стержень между катушками так, чтобы конец его оказался именно в этой точке. При проведении измерений аксиальный стержень с датчиком закрепляют на штативе и соединяют с тесlamетром. Направление результирующего магнитного поля определяют магнетометром, который представляет собой насаженную на вертикальную спицу магнитную стрелку (магнитный диполь), вращающуюся вдоль дугообразной шкалы, позволяющей проводить угловые измерения. При измерении горизонтальной составляющей магнитного поля Земли магнетометр помещают в про-

странство между катушками так, чтобы центр вращения магнитной стрелки оказался в упомянутой выше исследуемой точке. Предусмотрена также возможность поворота плоскости вращения стрелки в вертикальную позицию, это позволяет определить наклонение  $J$  магнитного поля и вертикальную составляющую магнитного поля Земли

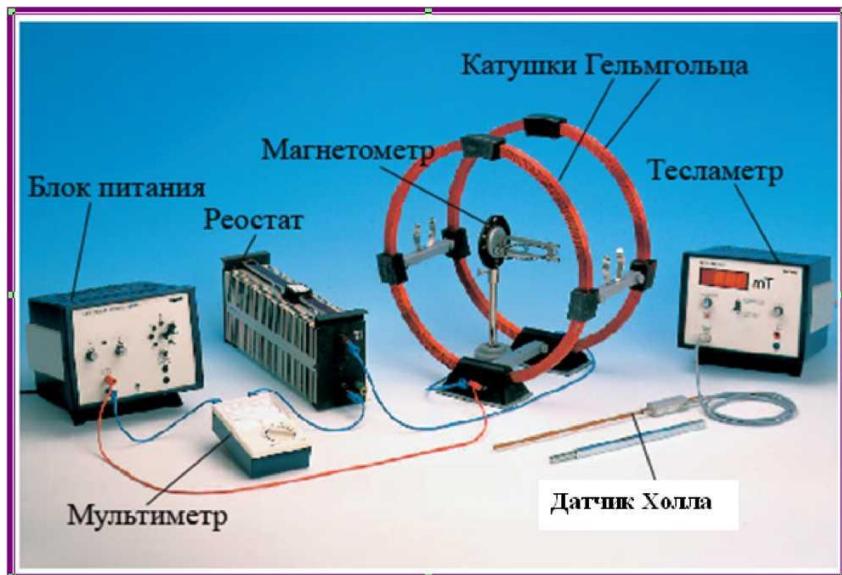


Рис. 6. Экспериментальная установка для определения магнитного поля Земли

#### 4. Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо строго соблюдать требования по технике безопасности и охране труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории. Внимательно изучите приборы, которые будут использованы при измерениях.

#### *4.1. Определение калибровочного фактора $K$ системы колец Гельмгольца*

4.1.1. Соберите экспериментальную установку в соответствии с изображением на рис. 6 с единственной поправкой: магнитометр, изображенный в центре системы Гельмгольца, необходимо временно перенести, освободив измерительный объем установки. Включите в сеть блок питания и цифровой тесламетр. После пятиминутного интервала, необходимого для выхода на стационарный режим приборов, приступайте к выполнению измерений в соответствии с индивидуальным заданием.

4.1.2. Величина силы тока, протекающего по обмоткам катушек Гельмгольца, измеряется цифровым мультиметром, который работает в режиме амперметра с диапазоном измерения 20 А на протяжении всего эксперимента. Цена деления мультиметра в этом диапазоне - 0,01 А. Магнитная индукция суммарного воздействия двух симметрично расположенных катушек Гельмгольца, по которым протекает постоянный ток, определяется с помощью датчика Холла, установленного внутри системы. Опорный стержень располагается вдоль оси катушек так, чтобы измерительный датчик (конец опорного стержня) оказался в геометрическом центре системы. После фиксации положения стержня его закрепляют в штативе. Численное значение магнитной индукции измеряется цифровым тесламетром.

4.1.3. Изменяйте силу тока с заданным индивидуальным заданием шагом, перемещая движок реостата. Каждому значению силы тока необходимо сопоставить соответствующее ему значение магнитной индукции в геометрическом центре системы катушек Гельмгольца. Подобная измерительная процедура носит название **калибровочной**.

4.1.4. Полученные экспериментальные результаты занесите в таблицу 1.

4.1.5. На миллиметровой бумаге постройте калибровочную функцию катушек Гельмгольца, аналогичную изображенной на рис. 7. Для этого по горизонтальной оси (ось абсцисс) отложите значения силы тока  $I_H$ , текущего по обмоткам контуров Гельмгольца. В каче-

стве единицы измерения, задающей масштаб по горизонтали, примите один ампер (1А). По вертикальной оси (ось ординат) отложите значения магнитной индукции  ${}^h\vec{B}_H$ , создаваемой этим током в исследуемой точке. В качестве единицы измерения, задающей масштаб по вертикали, примите одну миллитеслу (1 мТл).

4. 1.6. Измерьте графически тангенс угла наклона эмпирической линейной зависимости  ${}^hB_E = K \cdot I_H$  магнитной индукции от силы тока в катушках, при этом угол отсчитывайте от оси абсцисс к линии графика в положительном направлении. Тем самым определите постоянную калибровки  $K$ , т.е. коэффициент линейной зависимости, выраженный в заданном масштабе физических величин. Последнее означает, что размерность постоянной калибровки  $K$  равна

$[K] = \frac{mTl}{A}$ . Очевидно, численное значение постоянной  $K$  изменяется с изменением масштаба, или переходом к другому масштабу, измерения физических переменных в соответствии с правилами теории размерностей.

