

Министерство общего и профессионального  
образования Российской Федерации

ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Методические рекомендации

Иркутск 1999

Печатается по решению научно- методического совета  
Иркутского государственного университета

Кратко рассматриваются магнитное поле Земли и его характеристики, а также закон Био - Савара-Лапласа в применении к круговому току. Студентам предлагается экспериментально определить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли в Иркутске.

Предназначены для студентов 1 и 2 курсов естественных факультетов.  
Библиогр. 5 назв. Ил.11. Табл. 3.

Составители: к.ф.-м.н., доцент Алексеева Л.И.  
ст. преп. Айданова О.С,  
доктор ф.-м.н., проф. Паперный В.Л.  
(кафедра общей и космической физики)

Рецензент доц. Акатова Л.А.

## Лабораторная работа

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

#### Цель работы:

1. Изучение закона Био- Савара-Лапласа и его применение для случая магнитного поля кругового тока;
2. Знакомство с современными представлениями о магнитном поле Земли;
3. Экспериментальное определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли в Иркутске с использованием тангенс- гальванометра.

#### Основные приборы и принадлежности:

Источник постоянного напряжения, амперметр, реостат, тангенс - гальванометр с компасом.

#### Краткая теория

1. Одним из видов взаимодействия в природе является *электромагнитное* взаимодействие. На макроуровне оно проявляется в виде взаимодействия так называемых постоянных магнитов (например, стрелки компаса с магнитной защелкой), магнита и проводника с током, проводников с токами. Согласно современным представлениям все эти виды взаимодействия имеют единую природу и являются следствием действия *магнитного поля*, порождаемого *макро* - или *микротоками* одного тела, на макро или микро-токи другого тела. Другим источником магнитного поля является *переменное электрическое поле*. В этом случае говорят об едином *электромагнитном* поле.

Под микротоками понимают токи, текущие по проводникам под действием внешних источников Э.Д.С. Микротоки существуют на атомном уровне во всех телах и порождаются «вращением» электрона (заряженной частицы) по орбите вокруг ядра в атоме. Такое, направленное «движение» заряда образует кольцевой атомарный ток, обладающий магнитным полем. Помимо этого электрон обладает также собственным магнитным полем (вследствие вращения вокруг оси), которое характеризуется *спином*. Взаимодействие магнитных полей атомов данного тела друг с другом, а также с внешним магнитным полем определяются магнитные свойства этого тела.

Магнитное поле порождается токами и действует на токи. Поэтому установить характеристики магнитного поля в данной точке можно, поместив в нее магнитную стрелку или проводник с током и определив действие на них магнитного поля.

2. Основной силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ . Для графического изображения магнитных полей используется представление о линиях магнитной индукции, которые в магнитном поле проводятся так, что вектор  $\vec{B}$  в каждой точке поля направлен по касательной к силовой линии. Направление  $\vec{B}$  совпадает с вектором силы  $\vec{F}$ , действующей на северный полюс магнитной стрелки (рис.1). Линии индукции магнитного поля всегда **замкнуты**, в частности, они продолжаютя внутри полосовых магнитов, не обрываясь на полюсах. Это означает, что свободные магнитные «заряды» не существуют.

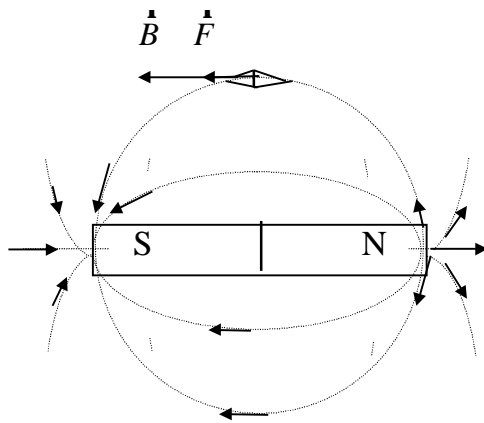


Рис.1. Силовые линии магнитного поля полосового магнита

Поместив в какую-либо точку поля проводник с током (рис.2), можно определить не только направление, но и величину вектора  $\vec{B}$ . Для этого нужно измерить силу  $\vec{F}$ , действующую на элемент проводника длиной  $dl$ , по которому протекает ток  $I$ . Поле  $\vec{B}$  в точке а, где находится элемент проводника, найдется по формуле

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \times \vec{B}], \quad (1)$$

называемой законом

Ампера. Здесь  $d\vec{l}$  - вектор длиной  $dl$ , направление которого совпадает с направлением тока  $I$ . Вектор  $\vec{F}$  перпендикулярен чертежу (рис.2).

