

15

Система компенсации магнитного поля Баксанского большого нейтринного телескопа

© А.Д. Луканов, А.А. Будзинская, Д.М. Воронин, В.Н. Гаврин, Д.С. Гурский, Т.В. Ибрагимова, Б.К. Лубсандоржиев, С.Б. Лубсандоржиев, Д.А. Нанзанов, А.Ю. Сидоренков, Н.А. Ушаков, А.Н. Фазлиахметов, А.А. Шихин

Институт ядерных исследований РАН,
108840 Троицк, Москва, Россия
e-mail: arslanlukanov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 марта 2025 г.
В окончательной редакции 4 июня 2025 г.
Принято к публикации 9 июня 2025 г.

Представлена система компенсации магнитного поля Земли, разработанная для Баксанского большого нейтринного телескопа. Система основана на использовании катушек Гельмгольца. Компенсационное магнитное поле создается в цилиндре высотой 32 м и радиусом 15.5 м. По результатам расчетов остаточное магнитное поле составляет 0.05 Г. Описан алгоритм расчета магнитной индукции, создаваемой катушками. Рассмотрены основные параметры катушек, а также проведен расчет нагрева проводников для разработанной системы компенсации магнитного поля.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, кольца Гельмгольца, фотоэлектронный умножитель.

DOI: 10.61011/JTF.2025.11.61609.30-25

Введение

Баксанский большой нейтринный телескоп (ББНТ) разрабатывается в Баксанской Нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (БНО ИЯИ РАН) на Северном Кавказе. Детектор будет представлять собой комплексную конструкцию с трехзонной структурой. Центральную зону предполагается выполнить в виде акриловой сферы радиусом 14 м, заполненной жидким сцинтиллятором на основе линейного алкилбензола (ЛАБ) массой 10 kt. Окружающая центральную зону буферная область будет заполнена несцинтиллирующей органической жидкостью для подавления фона от материалов детектора, внешняя зона детектора будет заполнена водой [1].

На данный момент первый детектор с массой мишени 0.5 тонн запущен в работу и полностью функционирует. Конструкция детектора состоит из двух зон. Центральная зона представляет собой акриловую сферу с внутренним радиусом 0.48 м, заполненную жидким сцинтиллятором на основе ЛАБ. Сфера просматривается двадцатью 10-дюймовыми фотоэлектронными умножителями (ФЭУ, РМТ) Hamamatsu R7081-100 WA-S70, которые установлены на стальном каркасе вокруг сферы. Акриловая сфера расположена в резервуаре из полипропилена, который заполнен сверхчистой водой для защиты от внешней радиоактивности. Толщина водного слоя составляет 70 см.

Второй прототип детектора с массой мишени 5 т находится на стадии сборки. Детектор также состоит из двух зон. Акриловая сфера, заполненная жидким сцинтиллятором, имеет увеличенный до 1.1 м радиус. Высота водного резервуара составляет 4 м, радиус — 2 м, толщина водного слоя — 0.9 м. Сорок

два 10-дюймовых ФЭУ Hamamatsu R7081-100 WA-S70 просматривают акриловую сферу. Также в конструкцию детектора были добавлены двенадцать 8-дюймовых ФЭУ Hamamatsu R5912-100 WA-S70, которые используются в системе мюонного вето. Для прототипа была разработана система компенсации магнитного поля, в которой используются катушки Гельмгольца. Для компенсации вертикальной компоненты используются 5 катушек с десятью витками в каждой, для горизонтальной — 12 колец с семью витками, сила тока во всех катушках составляет 2 А.

1. Методы компенсации магнитного поля

Значения естественного магнитного поля Земли варьируются в диапазоне от 0.25 до 0.65 Г, поля даже таких малых значений оказывают влияние на параметры фотоэлектронных умножителей, поэтому компенсация магнитного поля является необходимостью.

Существует два основных метода компенсации магнитного поля: пассивный и активный. Пассивный метод компенсации магнитного поля основан на использовании специальных экранов, сделанных из материалов с высокой магнитной проницаемостью, таких как пермаллои. Принцип действия таких экранов заключается в следующем: при переходе в среду с магнитной проницаемостью много большей, чем проницаемость внешней среды, линии магнитной индукции внешнего поля сгущаются, таким образом, магнитное поле внутри экранированной листами пермаллоя области пространства становится ослабленным. Пассивный метод требует сложной кон-

структурции экрана, обеспечивающей максимально равномерное и непрерывное распределение материала вокруг каждого ФЭУ.

Активный метод заключается в использовании специальных катушек Гельмгольца, которые создают дополнительное компенсационное магнитное поле, это компенсационное поле направлено противоположно к внешнему магнитному полю и в результате суммарное магнитное поле равняется нулю. Преимуществом активного метода является возможность эффективной компенсации магнитного поля больших значений и в большом объеме. Кроме того, такой метод позволяет лучше контролировать компенсационное поле в зависимости от изменений внешних условий.

Также в [2] описан метод, в котором уменьшение влияния магнитного поля на параметры фотоумножителя достигается путем поворота ФЭУ так, чтобы направление линий магнитного поля приходилось на наименее чувствительную ось ФЭУ.

2. Параметры катушек Гельмгольца

Основными характеристиками магнитного поля Земли являются полный вектор напряженности и его составляющие по осям координат. Величина внешнего магнитного поля, помимо магнитного поля Земли, зависит от геологических условий территории и объектов, непосредственно находящихся в месте измерения поля.