Таблица 1

№	1	2	3	...	$n$
$I_H$ , А					
$\Delta I_H$ , А					
$B_H$ , мТл					
$\Delta B_H$ , мТл					

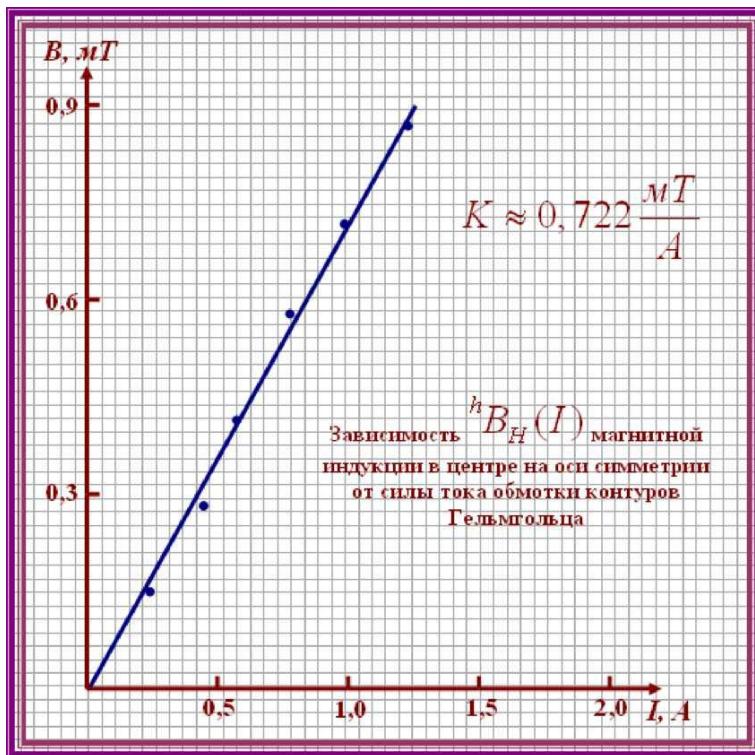


Рис. 7. Калибровочная функция катушек Гельмгольца

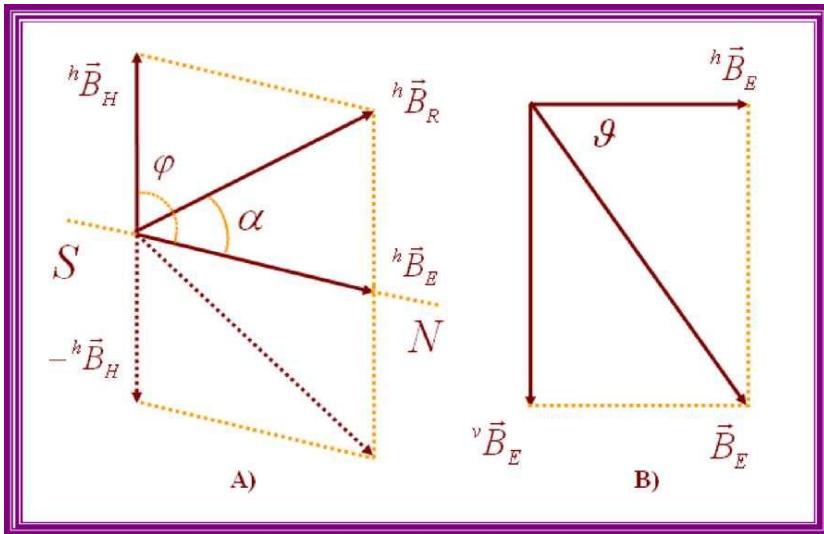
4.1.7. **Замечание.** Перед началом измерения величины магнитной индукции вращением ручки «установка нуля» обязательно установите нулевую позицию тесламетра! Ток через обмотки колец Гельмгольца при этом равен нулю!

Результатом измерения считайте максимальный выброс, зафиксированный на шкале тесламетра после каждого нового значения тока через кольца Гельмгольца. Проследите, чтобы стержень совпадал с горизонтальной осью катушек. Погрешность результата определяется ценой деления шкалы прибора.

4.1.8. По окончании измерений отключите питание основного блока и цифрового тесламетра. Освободите для дальнейших измерений рабочий объем системы Гельмгольца, переместив штатив с датчиком Холла.

*4.2. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли*

4.2.1. Горизонтальная компонента магнитного поля Земли  $^h\vec{B}_E$  определяется с использованием суперпозиции поля земного магнетизма (неизвестного по величине) и внешнего поля катушек Гельмгольца (известного и по величине, и по направлению). На рис. 8А изображен параллелограмм векторного сложения полей. Вектор магнитной индукции  $^h\vec{B}_E$  представляет горизонтальную составляющую поля земного магнетизма, расположена в плоскости магнитного меридиана *SN*. Вектор магнитной индукции  $^h\vec{B}_H$  представляет поле катушек Гельмгольца, направлен вдоль оси симметрии катушек, составляющей угол  $\varphi$  с плоскостью магнитного меридиана *SN*. Условия эксперимента устроены таким образом, что  $\varphi$  имеет значение близкое к  $90^\circ$ . Модуль вектора  $^h\vec{B}_H$  линейно зависит от величины тока обмоток катушек, определяется калибровочной функцией, измеряемой экспериментально согласно пункту 4.1. Ток обмоток катушек контролируют с помощью цифрового мультиметра. Вектор  $^h\vec{B}_R$  представляет результирующее поле, составляет измеряемый с помощью магнитной стрелки магнитометра угол  $\alpha$  с направлением магнитного меридиана *SN*.