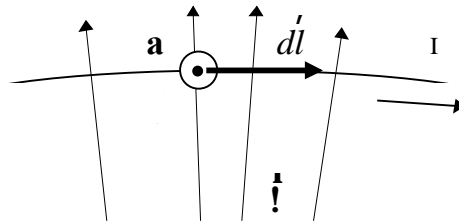


Рис. 2.

3. Магнитное поле  $d\vec{B}$ , порождаемое элементом проводника  $d\vec{l}$  с током  $I$  в точке А с радиус-вектором  $\vec{r}$  относительно элемента  $d\vec{l}$  (рис.3), можно найти

из закона Био-Савара-Лапласа. Этот закон (в вакууме или воздухе) имеет вид:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} [d\vec{l} \times \vec{r}], \quad \text{или} \quad d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \sin(\vec{dl} \wedge \vec{r}), \quad (2)$$

где  $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}$  Гн/м называется магнитной постоянной.

Для магнитного поля, как для электрического, справедлив принцип суперпозиции: поле, создаваемое проводником длиной  $L$  в произвольной

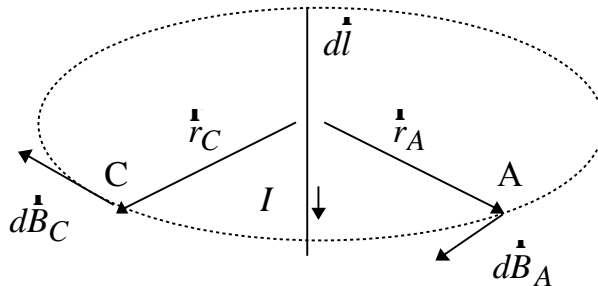


Рис.3.Магнитное поле проводника с током

точке складывается из полей, создаваемых всеми элементами проводника, согласно формуле (2) и вычисляется по формуле:

$$\vec{B} = \int d\vec{B}$$

Магнитное поле в центре кругового тока показано на рис. 4. Все элементы кругового проводника с током созда-

ют в т.О магнитное поле одинакового направления - вдоль нормали к плоскости витка, причем вектор магнитной индукции связан с направлением тока правилом правого винта, в соответствии с формулой (2).. Поэтому сло-

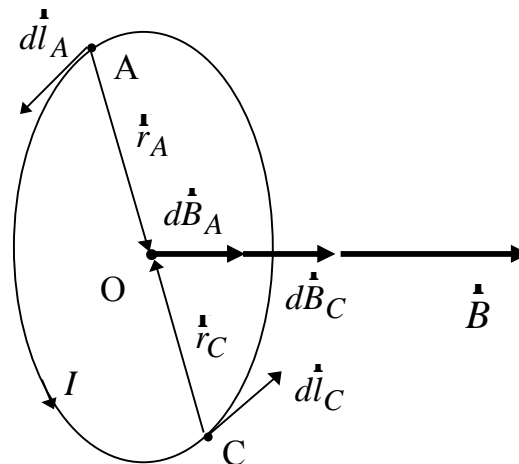


Рис. 4. Магнитное поле в центре кольцевого тока

жение векторов  $d\vec{B}$  можно заменить сложением их модулей. Так как все элементы проводника перпендикулярны радиус- вектору  $\vec{r}$  ( $\sin \alpha = 1$ ) и расстояние всех элементов до центра круговых токов одинаково и

равно  $R$ , то согласно (2)