Магнитное поле, создаваемое током, можно вычислить как векторную сумму полей, создаваемых каждым элементарным участком тока [3]. Согласно закону Био–Савара–Лапласа, элемент тока длины $d\mathbf{l}$ создает магнитное поле с индукцией

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\mathbf{l}, r]}{r^3},$$

где μ_0 — магнитная постоянная; I — сила тока; $d\mathbf{l}$ — элемент тока, для которого рассчитывается индукция; r — радиус-вектор в точку наблюдения.

Кольца Гельмгольца — система идентичных катушек, расположенных соосно на расстоянии, равном их радиусу. В центре между катушками наблюдается зона однородного магнитного поля, величина которого рассчитывается по формуле

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n I}{R},$$

где n — количество витков в катушках; I — сила тока; R — радиус катушек и расстояние между ними.

Для расчета создаваемого магнитного поля катушками квадратной формы используется формула

$$B = 1.01796 \frac{2\mu_0 n I}{\pi A},$$

где A — половина длины стороны катушки.

3. Измерение магнитного поля

Для измерения индукции магнитного поля был создан модуль на основе микропроцессора Arduino и трехосевого магнитометра HMC5883L. В основе данного магнитометра лежат три магниторезистивных датчика. Разработанный модуль способен проводить измерения магнитной индукции величиной до $B = 8$ Г, чувствительность магнитометра составляет 5 мГ, что является избыточным для проводимых измерений магнитной индукции.

На практике измеренные значения магнитного поля включают в себя магнитные поля соседних источников. Основными источниками помех являются hard-iron- и soft-iron-искажения, которые получили свое название от магнитотвердых и магнитомягких ферромагнетиков. Магнитотвердые источники представляют собой магниты или другие источники постоянного магнитного поля, которые врачаются вместе с магнитометром и вносят постоянный вклад в его показания. Магнитомягкие ферромагнетики намагничиваются в магнитном поле Земли и становятся источниками магнитного поля, которое изменяется в зависимости от положения ферромагнетика в пространстве. Они вносят свой вклад в изменение направления вектора магнитной индукции. Таким образом, для получения корректных данных магнитометра его необходимо откалибровать. Уравнение для вычисления откалиброванных значений магнитной индукции выглядит следующим образом:

$$\mathbf{B}_{calib} = S \cdot (\mathbf{B}_{meas} - \mathbf{H}),$$

где \mathbf{B}_{calib} — значения магнитного поля после калибровки; S — коэффициенты, ответственные за soft-iron-искажения; \mathbf{B}_{meas} — значения магнитного поля до калибровки; \mathbf{H} — коэффициенты, ответственные за hard-iron-искажения.

Для проведения калибровки необходимо получить набор неоткалиброванных значений при разных положениях магнитометра. Затем вычислить калибровочные коэффициенты для каждой оси. Искажения от магнитотвердых ферромагнетиков вносят некоторое постоянное смещение измеряемым значениям. Поправки для этих искажений вычисляются по формуле

$$H_A = \frac{A_{min} - A_{max}}{2} - A_{min},$$

где A_{min} и A_{max} — минимальное и максимальное значения магнитного поля для каждой оси.

Коэффициенты для устранения влияния soft-iron-искажений вычисляются по формуле

$$S_A = \frac{B_{max} - B_{min}}{A_{max} - A_{min}},$$

где B_{max} и B_{min} — максимальное и минимальное значения магнитного поля для той оси, где разница между этими значениями наибольшая; A_{max} и A_{min} — максимальное и минимальное значения магнитного поля для оси A .

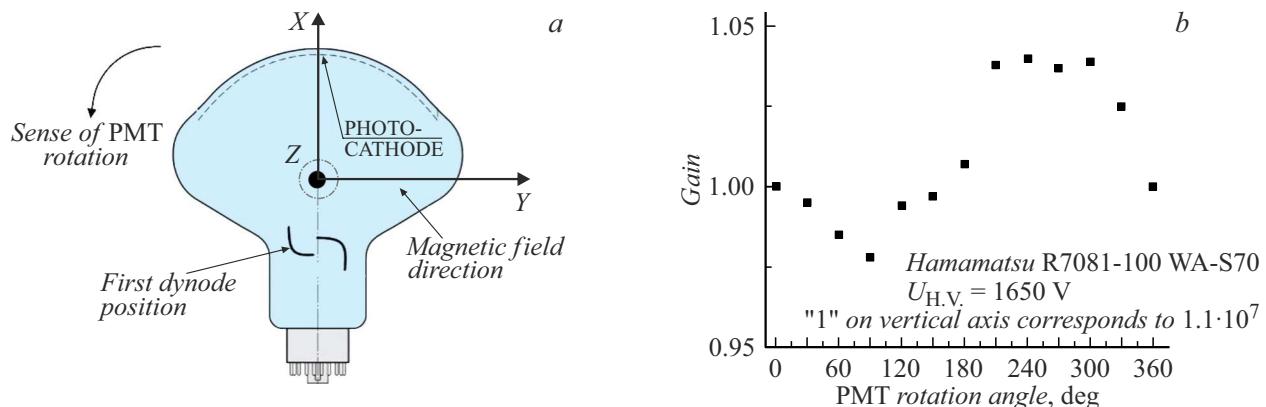


Рис. 1. Влияние магнитного поля Земли на коэффициент усиления ФЭУ: *a* — положение ФЭУ, вид сверху, *b* — зависимость усиления от угла поворота ФЭУ в естественном магнитном поле Земли.