**Рис. 8.** А - Суперпозиция магнитного поля Земли и магнитного поля катушки Гельмгольца в горизонтальной плоскости; В - магнитное поле Земли в вертикальной плоскости

4.2.2. Направление результирующего вектора  $\vec{B}_R$  определите, установив цилиндрическое основание магнетометра на лабораторном столе между катушками так, чтобы ось вращения магнитной стрелки находилась в геометрическом центре установки Гельмгольца, т.е. посередине между катушками, и неподвижная точка вращающейся стрелки совпала с осью катушек. При отключенном питании обмоток катушек ( $I_H = 0$ ) стрелка установится вдоль направления SN магнитного меридиана. Осторожно вращая основание магнетометра вокруг оси симметрии, установите положение дугообразной шкалы таким образом, чтобы стрелка в этом положении имела нулевой отсчет (фиксация нуля). Ввиду важности фиксации нулевого отсчета отклоните последовательно несколько раз стрелку из установленного нулевого положения и предоставьте возможность остановиться на

нулевом показании. Для того чтобы исключить влияние возможных сил трения в оси стрелки компенсируйте ее легкими постукиваниями по оси. Убедившись в том, что нулевое положение стрелки соответствует положению стрелки в плоскости магнитного меридиана, продолжите процесс измерений далее.

4.2.3. Поверните (не смешая) установку Гельмгольца вокруг ее центра так, чтобы плоскости обоих контуров оказались приблизительно параллельными направлению *SN* магнитного меридиана, т.е. направлению стрелки.

**Замечание.** Методика проводимых измерений позволяет измерить горизонтальную составляющую магнитного поля Земли также при не параллельных магнитному меридиану плоскостях контуров Гельмгольца, при этом угол  $\varphi$  между векторами  ${}^h\vec{B}_E$  и  ${}^h\vec{B}_H$  не равен  $90^\circ$ .

Пользуясь рисунком рис. 8А по теореме синусов имеем

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(\varphi - \alpha)} = \frac{{}^hB_H}{{}^hB_E}. \quad (9)$$

В особом случае, когда ось катушек Гельмгольца перпендикулярна направлению Земного меридиана, т.е. направлению «юг - север» ( $\varphi=90^\circ$ ) имеем упрощенный вариант (9):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{{}^hB_H}{{}^hB_E}. \quad (10)$$

С помощью процедуры калибрования (4.1) мы нашли зависимость магнитной индукции поля катушек Гельмгольца от силы тока этих катушек:

$${}^hB_H = I_H \cdot K. \quad (11)$$

Отсюда получаем соотношение:

$${}^hB_E \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = I_H \cdot K. \quad (12)$$

Последнее равенство означает, что если рассматривать величину

$I_H \cdot K$  как линейную функцию переменной  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$  (заметим, что

обе величины определяются независимым измерением в эксперименте) горизонтальная составляющая магнитного поля Земли  ${}^hB_E$  определяется как коэффициент линейности соотношения (12), т.е. как тангенс угла наклона соответствующего линейного графика. Теперь можно приступить к непосредственному измерению горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

4.2.4. Движок реостата установите в крайнее дальнее от наблюдателя положение согласно рис. 6. Включите универсальный блок питания и после необходимой паузы (см. пункт 1 данного раздела) последовательным вращением двух левых ручек блока питания "V" и "A" установите требуемое согласно индивидуальному заданию значение силы тока в обмотках катушек. Силу тока контролируйте мультиметром в режиме амперметра, при этом диапазон шкалы прибора при всех измерениях силы тока равен 20 А. Далее перемещая движок реостата по направлению к наблюдателю и, где необходимо, поворачивая левые ручки блока питания, пройдите последовательно весь ряд рекомендуемых индивидуальным заданием значений силы тока. Для каждого установленного значения силы тока измерьте по шкале магнитометра угол  $\alpha$  отклонения магнитной стрелки. Результаты измерений занесите в таблицу 2.

4.2.5. Для определения величины угла  $\varphi$  необходимо измерить угол отклонения магнитной стрелки  $\alpha$  при величине тока, протекающего через обмотки катушки Гельмгольца, порядка 1,5-2,0 А. При таких значениях магнитное поле, создаваемое током и направленное вдоль оси катушки, значительно превосходит магнитное поле Земли. В этом случае магнитная стрелка устанавливается вдоль оси катушки. При нулевом токе магнитная стрелка ориентирована в плоскости магнитного меридиана, при этом угол  $\alpha=0$  (пункт 4.2.2). Разница в значениях угла  $\alpha$  в этих двух случаях и определяет угол  $\varphi$ . Для обеспечения надежности определения угла  $\varphi$  проведите последовательно несколько ( $n=5$ ) независимых измерений, каждый раз

выводя стрелку из установленного положения легким толчком. За истинный результат  $\varphi$ , как всегда, принимается среднее арифметическое по числу произведенных измерений  $\langle \varphi \rangle = \sum_{i=1}^{i=5} \varphi_i / 5$ .

**4.2.6. Замечание.** Согласно индивидуальному заданию необходимо также провести серию измерений на рассмотренной установке при обратном направлении тока контуров Гельмгольца, т.е. при противоположном направлении индукции внешнего магнитного поля. В этом случае все определяющие соотношения (9), (11), (12) сохраняют силу. При этом, как это следует из пунктирной части рис. 8А, угол отклонения магнитной стрелки  $\alpha$  от направления SN (юг-север) следует отсчитывать в отрицательном направлении (т.е. по часовой стрелке), в соотношении (9), а значит и (12), в качестве угла  $\varphi$  необходимо использовать значение  $(\pi - \varphi)$ , где  $\varphi$  угол, отнесенный к случаю прямого тока. Ряд экспериментальных результатов, как при прямом токе, так и при обратном, записывают в единообразную таблицу 2 и графически наносят на единый график как независимые измерения. Оба случая, прямого и обратного тока, выступают друг по отношению к другу как независимые и дополняющие наборы экспериментальных значений, позволяющие более надежно построить искомую графическую зависимость.