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi R^2} Idl.$$

Тогда

$$\mathbf{r} \quad \mathbf{r} \\ \vec{B} = \int d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \mu_0 \frac{I}{2R}.$$

$$B_k = \mu_0 \frac{I}{2R} \quad (3)$$

4. Магнитное поле в среде определяется суммой полей внешних проводников с током и микрополей атомарных токов. Поля атомарных токов могут как ослаблять внешнее поле (в этом случае среда называется диамагнитной), так и усиливать внешнее поле (в парамагнитной среде). Однако эти эффекты очень слабы и изменение внешнего поля составляет сотые доли процента. Существует класс веществ, в которых даже в отсутствие внешнего поля имеются области размером  $10^{-2}$  -  $10^{-4}$  см. с весьма значительным собственным магнитным полем, называемые доменами. Во внешнем магнитном поле магнитные поля доменов «выстраиваются» так, что суммарное магнитное поле оказывается во много раз больше внешнего магнитного поля. Эти вещества носят название ферромагнетиков и они представляют наибольший практический интерес. В частности, ферромагнетиками являются постоянные магниты (например, стрелка компаса), у которых собственное суммарное магнитное поле доменов сохраняется и при выключении внешнего поля.

Для количественного описания магнитного поля в среде вводят дополнительную характеристику, называемую напряженностью магнитного поля  $\vec{H}$ . Напряженность, точнее вектор  $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$ , характеризует ту часть полного поля в среде, которая порождается *внешними токами* и для него всегда справедлив закон Био-Савара-Лапласа в форме (2). Магнитное поле, порожденное в среде атомарными микротоками, характеризует магнитные свойства *среды*, которые учитываются введением параметра  $\mu$ , называемого магнитной проницаемостью среды. Полное «истинное» магнитное поле в среде имеет вид

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0 = \mu \mu_0 \vec{H}. \quad (4)$$

В системе СИ магнитная индукция  $B$  измеряется в теслах (Тл), напряженность  $H$  - в А/м.

Из вышеизложенного следует, что для диамагнетиков  $\mu < 1$ , для парамагнетиков  $\mu > 1$ , для ферромагнетиков  $\mu \gg 1$ .

5. Магнитное поле Земли (геомагнетизм) определяется существованием главного (основного) поля (его вклад  $\sim 99\%$ ), обусловленного процессами, протекающими в жидком вращающемся металлическом ядре Земли и переменного геомагнитного поля ( $\sim 1\%$ ), порождаемого токами в магнитосфере и ионосфере. Из-за этого переменное поле часто называют электро-

магнитным полем Земли. Основное поле до высот порядка трех земных радиусов ( $3R_z$ ) имеет дипольный характер (рис.5), но на больших высотах структура поля значительно сложнее.

Из рис. 5 видно (сравни с рис.1), что земное магнитное поле имеет такой вид, как будто земной шар представляет собой магнит с осью, направленной приблизительно с севера на юг. Магнитные полюса Земли (точки, где  $\vec{B}$  перпендикулярны поверхности Земли), не совпадают с ее географическими

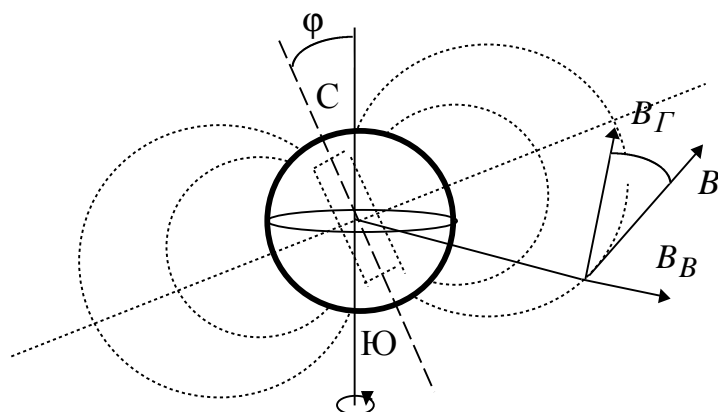


Рис.5. Главное магнитное поле Земли

полюсами. В северном полушарии все линии магнитного поля сходятся в точке, называемой южным (S) магнитным полюсом. Он находится на одном из островов Канадского архипелага и удален от северного географического полюса примерно на 1000 км. Северный магнитный полюс (N) расположен в Антарктиде и удален от южного географического полюса примерно на

800 км. Координаты магнитных полюсов приведены в таблице 1.