4. Исследование влияния магнитного поля на параметры фотоумножителей

Исследования влияния магнитного поля на параметры фотоумножителей проводились во многих работах. Например, в [4] проводились измерения, в которых исследовались параметры фотоумножителей в зависимости от их положения в магнитном поле Земли. В [5] проводится моделирование магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца, а также влияния остаточного магнитного поля на параметры фотоумножителей в зависимости от их расположения в объеме моделируемого детектора.

Исследование влияния магнитного поля проводилось для ФЭУ Hamamatsu R7081-100 WA-S70, которые используются в прототипе с массой мишени 5 т [6]. Измерения проводились в два этапа: первый этап включал в себя изучение зависимости коэффициента усиления ФЭУ от естественного магнитного поля Земли. Фотоумножитель располагается горизонтально на поворотной платформе, засветка фотокатода устанавливается на таком уровне, чтобы большинство событий приходились на однофотоэлектронные импульсы ФЭУ. Данный уровень засветки достигается при величине среднего пуассоновского $\lambda_1 = 0.1$, тогда около 95 % всех событий будут приходиться на однофотоэлектронные импульсы ФЭУ. Расстояние между оптоволоконным кабелем и фотокатодом составляет 70 см. Платформа вращалась вокруг своей оси против часовой стрелки с шагом 30°. Фотоумножитель располагается таким образом, чтобы поверхность первого динода была ориентирована параллельно вертикальной компоненте магнитного поля B_z . На рис. 1, *a* показано начальное положение ФЭУ относительно магнитного поля Земли, а также направление вращения ФЭУ в процессе измерений. Величина магнитного поля в начальной точке составила: $B_x = 0.08 \text{ G}$, $B_y = -0.22 \text{ G}$, $B_z = 0.43 \text{ G}$. По результатам измерений были получены коэффициенты усиления фотоумножителя для каждого угла поворота (рис. 1, *b*). Разброс

коэффициента усиления ФЭУ в процессе измерений составил приблизительно 7 %.

На втором этапе проводились исследования зависимости коэффициента усиления и времени пролета фотоэлектронов от изменения магнитного поля. С этой целью был создан измерительный стенд, в котором магнитное поле создается катушками Гельмгольца квадратной формы (рис. 2). Исходя из размеров области, в которой необходимо компенсировать магнитное поле, были подобраны размеры и параметры катушек для создания однородного поля, а также были построены карты магнитной индукции, создаваемой катушками. Как видно из рис. 2, однородное поле создается в области между катушками при расстоянии между ними $L = 0.54A$, где A — длина стороны катушки. По результатам расчетов были созданы три пары катушек Гельмгольца для компенсации всех трех компонент магнитного поля. Для создания поля вдоль горизонтальных компонент магнитной индукции количество витков в катушках составляет $N = 5$, для вертикальной компоненты — $N = 6$. Область однородного поля представляет собой куб размерами $54 \times 54 \times 54$ см. Каждая пара катушек подключается к индивидуальному источнику тока, что обеспечивает независимое использование каждой пары катушек.

В процессе измерений ФЭУ находится в одном положении, перпендикулярном трем компонентам магнитной индукции, каждая из которых поочередно изменяется от -0.5 до 0.5 G с шагом 0.1 G , а две другие в этот момент компенсированы. По результатам проведенных измерений были построены зависимости коэффициента усиления ФЭУ и отношения Пик/Долина (P/V) от изменения значений магнитной индукции каждой отдельной компоненты (рис. 3). Значение P/V представляет собой отношение количества событий в пике зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов к количеству событий в минимуме между пьедесталом и пиком. Для горизонтальной компоненты B_y изменение коэффициента усиления достигает величины около 20 %, отноше-