Таблица 2

№	1	2	3	...	$n$
$I_h, A$				...	
$\Delta I_h, A$				...	
$I_h \cdot K \cdot 1000,$ $\mu G$				...	
$\alpha, grad$				...	
$\Delta \alpha, grad$				...	
$\sin \alpha$				...	
$\sin(\varphi - \alpha)$				...	
$\frac{\sin \alpha}{\sin(\varphi - \alpha)}$				...	

4.2.7. На миллиметровой бумаге постройте корреляционную зависимость угла  $\alpha$  отклонения магнитной стрелки и силы тока  $I_H$  катушки Гельмгольца аналогичную изображенной на рис. 7. По горизонтальной оси (ось абсцисс) отложите в удобном для измерений масштабе значения безразмерной функции угла  $\alpha$ , именно:  $\frac{\sin \alpha}{\sin(\varphi - \alpha)}$ .

По вертикальной оси (ось ординат) отложите значения калибровочной функции катушек Гельмгольца  $I_H \cdot K$ , зависящей, как от аргумента, от значений силы тока через катушки (рис. 9).

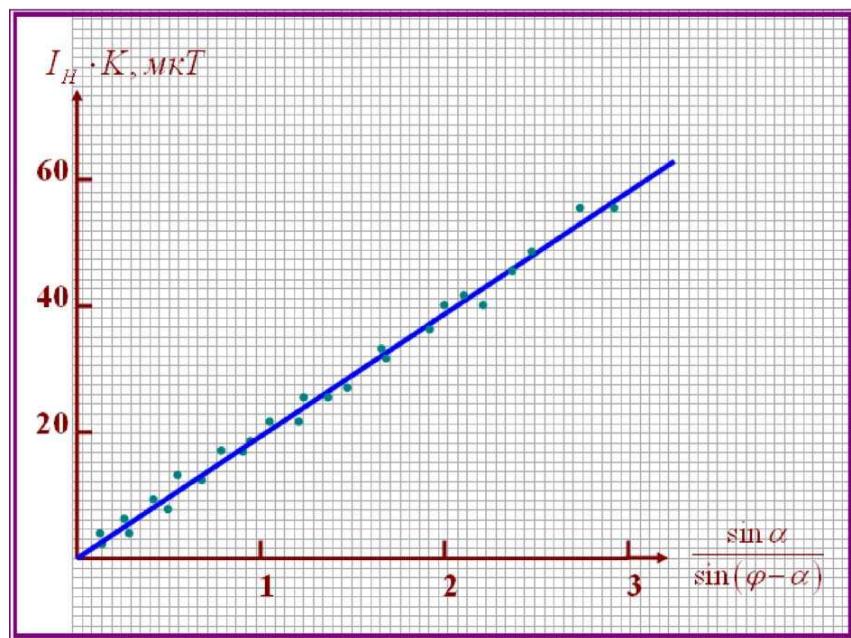


Рис. 9. Корреляционная зависимость угла отклонения магнитной стрелки и силы тока катушки Гельмгольца

4.2.8. Поскольку на данном этапе используются слабые токи ( $I_H \leq 0,15$  А), а, значит, и слабые магнитные поля катушек Гельмгольца, сравнимые по величине с геомагнитным полем, разумно в калибровочном факторе  $K$  изменить масштаб размерности. От размерного множителя  $\frac{\text{мТл}}{\text{А}}$  перейдите к размерному множителю  $\frac{\text{мкТл}}{\text{А}}$ ,

при этом численное значение калибровочного фактора, полученное на предыдущем этапе должно быть скорректировано следующим образом:  $K \cdot \frac{\text{мТл}}{\text{А}} \rightarrow K \cdot 1000 \cdot \frac{\text{мкТл}}{\text{А}}$ .

4.2.9. После произведенного преобразования единицей измерения, в которой откладываются численные значения по вертикальной оси ординат, является одна микротесла (1 мкТл). При выбранном масштабе численное значение тангенса угла наклона линейного графика определяет горизонтальную составляющую магнитного поля Земли, выраженную в микротеслах (мкТл).

4.2.10. Измерив графически тангенс угла наклона эмпирической линейной зависимости, построенной по экспериментальным точкам из таблицы 2 определите горизонтальную составляющую магнитного поля Земли  ${}^h\vec{B}_E$ .

### 4.3. Определение магнитного наклонения и вертикальной составляющей магнитного поля Земли

4.3.1. Отключите источник питания, таким образом, обесточив катушки Гельмгольца и обратив в ноль внешнее магнитное поле. После небольшой паузы, когда магнитная стрелка установится в плоскости магнитного меридиана, осторожно ориентируйте магнитометр в горизонтальной плоскости таким образом, чтобы угол поворота стрелки по горизонтальной шкале составлял  $0^\circ$  и, при этом, северный конец стрелки одновременно указывал на отметку  $90^\circ$  по вертикальной шкале. Поверните дуговую шкалу по часовой стрелке так, чтобы она расположилась в вертикальной плоскости. Выждав некоторый промежуток времени, измерьте наклонение  $J$  (т.е. угол наклона магнитной стрелки в вертикальной плоскости, отсчитывае-

мый от горизонтальной плоскости вниз). На рис. 8В используется более привычное в практических выкладках обозначение наклонения греческой буквой  $\vartheta$ . Проведите согласно индивидуальному заданию несколько независимых измерений угла наклонения  $\vartheta$ , каждый раз выводя стрелку из положения равновесия. В качестве истинного значения принимается, как обычно, среднее по числу выполненных измерений  $\langle \vartheta_1 \rangle$ . Проделайте аналогичную процедуру с поворотом шкалы в вертикальное положение против часовой стрелки, и получите значение  $\langle \vartheta_2 \rangle$ . Углом магнитного наклонения счи-

$$\text{тайте } \vartheta = \frac{\langle \vartheta_1 \rangle + \langle \vartheta_2 \rangle}{2}.$$