Нужно отметить, что точки схождения линий геомагнитного поля лежат не на самой поверхности Земли, а под ней. Гигантский дипольный магнит смещен от центра Земли в сторону Тихого океана на 436 км, и его ось образует с осью Земли угол  $\phi=11,5^0$ .

Так как магнитный и географический полюсы не совпадают, то магнитная стрелка указывает направление север- юг только приблизительно. Плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка, называют плоскостью магнитного меридиана данного места. Угол между плоскостями магнитного и географического меридианов называют *магнитным склонением*, его принято обозначать буквой  $D$ . Магнитное склонение изменяется от места к месту на земном шаре в пределах от  $0$  до  $180^0$ . Его называют западным и обозначают «-», если северный полюс магнитной стрелки отклоняется на запад; его называют восточным и обозначают «+», если стрелка отклоняется к востоку от плоскости географического меридиана (рис.6).

Из рис. 5 видно, что силовые линии магнитного поля не параллельны поверхности Земли. Это означает, что вектор магнитной индукции, касательный к силовой линии, не лежит в плоскости горизонта данного места, а образует с ней некоторый угол. Этот угол называется *магнитным наклоением* и часто обозначается буквой  $I$ . В разных местах Земли магнитное наклонение различно и изменяется от  $0^0$  на магнитном экваторе до  $90^0$  на магнитных полюсах.

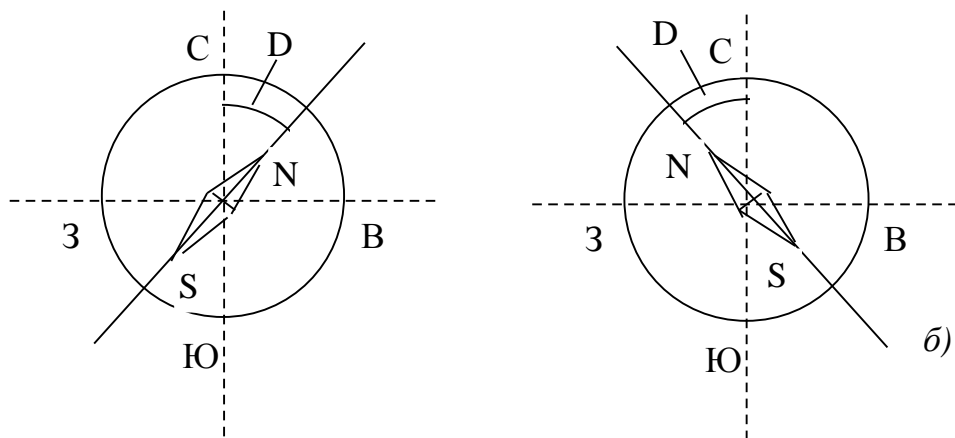


Рис.6. Положение магнитной стрелки относительно сторон света: а) в местах с восточным магнитным склонением «+», б) в местах с западным магнитным склонением «-»

Наглядное представление о направлении вектора магнитной индукции геомагнитного поля в данной местности можно получить, если укрепить магнитную стрелку так, чтобы она могла свободно двигаться и в вертикальной, и в горизонтальной плоскостях (кардановый подвес).

Стрелка установится по направлению вектора магнитной индукции поля Земли  $\vec{B}$ . Тогда горизонтальная составляющая  $B_H$  и вертикальная  $B_V$  связаны соотношениями (рис.5):

$$B = B_H / \cos I; \quad B_V = B \sin I; \quad B_V = B_H \cdot \operatorname{tg} I; \quad B^2 = B_H^2 + B_V^2. \quad (5)$$

Изменение величины  $B$  в разных точках Земли наблюдается в пределах от 70000 на полюсах до 45000 нТл на экваторе (1 нТл =  $10^{-9}$ Тл). В справочниках часто приводится величина напряженности магнитного поля, изменение которой составляет соответственно от 55,7 до 33,4 А/м или от 0,70 до 0,42 Э [4].