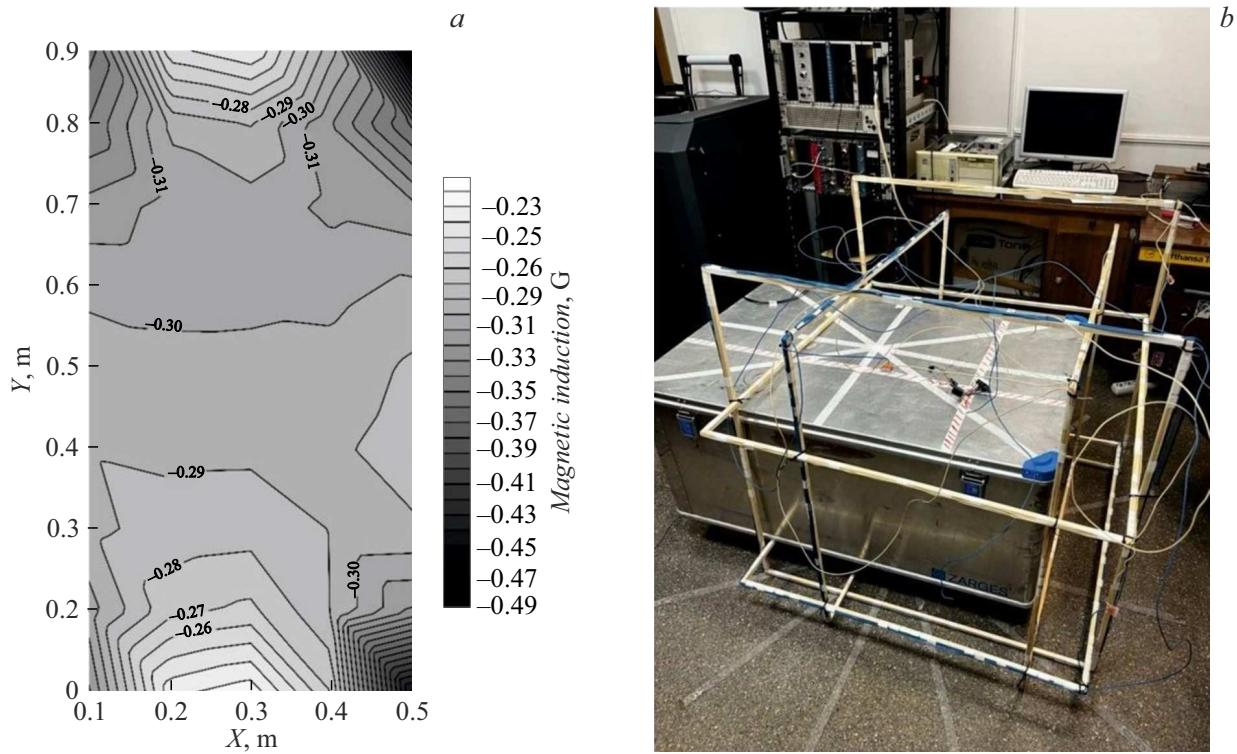


Рис. 2. Карта магнитной индукции, создаваемой катушками Гельмгольца (а); стенд для исследования влияния магнитного поля на параметры ФЭУ (б).

ние Р/V уменьшается приблизительно в два раза при значении поля $B_X = 0.5$ G. Наименее чувствительной осью ФЭУ является ось BX, направленная вдоль траектории полета фотоэлектронов, изменение усиления достигает приблизительно 5 %, а отношение Р/V уменьшается приблизительно в 1.3 раза. Самой чувствительной является ось, направленная вдоль поверхности первого динода, которая в процессе измерений соответствует вертикальной компоненте магнитного поля. Коэффициент усиления ФЭУ изменяется приблизительно на 22 %, а отношение Р/V уменьшается почти в 4 раза.

Также проводились исследования влияния магнитного поля на время пролета фотоэлектронов по методике, описанной выше: одна из компонент изменялась от -0.5 до 0.5 G, в то время как другие две компоненты полностью компенсировались. Засветка фотокатода устанавливается на таком уровне, чтобы большинство событий приходились на однофотоэлектронные импульсы ФЭУ. Наименее чувствительной является продольная ось ФЭУ B_x , ширина на полувысоте распределения времени пролета фотоэлектронов варьируется от 2.2 до 2.5 ns, в то время как при изменении горизонтальной компоненты B_y ширина на полувысоте (разница между максимальным и минимальным значением времени, взятыми на уровне, равном половине количества событий в пике) лежит в диапазоне 2–5 ns. При изменении последней компоненты

B_z ширина на полувысоте изменяется от 2 до 2.8 ns (рис. 4).

Таким образом, магнитное поле даже таких малых значений, как 0.1 G, влияет на параметры ФЭУ, поэтому необходимо использовать средства для компенсации магнитного поля. Для подтверждения корректности работы системы компенсации магнитного поля были проведены сравнения влияния естественного магнитного поля и его отдельных компонент — X и Y . Для учета влияния вертикальной составляющей магнитного поля коэффициент усиления ФЭУ был нормирован на значение вертикальной компоненты $B_z = 0.4$ G и составил $1.07 \cdot 10^7$. При вращении фотоумножителя горизонтальная составляющая естественного магнитного поля изменялась от -0.234 до 0.234 G относительно поперечных осей ФЭУ, что привело к изменению коэффициента усиления на 7 %. Изменение компоненты BX в диапазоне от -0.2 до 0.2 G привело к изменению коэффициента усиления от $1.01 \cdot 10^7$ до $1.07 \cdot 10^7$, что соответствует относительному изменению на 5 %. Для компоненты BY в том же диапазоне изменение коэффициента усиления составило от $1.056 \cdot 10^7$ до $1.07 \cdot 10^7$, что соответствует изменению на 1.3 %. Таким образом, наблюдаемое изменение коэффициента усиления при варьировании естественного и искусственно созданного магнитных полей оказывается сопоставимым, что подтверждает корректность работы системы компенсации.