4.3.2. Вертикальную составляющую магнитного поля Земли определите по формуле

$${}^v B_E = {}^h B_E \cdot \operatorname{tg} \vartheta. \quad (13)$$

#### 4.4. Определение модуля вектора магнитной индукции Земли

4.4.1. Полное значение магнитной индукции Земли вычислите согласно очевидному из рисунка рис. 8В соотношению

$$|B_E| = \sqrt{({}^v B_E)^2 + ({}^h B_E)^2}. \quad (14)$$

4.5. Сравнение полученных результатов со справочными данными

4.5.1. Сопоставьте измеренные экспериментальные результаты со справочными данными параметров магнитного поля Земли в г. Москва на 18.11.2008:

Горизонтальная составляющая  ${}^h B_E = 15,97$  (мкТл);

Вертикальная составляющая  ${}^v B_E = 48,13$  (мкТл);

Модуль вектора магнитной индукции  $B_E = 50,71$  (мкТл);

Магнитное наклонение  $J = 71,68^\circ$ .

## 5. Обработка результатов эксперимента

Все прямые измерения углов  $\alpha$ ,  $\varphi$  и  $\vartheta$  проводятся несколько раз, при этом в качестве результата принимается среднее по числу проведенных измерений, которое определяется индивидуальным заданием. Погрешностью прямого измерения принимается сумма среднеквадратичной погрешности и приборной погрешности, определяемой половиной цены деления.

В качестве примера рассмотрим схему обработки результатов прямых измерений угла  $\vartheta$ , т.е. наклонения магнитного поля

$$\sum_{i=1}^N \vartheta_i$$

Земли. Истинный результат измерения:  $\langle \vartheta \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vartheta_i$ , где  $N$  – число

независимых измерений угла  $\vartheta$ .

Среднеквадратичная погрешность измерения:

$$\sigma_\vartheta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\langle \vartheta \rangle - \vartheta_i)^2}{N(N-1)}}.$$

Приборная погрешность (половина цены деления дуговой шкалы):  $\delta_{np}$ .

Абсолютная (полная) погрешность:  $\Delta \vartheta = \sigma_\vartheta + \delta_{np}$ .

Относительная погрешность:  $\varepsilon_\vartheta = \frac{\Delta \vartheta}{\langle \vartheta \rangle} \cdot 100\%$ .

Форма записи результата:  $\vartheta = \langle \vartheta \rangle \pm \Delta \vartheta$ .

Прямые измерения с помощью цифровых приборов (цифровой мультиметр, цифровой тесламетр) проводятся, в единственном варианте (если не оговорено обратное). Приборная погрешность определяется ценой деления прибора. Главные измеряемые величины: калибровочная постоянная катушек Гельмгольца  $K$  и горизонтальная составляющая магнитного поля Земли  ${}^h \vec{B}_E$ , определяются как кру-

тизна графических наклонных на эмпирических графиках, подобных изображенным на рисунках рис. 7 и рис. 9. Поскольку нахождение погрешности измеряемой величины по экспериментальным точкам на графике требует владения методом линейной регрессии или методом наименьших квадратов и выходит за рамки стандартной программы «Общей физики», полученные значения считать оценочными. Погрешности не вычислять.

Результат измерения вертикальной составляющей магнитного поля Земли, использующий результат измерения горизонтальной составляющей магнитного поля как исходный и промежуточный, также считать оценочным. По этой причине погрешности не вычислять.

*При графическом построении линейной зависимости помнить эмпирическое правило: число экспериментальных точек на графике, лежащих выше построенной линии должно иметь близкое значение числу экспериментальных точек, лежащих ниже построенной линии.*

## 6. Индивидуальные задания

### Задание 1

1. Проведите калибровку катушек Гельмгольца. Меняя значения тока от 0 до 1,8 А через каждые 0,1 А измеряйте магнитную индукцию в окрестности оси контуров. Постройте графическую зависимость магнитной индукции от силы тока в обмотках катушек. Определите калибровочный фактор катушек Гельмгольца, т.е. крутизну линейной зависимости магнитной индукции от силы тока.

2. Измерьте горизонтальную составляющую магнитного поля Земли. Для этого проведите измерительную серию углов отклонения магнитной стрелки как функции кольцевых токов, меняя значения силы тока от 0 до 0,08 А с шагом 0,01 А при прямом токе. Повторите аналогичную серию измерений при обратном токе. Результаты произведенных измерений обработайте согласно указаниям пунктов 4 и 5 данного описания.

3. Располагая измерительную плоскость магнитометра в вертикальной позиции вблизи плоскости магнитного меридиана, измерьте наклонение  $J$  и вертикальную составляющую магнитного поля Земли. Проведите серию из 10 независимых измерений. Результаты измерений обработайте согласно рекомендациям пункта 5.

### **Задание 2**

1. Проведите калибровку катушек Гельмгольца. Меняя значения тока от 0 до 1,8 А через каждые 0,15 А измеряйте магнитную индукцию в окрестности оси контуров. Постройте графическую зависимость магнитной индукции от силы тока в обмотках катушек. Определите калибровочный фактор катушек Гельмгольца, т.е. крутизну линейной зависимости магнитной индукции от силы тока.