Таким образом три величины: магнитное склонение  $D$ , магнитное наклонение  $I$  и числовое значение горизонтальной составляющей индукции  $B_H$ , полностью характеризуют магнитное поле Земли в данном месте. Эти величины называются *элементами геомагнитного поля*:  $D, I, B_H$ .

Для Иркутска эти данные приведены в табл.2. Некоторые значения индукции магнитного поля, измеренные в различных природных или созданных человеком объектах и системах, представлены на рис.7 [5].

Переменное магнитное поле (~1%) на высотах от 3 до  $15R_3$  называется *магнитосферой*. Физические свойства, размер и форма этого поля определяются магнитным полем и его взаимодействием с потоком заряженных частиц от Солнца - солнечным ветром. Магнитосфера не сферична, она сильно вытянута в сторону от Солнца (рис.8). С дневной стороны поток плазмы солнечного ветра (в основном это протоны, скорость которых дос-



тигает 350-700 км/с , электроны, немного ядер гелия и др.) сжимает геомагнитное поле, искажая его дипольный характер. На ночной стороне силовые линии магнитного поля вытягиваются в протяженный магнитный хвост. Диаметр хвоста составляет  $\sim 40 R_3$ . Поля противоположных

тронная звезда

Таблица 1

Географические координаты магнитных полюсов и г, Иркутска		
Южный полюс	75 <sup>0</sup> ,6 с.ш.	101 <sup>0</sup> ю.д.
Северный полюс	66 <sup>0</sup> ,3 ю.ш.	141 <sup>0</sup> в.д.
г. Иркутск	52 <sup>0</sup> ,4 с.ш.	104 <sup>0</sup> в.д.

10<sup>6</sup>

10<sup>4</sup>

10<sup>2</sup>

Таблица 2

Элементы магнитного поля в Иркутске		
Угол магнитного склонения	$D$	-2 <sup>0</sup>
Угол магнитного наклона	$I$	71,4 <sup>0</sup>
Индукция магнитного поля горизонтальная	$B_H(H)$	19215 нТл ( $\gamma$ )
Индукция магнитного поля вертикальная	$B_V(Z)$	57047 нТл ( $\gamma$ )
Индукция магнитного поля полная	$B(T)$	60196 нТл ( $\gamma$ )

10<sup>0</sup>

10<sup>-2</sup>

10<sup>-4</sup>

10<sup>-6</sup>

10<sup>-8</sup>

10<sup>-10</sup>

Сверхпроводящий магнит

Поверхность Солнца

Поверхность Земли

Крабоподобная туманность

Поверхность Луны

Межгалактическое пространство

Примечания: значения  $D$  и  $B$  приведены на 1953 год, в скобках даны обозначения величин и единиц (1 нТл=1 $\gamma$ ), принятые в практике исследования геомагнитного поля [5].

Рис.7. Диапазон значений индукции магнитного поля во Вселенной.



направлений в магнитном хвосте разделяет слой, содержащий движущиеся заряженные частицы - токовый слой [4]. Вблизи магнитных полюсов Земли между линиями магнитного диполя и линиями, уходящими в хвост, образуются пространства, называемые полярными овалами, северным и южным, в которые проникают частицы солнечного ветра, вызывая полярные сияния. Во внутренних областях магнитосферы магнитное поле удерживает, как в магнитной ловушке, потоки быстрых заряженных частиц, образуя радиационные пояса Земли.