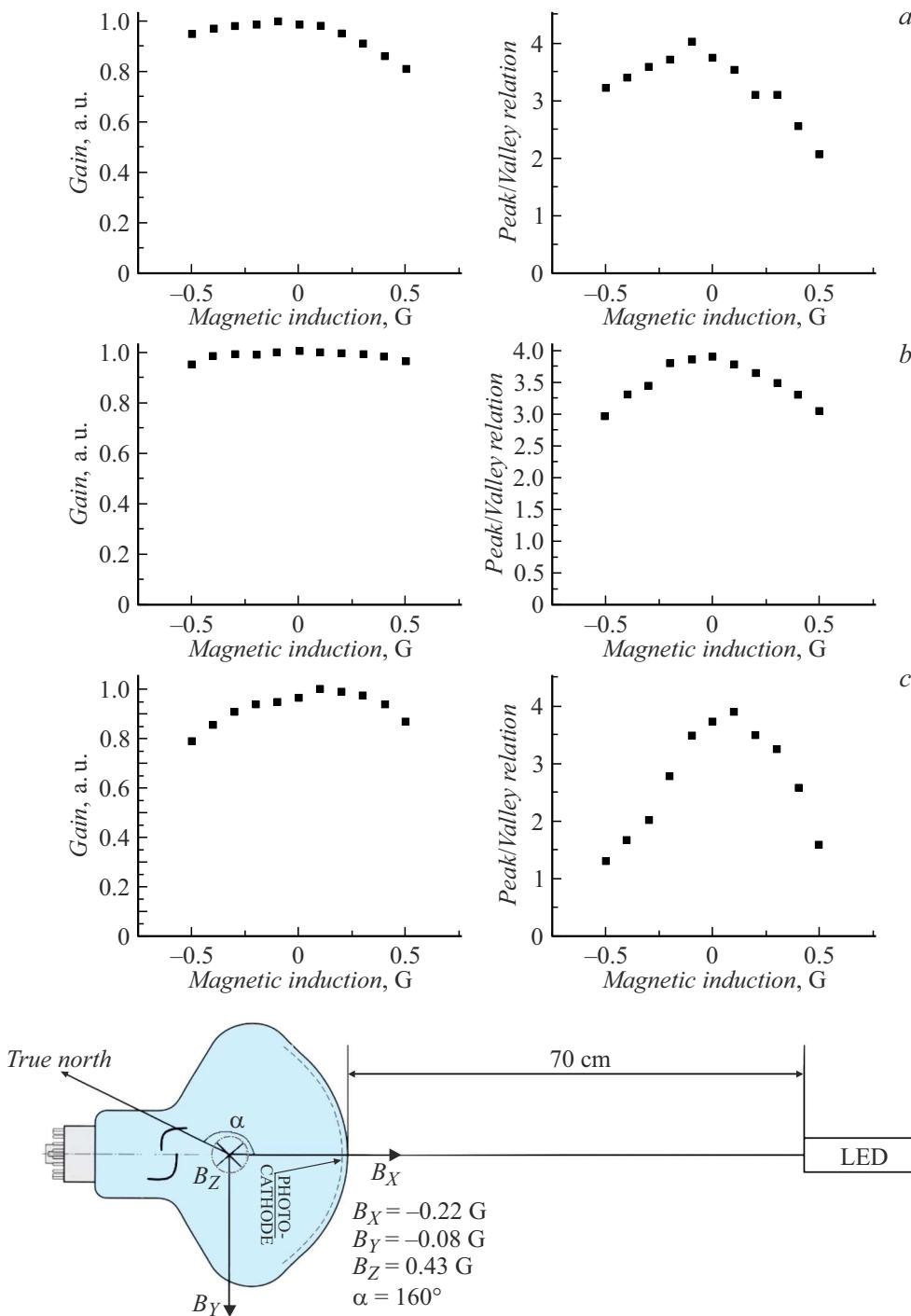


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления и отношения Р/В при однофотоэлектронной засветке фотокатода от изменения индукции магнитного поля: *a* — вдоль компоненты *X*; *b* — вдоль компоненты *Y*; *c* — вдоль компоненты *Z*.

5. Расчет параметров колец Гельмгольца и создаваемого ими поля для ББНТ

Согласно международной аналитической модели геомагнитного поля (IGRF-13) [7], значения компонент полного вектора магнитного поля Земли в области расположения прототипа ББНТ составляют: $B_X = 0.23$ Г, $B_Y = 0.03$ Г, $B_Z = 0.44$ Г. С целью уменьшения фона гамма-излучения, исходящего от окружающих пород, стены главного зала лаборатории Галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) обшиты стальными листами, которые искажают магнитное поле. С учетом данных искажений, а также свойств окружающих горных пород, были проведены дополнительные измерения магнитного поля для точного определения его параметров

$B_Y = 0.03$ Г, $B_Z = 0.44$ Г. С целью уменьшения фона гамма-излучения, исходящего от окружающих пород, стены главного зала лаборатории Галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) обшиты стальными листами, которые искажают магнитное поле. С учетом данных искажений, а также свойств окружающих горных пород, были проведены дополнительные измерения магнитного поля для точного определения его параметров