2. Измерьте горизонтальную составляющую магнитного поля Земли. Для этого проведите измерительную серию углов отклонения магнитной стрелки как функции кольцевых токов, меняя значения силы тока от 0 до 0,10 А с шагом 0,01 А при прямом токе. Повторите аналогичную серию измерений при обратном токе с шагом 0,02 А. Результаты произведенных измерений обработайте согласно указаниям пунктов 4 и 5 данного описания.

3. Располагая измерительную плоскость магнитометра в вертикальной позиции вблизи плоскости магнитного меридиана, измерьте наклонение  $J$  и вертикальную составляющую магнитного поля Земли. Проведите серию из 15 независимых измерений, из них 5 последних измерений проведите, повернув измерительную плоскость на  $180^\circ$  от начального положения. Результаты измерений обработайте согласно рекомендациям пункта 5.

### **Задание 3**

1. Проведите калибровку катушек Гельмгольца. Меняя значения тока от 0 до 2,0 А через каждые 0,2 А измеряйте магнитную индукцию в окрестности оси контуров. Постройте графическую зависимость магнитной индукции от силы тока в обмотках катушек.

Определите калибровочный фактор катушек Гельмгольца, т.е. крутизну линейной зависимости магнитной индукции от силы тока.

2. Измерьте горизонтальную составляющую магнитного поля Земли. Для этого проведите измерительную серию углов отклонения магнитной стрелки как функции кольцевых токов, меняя значения силы тока от 0 до 0,12 А с шагом 0,01 А при прямом токе. Повторите аналогичную серию измерений при обратном токе с шагом 0,02 А. Результаты произведенных измерений обработайте согласно указаниям пунктов 4 и 5 данного описания.

3. Располагая измерительную плоскость магнетометра в вертикальной позиции вблизи плоскости магнитного меридиана, измерьте наклонение  $J$  и вертикальную составляющую магнитного поля Земли. Проведите серию из 20 независимых измерений, из них последние 10 измерений проведите, повернув измерительную плоскость на  $180^\circ$  от начального положения. Результаты измерений обработайте согласно рекомендациям пункта 5.

#### **Задание 4**

1. Проведите калибровку катушек Гельмгольца. Меняя значения тока от 0 до 2,5 А через каждые 0,25 А измеряйте магнитную индукцию в окрестности оси контуров. Постройте графическую зависимость магнитной индукции от силы тока в обмотках катушек. Определите калибровочный фактор катушек Гельмгольца, т.е. крутизну линейной зависимости магнитной индукции от силы тока.

2. Измерьте горизонтальную составляющую магнитного поля Земли. Для этого проведите измерительную серию углов отклонения магнитной стрелки как функции кольцевых токов, меняя значения силы тока от 0 до 0,15 А с шагом 0,01 А при прямом токе. Повторите аналогичную серию измерений при обратном токе. Результаты произведенных измерений обработайте согласно указаниям пунктов 4 и 5 данного описания.

3. Располагая измерительную плоскость магнетометра в вертикальной позиции вблизи плоскости магнитного меридиана, из-

мерьте наклонение  $J$  и вертикальную составляющую магнитного поля Земли. Проведите серию из 15 независимых измерений, из них 10 последних измерений проведите, повернув измерительную плоскость на  $180^\circ$  от начального положения. Результаты измерений обработайте согласно рекомендациям пункта 5.

## 7. Контрольные вопросы

### Общий теоретический вопрос (относится ко всем индивидуальным заданиям)

*Объясните, почему в методике работы для того, чтобы прокалибровать контуры Гельмгольца предлагается провести измерительную серию при токах порядка 0,1-2,0 A. Между тем, как для процесса измерения геомагнитного поля используют значительно более слабые токи порядка 0,01-0,1 A. При этом калибровочная постоянная K, измеренная при больших токах, применяется при токах на порядок меньших. Какой в этом смысл? Почему бы процедуру калибрования контуров Гельмгольца не провести сразу при рабочих значениях токов?*

1. Какие физические явления относят к проявлениям земного магнетизма?
2. Сформулируйте феноменологическую модель, принятую для количественного описания явлений земного магнетизма.
3. Что такое магнитный диполь? Какое воздействие оказывает постоянное однородное (и неоднородное) магнитное поле на него? Какую роль играет магнитный диполь в объяснении явлений бытового магнетизма?
4. Какое поле создает магнитный диполь на большом расстоянии от него? Как понимать смысл термина «большое расстояние»? Получите аналитическое выражение формы магнитной силовой линии диполя.
5. Сформулируйте основные физические принципы экспери-

ментального измерения местного геомагнитного поля в данной работе.

6. Выведите формулу для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в данной работе.

7. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитного поля и, используя его, решите следующую задачу.

*Задача.* Два прямых длинных провода, по которым текут одинаковые токи  $I$ , скрещены друг с другом под прямым углом и лежат в одной плоскости. Найдите магнитную индукцию на биссектрисах прямых углов.

### Приложение 1. Кольца Гельмгольца

Катушки Гельмгольца используются для получения практически однородного магнитного поля. В идеальном случае это - два круговых контура электрического тока одинакового диаметра, расположенные параллельно на расстоянии радиуса кольца, с центрами на общей оси и соединенные последовательно (рис. 10).

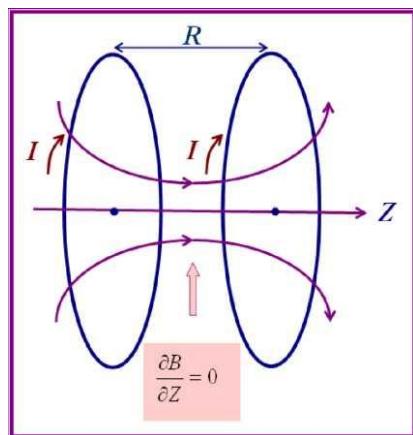


Рис. 10. Кольца Гельмгольца

Обычно кольца Гельмгольца состоят из катушек, на которых намотано некоторое количество витков, причем толщина катушки должна быть много меньше их радиуса. В реальных системах толщина катушек может быть сравнима с их радиусом. Таким образом, можно считать системой колец Гельмгольца две соосно-расположенные одинаковые катушки, расстояние между центрами которых приблизительно равно их среднему радиусу. В центре системы имеется зона однородного магнитного поля, что может быть использовано для измерительных целей, например, для калибровки датчиков магнитной индукции и т. д.