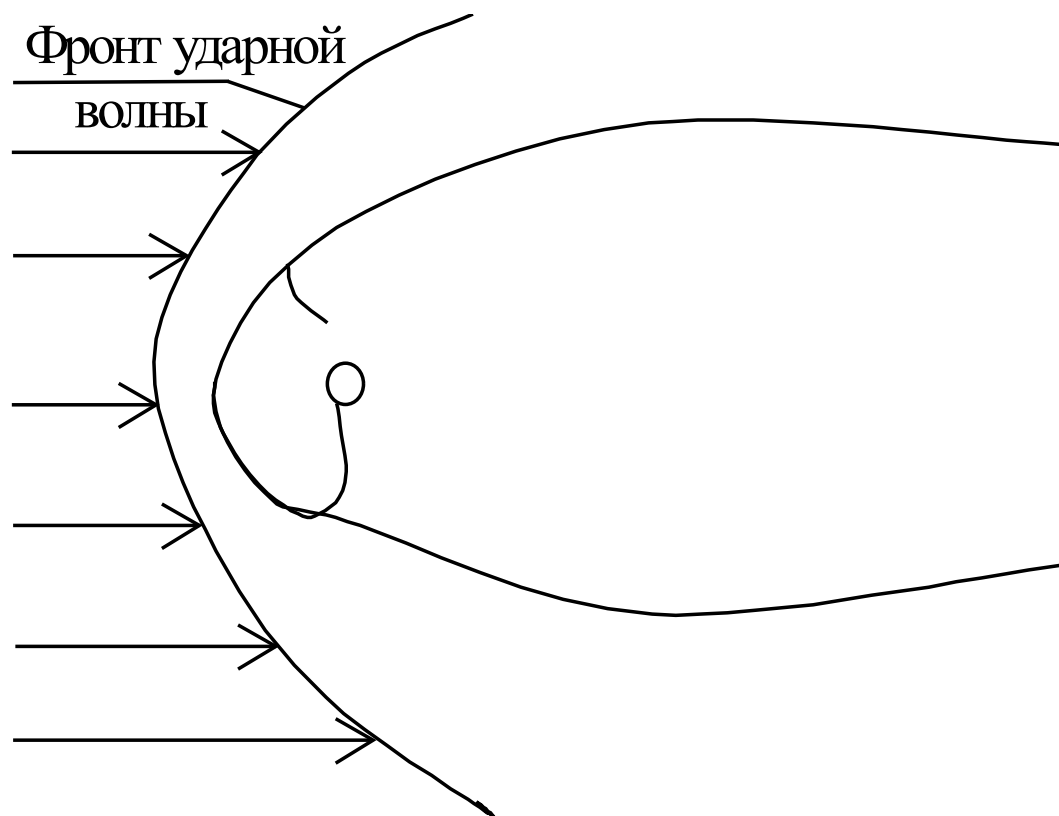


Рис.8. Магнитосфера Земли

Следует отметить, что земной магнетизм не является статическим, а медленно меняется со временем и испытывает вековые вариации. Измерения, проведенные с образцами магнитных материалов, добытых при археологических раскопках, свидетельствуют о том, что в различные геологические эпохи геомагнитное поле имело различную полярность. С периодом от сотни тысяч лет до десятков миллионов лет происходит переполюсовка основного магнитного поля Земли. Кроме того, установлено, что за последние

10-20 млн. лет полярность геомагнитного поля менялась каждые 300 тыс. лет.

Переменное магнитное поле Земли более неустойчиво. Наблюдаются периодические солнечно-суточные и лунно-суточные магнитные вариации. Кроме того, время от времени, магнитное поле Земли резко и сильно меняется, особенно в полярных областях, Это явление носит название «магнитных бурь». Периоды максимума магнитных бурь совпадают с периодами увеличения числа солнечных пятен (11,5 лет).

В период пятнообразования Солнце испускает мощные потоки заряженных частиц, которые в магнитном поле Земли отклоняются лоренцевой силой и достигают земной поверхности преимущественно в полярных областях. Попадая в верхние слои атмосферы (ионосферу), эти потоки заряженных частиц вызывают свечение - полярные сияния. Магнитное поле,