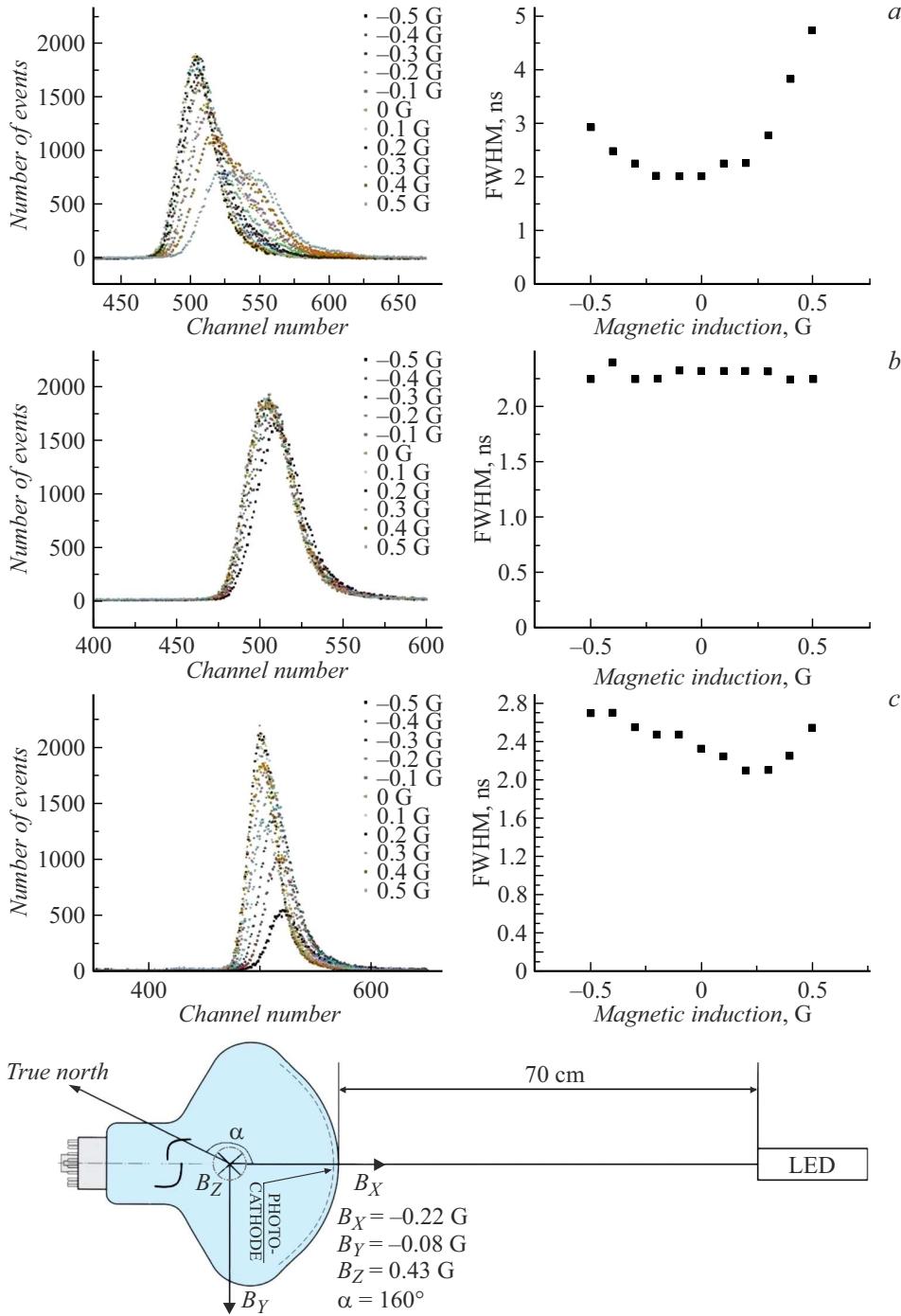


Рис. 4. Зависимость распределений времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода от изменения индукции магнитного поля: *a* — вдоль компоненты *X*; *b* — вдоль компоненты *Y*; *c* — вдоль компоненты *Z*.

в месте установки детектора. Полученные измеренные значения отличались от расчетных: $B_X = 0.15 \text{ G}$, $B_Y = -0.22 \text{ G}$, $B_Z = 0.25 \text{ G}$, при этом горизонтальная компонента составила $H = 0.26 \text{ G}$ [8].

Для расчета параметров и конфигурации системы компенсации магнитного поля Земли для ББНТ был взят цилиндр высотой 32 м и радиусом 15.5 м. Для компенсации вертикальной компоненты будут использоваться 3 кольца с десятью витками в каждом, которые распо-

лагаются в горизонтальных плоскостях вокруг детектора с расстоянием между кольцами 16 м. Компенсация горизонтальной компоненты достигается с помощью 12 колец с семью витками в каждом. Эти катушки располагаются в вертикальных плоскостях вокруг вертикальной оси детектора. Угол между катушками составляет 30°.

Перед вычислением магнитной индукции создается набор точек пространства, в котором необходимо компенсировать магнитное поле. При расчете создаваемого

поля катушки разбиваются на малые элементы, для каждого из которых рассчитывается магнитная индукция в выбранной точке пространства, затем в этой точке вычисляется векторная сумма магнитной индукции от всех элементов катушек. В результате проведенных расчетов были построены карты магнитной индукции для вертикальных и горизонтальных компонент (рис. 5–7). Катушки, предназначенные для компенсации горизонтальной компоненты, создают однородное поле во всем объеме. При использовании 12 колец с семью витками в каждом создается однородное магнитное поле горизонтальной компоненты H величиной 0.25 Гц при силе тока 24 А. Катушки, предназначенные для компенсации вертикальной компоненты B_Z , также создают однородное магнитное поле вдоль вертикальной оси с величиной