Расчет индукции магнитного поля для идеального случая системы Гельмгольца не вызывает затруднений и производится на базе формулы для магнитной индукции на оси кольца, полученной на основе закона Био-Савара-Лапласа:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I\pi R^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}}, \quad (15)$$

где  $I$  - сила тока, текущего по кольцу,  $R$  - радиус кольца,  $h$  - расстояние исследуемой точки от центра кольца вдоль оси симметрии. Учитывая, что в системе Гельмгольца кольца располагаются параллельно на расстоянии  $R$  друг от друга и соединены последовательно, индукция магнитного поля удваивается в исследуемой точке согласно принципу суперпозиции. Необходимо также учесть мультиплексивный фактор числа витков в катушке. Параметр  $h$  следует приравнять  $R/2$ . В результате для вычисления магнитной индукции системы колец Гельмгольца получаем расчетную формулу:

$$B = \mu_0 \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{I \cdot N}{R} \approx 0,8992 \cdot 10^{-6} \frac{I \cdot N}{R} (T \cdot l) = 0,8992 \frac{I \cdot N}{R} (\text{мкТл}),$$

где  $N$  - число витков в каждой из катушек, сила тока измеряется в амперах, радиус колец измеряется в метрах.

## Приложение 2

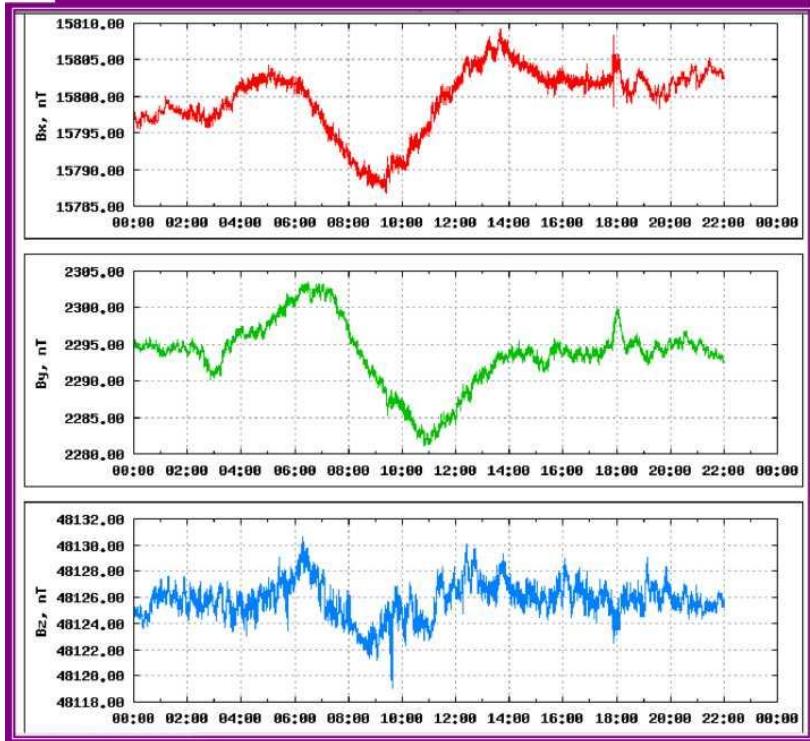


Рис. 11. Данные Института динамики геосфер РАН (обсерватория Михнево)

На рис. 11 приведены данные суточных наблюдений за магнитным полем Земли по Московской области (20-ый км от г. Пущино) на 18.11.2008. Представлены значения проекций вектора магнитной индукции Земли на оси:  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ . Здесь ось  $x$  направлена на север, ось  $y$  на восток, ось  $z$  вертикально вниз, т.е. к центру земного шара. Единица измерения - 1 нТл.

### Приложение 3. Устройство датчика Холла

Датчики магнитного поля обеспечивают на выходе электрическое напряжение (разность потенциалов), пропорциональное величине магнитной индукции в исследуемой точке. Самым известным и используемым устройством для измерения величины магнитной индукции является датчик Холла (рис. 12, 13). Измерители на основе этого устройства проектируются как пробники небольших габаритов, которые могут содержать один, два или три кристалла полупроводника для измерения магнитного поля в одно-, двух- или трех- взаимно перпендикулярных направлениях.

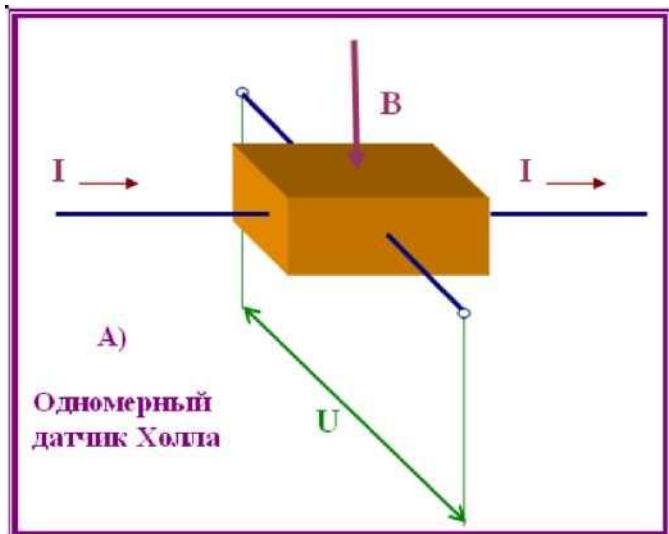


Рис. 12. Одномерный датчик Холла

Если через полупроводник в одном направлении пропускать постоянный ток  $I$  плотностью  $j$ , а в перпендикулярном направлении воздействовать магнитным полем индукции  $B$ , то в направлении, перпендикулярном двум первым, (т.е. перпендикулярном плоскости,