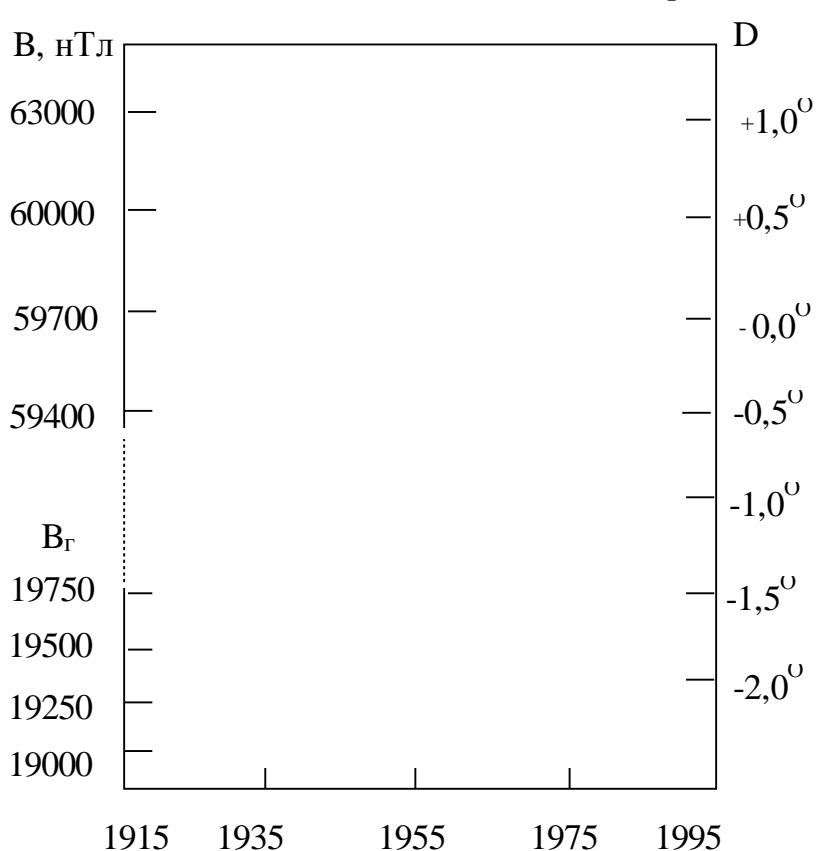


Рис.9. Вековой ход геомагнитных элементов г.Иркутска

создаваемое этими мощными электрическими токами, попадающими в ионосферу и является причиной магнитных бурь.

На Земле создано более 100 станций наблюдений за флуктуациями геомагнитного поля. Они передают информацию в Мировой Центр геомагнитных данных. Один из этих центров находится в Москве. Здесь информация обобщается и анализируется. На рис.9. приведены графики векового

изменения основных элементов геомагнитного поля за годы существования магнитной обсерватории вблизи Иркутска. Интересно отметить, что Иркутск расположен в такой точке Земли, где угол магнитного склонения  $D$  оказался близким к нулю ( $-1^{\circ} \div 2^{\circ}$ ).

### Описание установки и метода измерения $B_{\Gamma}$ .

Тангенс- гальванометр состоит из вертикального кольца радиуса  $R$ , содержащего  $\Pi$  витков проволоки (рис.10). В центре кольца помещена небольшая магнитная стрелка - компас, которая покоится на вертикальном острие и может вращаться в горизонтальной плоскости. Кольцо тангенс - гальванометра устанавливается при отсутствии в нем тока так, чтобы его плоскость совпадала с плоскостью магнитного меридиана. Направление  $B_{\Gamma}$  определяет стрелка компаса.

Если через обмотку тангенс- гальванометра пропустить ток  $I$ , то он создает магнитное поле, направленное в центре кольца перпендикулярно его плоскости и равное  $B_K$  в соответствии с (3).

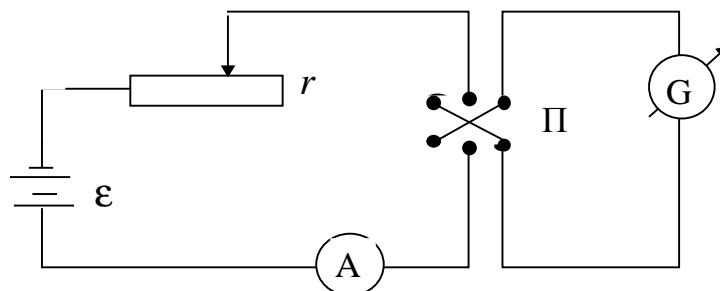
Стрелка тангенс- гальванометра, находясь одновременно в магнитном поле Земли и кругового тока, установится в направлении результирующего поля  $\vec{B}_{рез}$  под углом  $\alpha$  по направлению к плоскости магнитного меридиана.(рис.10). Из чертежа следует, что

Рис.10. Тангенс- гальванометр

$$B_{\Gamma} = \frac{B_K}{\operatorname{tg}\alpha}, \quad \text{тогда} \quad B_{\Gamma} = \frac{\mu_0 I n}{2R \operatorname{tg}\alpha}. \quad (6)$$

### Порядок выполнения работы

1. Составьте цепь по схеме , изображенной на рис.11. Здесь  $e$  - источник



постоянного напряжения на 3 В,  $r$  -реостат на 20-50 Ом для регулирования силы тока,  $\Pi$ - переключатель для изменения направления тока через тангенс-

Рис.11. Схема установки

гальванометр  $G$ ,  $A$  -амперметр на 1,5 А.