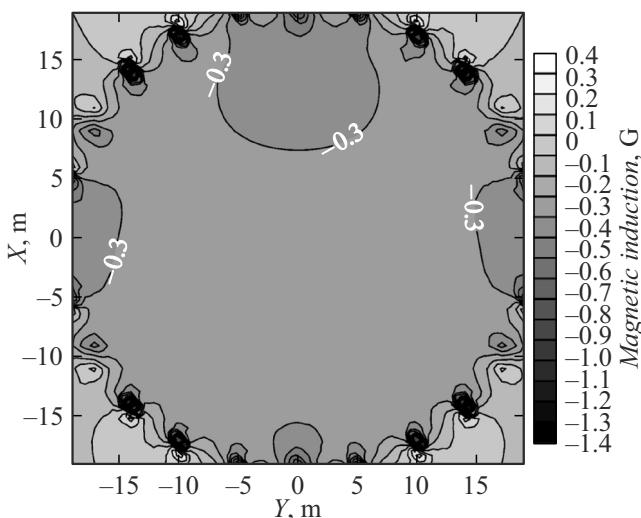


Рис. 5. Карта магнитной индукции, создаваемой катушками в направлении оси X .

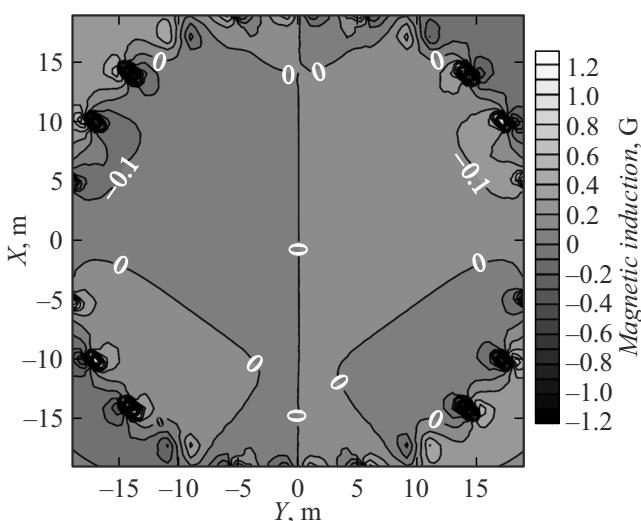


Рис. 6. Карта магнитной индукции, создаваемой катушками в направлении оси Y .

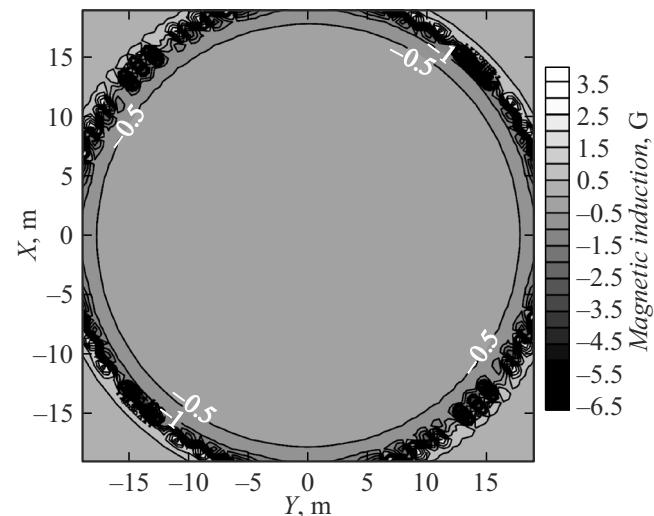


Рис. 7. Карта магнитной индукции, создаваемой катушками в направлении оси Z .



Рис. 8. Общий вид детектора.

0.25 Гц. В данном случае используются 3 кольца по 10 витков при силе тока 40 А.

Общий вид детектора показан на рис. 8.

6. Расчет нагрева проводников системы компенсации магнитного поля

Одним из ограничивающих критериев использования активного метода компенсации является тепловыделение катушек Гельмгольца, которое будет уходить на нагрев окружающей среды. Поэтому необходимо определить общий тепловой поток, при котором наступает равновесие системы проводник–среда, и дальнейшего нагрева окружающей среды не происходит. После определения равновесного теплового потока можно определить максимальный допустимый ток для системы компенсации магнитного поля.

Согласно закону Джоуля–Ленца, количество тепла, выделившееся в проводнике, пропорционально сопротивлению, квадрату силы тока и промежутку времени:

$$Q = I^2 R t.$$

В зависимости от интенсивности движения флюида выделяют два основных режима движения: ламинарный и турбулентный.

Алгоритм расчета нагрева проводника заключается в определении вида конвективного теплообмена и объекта, для которого рассчитывается теплообмен, введении определяющих параметров, определении режима течения флюида, расчете коэффициента теплоотдачи и нахождения коэффициента конвективной теплоотдачи [9].

В данном случае для расчета теплообмена между кольцами и средой принимается свободная конвекция. Тогда безразмерный коэффициент теплоотдачи (критерий Нуссельта, N_u) зависит от произведения критериев Грасгофа (Gr) и Прандтля (Pr) (критерий Рэлея (Ra)). Критерий Gr вычисляется по формуле

$$Gr = \frac{g R_0^3}{\nu^2} \beta \Delta T,$$

$$Pr = \frac{\nu}{a},$$

где R_0^3 — определяющий размер, [м]; β — коэффициент объемного расширения, [1/К]; a — кинематический коэффициент вязкости, [м²/с]; ΔT — разность температур; a — коэффициент температуропроводности.