образованной этими направлениями) можно измерить напряжение  $V$ , пропорциональное величине магнитного поля:

$$V = RBbj , \quad (16)$$

где  $R$  - постоянная Холла,  $b$  - расстояние между гранями, на которых возникает измеряемое напряжение. Данное явление получило название эффекта Холла, по имени физика Эдварда Герберта Холла, открывшего этот эффект в 1879 году в тонких пластинках золота. Так как измеряемое напряжение меняет знак на обратный при изменении направления магнитного поля на обратное, то эффект Холла относится к нечётным гальваномагнитным явлениям.

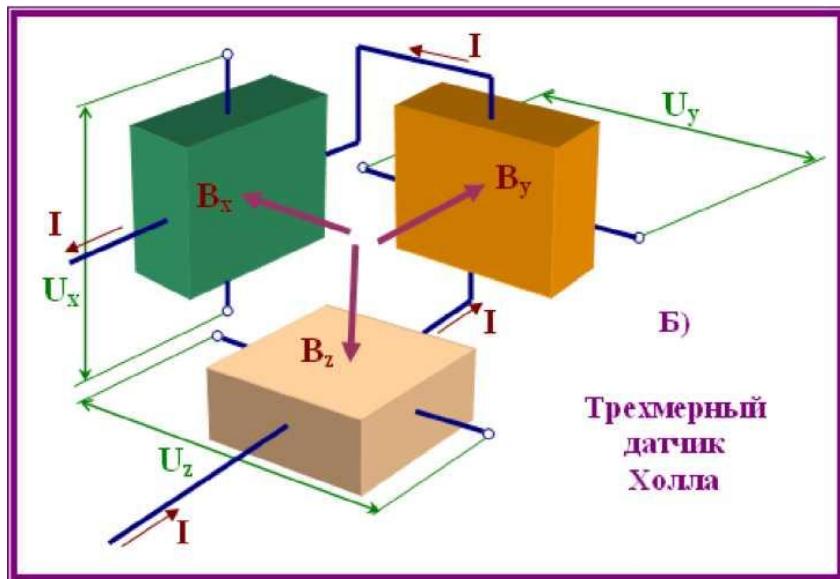


Рис. 13. Трехмерный датчик Холла

Из приведенной формулы следует, что  $V=k\cdot B$  при фиксированном значении силы тока, поэтому, если прокалибровать связь между измеренным напряжением и величиной магнитного поля, можно ис-

пользовать датчики на основе эффекта Холла (рис. 14) для измерения величины неизвестных магнитных полей.

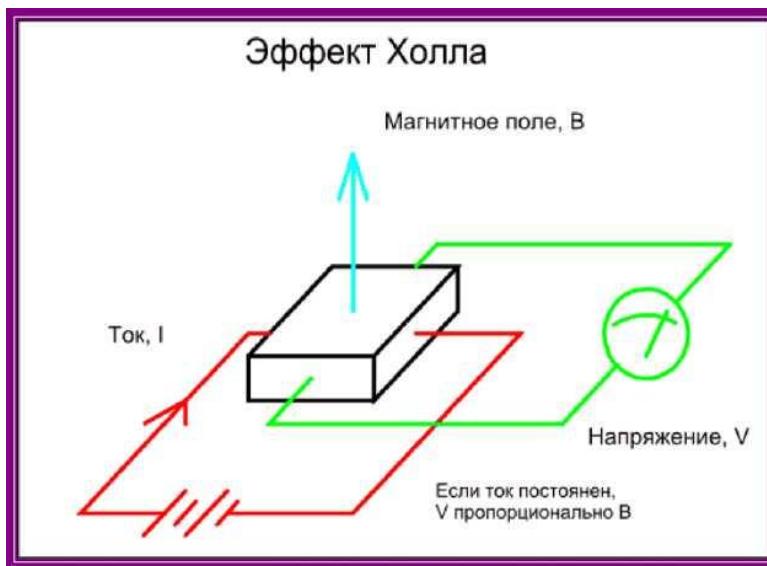


Рис. 14. Эффект Холла

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики в 5 кн. Кн. 2. М.: Астрель. АСТ. 2004. 336 с.
2. Физика. Раздел Электричество и магнетизм. Лабораторный практикум. М.: МИСиС. «Учеба». 2008. 20 с.
3. *Батурина Б.Н.* Правила электробезопасности при выполнении лабораторных работ. Учебное пособие. М.: МИСиС. 1995. 38 с.
4. *Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. Учебное пособие. М.: МИСиС. 2007. 107 с.
5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 3. М.: Физматлит. 2004. 687 с.
6. *Калашников С. Г.* Электричество М.: Физматлит. 2006. 655 с.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

1. Цель работы .....	3
2. Теоретическое введение.....	3
3. Описание экспериментальной установки .....	13
4. Порядок выполнения работы.....	144
5. Обработка результатов эксперимента.....	266
6. Индивидуальные задания .....	277
7. Контрольные вопросы.....	300
Приложение 1. Кольца Гельмгольца.....	311
Приложение 2 .....	333
Приложение 3. Устройство датчика Холла .....	344
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	37