2. Установите плоскость кольца тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана, задаваемого направлением магнитной стрелки. Один конец ее при этом совмещают с нулевым делением лимба.

3. При полностью введенном в цепь сопротивлении  $R$  замкните ключом цепь.

4. Меняя сопротивление реостата  $R$ , пропустите такой ток через гальванометр, чтобы стрелка отклонилась примерно на 30-45 градусов. Запишите силу тока и соответствующий ей угол  $\alpha$  в табл.3.

5. С помощью переключателя П измените направление тока в гальванометре и вновь запишите показания угла  $\alpha$  в таблицу 3. Затем найдите среднее из них. Отсчеты углов при двух направлениях тока проводятся с целью исключения ошибки от неточности установки плоскости витков тангенс- гальванометра в плоскости магнитного меридиана.

6. Произведите измерение не менее 10 раз при различных значениях силы тока.

Результаты измерений

Таблица 3

№ n/n	$I_A$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_{cp}$	$B_r$	$\Delta B_{r_i} - \bar{B}_r$	$(\Delta B_{r_i})^2$
1							
2							
...							

7. Для каждого измерения рассчитайте значения  $B_r$  по формуле 6. Величины  $R$  и  $n$  указаны на установке .

8. Проведите расчет среднего значения  $B_r$  , средней квадратичной погрешности результата измерений и доверительного интервала.

9. По среднему значению  $B_r$  вычислите величину вектора магнитной индукции  $B$  геомагнитного поля в Иркутске и его вертикальную составляющую  $B_B$  по формулам (9), воспользовавшись значением угла магнитного наклона  $I$  (табл.1) , и сопоставьте с данными Иркутской магнитной обсерватории (рис.9 и табл.1).

### Контрольные вопросы

1. Магнитное поле. Чем оно создается, как изображается на чертеже? Изобразите на чертеже магнитное поле соленоида, кругового и линейного тока.
2. Поясните, как с помощью прямоугольной рамки с током определить направление и величину магнитного поля в данной точке.
3. Расскажите о характеристиках магнитного поля  $B$  и  $H$ , в каких единицах они измеряются.

4. Запишите и сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа. Примените его для вывода формулы индукции магнитного поля кругового тока.
5. Что представляет собой магнитное поле Земли, основное и переменное? Расскажите о причинах его существования, о магнитных полюсах Земли.
6. Назовите элементы земного магнетизма, охарактеризуйте их.
7. Устройство и принцип действия тангенс- гальванометра.

### **Использованная литература**

1. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Т.2. М.:АОЗТ «Шрайк», 1995, 480 с.
2. Грабовский Р.И. Курс физики. Учебное пособие. М.: Высш. Школа, 1980,607 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. Учебное пособие для вузов. М.:Наука, 1982, 496 с.
4. Земной магнетизм//Физический энциклопедический словарь. М.: Сов.энциклопедия, 1983, С.200, Магнитосфера,,Там же. С.386.
5. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленинград. Ун-та, 1964, 336 с.

*Алексеева Лариса Ивановна,  
Айданова Ольга Серафимовна,  
Паперный Виктор Львович*

## **Определение индукции магнитного поля**

Методические рекомендации

Подписано в печать . Формат 60X90 1/16.  
Бумага писчая. Печать офсетная. Гарнитура Times.  
Усл.печ.л. 0,8.Уч.-изд. л. 0,7. Тираж 50 экз. План 1999г. Поз.

Редакционно- издательский отдел  
Иркутского государственного университета  
664003, Иркутск, б. Гагарина,36