Для вертикальных колец расчет проводился для вертикальной и горизонтальной частей раздельно. Для вертикальной части значение критерия Ra составляет $Ra = 396.7 \cdot 10^{10}$, для горизонтальной $Ra = 3967$ при перегреве окружающего объема на 1 °C. Таким образом, формула расчета критерия Nu для вертикального участка будет иметь вид

$$Nu = 0.15 Ra^{0.333} \varepsilon_t,$$

для горизонтального —

$$Nu = 0.5 Ra^{0.25} \varepsilon_t,$$

где ε_t — температурная поправка, которая для простоты расчетов была принята равной единице. Значение критерия Nu для вертикального участка равно 2351.68, для горизонтального — 3.97. Следующим шагом является расчет коэффициента теплоотдачи по формуле

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{R_0},$$

где λ — коэффициент теплопроводности, [W/(м·°C)]. Величина теплового потока, теряемая в окружающую среду, определяется по формуле:

$$Q = \alpha \Delta T F,$$

где F — площадь поверхности проводника, [м²]. Тепловой поток, теряемый вертикальным участком, равен 122.2 W, горизонтальным — 225.9 W. Общий тепловой поток для вертикальных колец равен 58480.8 W. Тепловой поток, теряемый горизонтальными кольцами, равен

21291 W. Тогда максимальный допустимый ток, протекающий в проводнике, можно рассчитать по формуле

$$I = \sqrt{\frac{Q}{R}},$$

где R — сопротивление проводника. Максимальный допустимый ток по результатам вычислений составляет 127.9 A, что превышает в три раза ток, при котором будет использоваться система компенсации магнитного поля для ББНТ. Таким образом, при использовании катушек Гельмгольца для компенсации магнитного поля Земли нагрев окружающего объема не будет превышать 1 °C.

Заключение

Была разработана система компенсации магнитного поля Земли для ББНТ. В ходе работы был рассмотрен активный метод компенсации магнитного поля, разработан алгоритм для расчета компенсационного магнитного поля, подбора параметров катушек Гельмгольца, а также проведен расчет нагрева этих катушек. Применение активного метода компенсации магнитного поля позволяет создавать однородное магнитное поле в большом объеме пространства как для горизонтальной, так и для вертикальной компонент отдельно. За основу расчетов был взят цилиндр высотой 32 m и радиусом 15.5 m. Как показывают результаты расчетов, остаточное магнитное поле в требуемом объеме находится на уровне 0.05 G, которое не оказывает влияния на ФЭУ. Кроме того, данный подход позволяет исследовать воздействие магнитного поля различной амплитуды на ФЭУ. В рамках работы был собран магнитометр, проведены измерения магнитного поля в месте расположения детектора, был разработан стенд для исследования влияния магнитного поля на параметры фотоумножителей. Также исследованы зависимости коэффициента усиления ФЭУ и отношения P/V от изменения магнитной индукции.

Таким образом, применение колец Гельмгольца представляет собой эффективный метод для формирования однородного магнитного поля, который можно применять для компенсации поля Земли. В отличие от использования материалов с высокой магнитной проницаемостью данный метод является более доступным с точки зрения стоимости и более простым в реализации.

Финансирование работы

Поддержано Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта „Наука“, № 075-15-2024-541.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N.A. Ushakov, A.N. Fazliakhmetov, A.M. Gangapshev, V.N. Gavrin, T.V. Ibragimova, M.M. Kochkarov, V.V. Kazalov, D.Yu. Kudrin, V.V. Kuzminov, B.K. Lubsandorzhiev, A.D. Lukyanov, Yu.M. Malyshkin, G.Ya. Novikova, V.B. Petkov, A.A. Shikhin, A.Yu. Sidorenkov, E.P. Veretennikin, D.M. Voronin, E.A. Yanovich. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1787, 012037 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1787/1/012037
- [2] A. Ianni, G. Korga, G. Ranucci, O. Smirnov, A. Sotnikov. *Compensating the influence of the Earth's Magnetic Field on the scintillator detector resolutions by PMTs orientation*. LNGS preprint INFN/TC-00/05, 2000. DOI: 10.15161/oar.it/1448986128.29
- [3] И.В. Савельев. *Курс общей физики, том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика*: учебн. пособие (Наука. Глав. ред. Физматлит, М., 1982), 2-е изд., перераб.
- [4] E. Leonora, S. Aiello, G. Leotta. *IEEE Transactions on Nucl. Sci.*, **59** (4), 1259 (2012). DOI: 10.1109/ANIMMA.2011.6172838
- [5] S.R. Cabo, Ya. Nishimura, S.L. Suárez Gómez, L. Bonavera, M.L. Sánchez, J.D. Santos, F.J. de Cos. *Optimization of geomagnetic shielding based on detection efficiency*. arXiv preprint arXiv:2503.14380. (2025), DOI: 10.48550/arXiv.2503.14380
- [6] N. Ushakov, A. Fazliakhmetov, V. Gavrin, T. Ibragimova, B. Lubsandorzhiev, A. Lukyanov, A. Shikhin, A. Sidorenkov, D. Voronin. *Evaluation of large area photomultipliers for use in a new Baksan Large Neutrino Telescope project*. PoS(ICRC2021)1101. DOI: 10.22323/1.395.1101
- [7] Электронный ресурс. Режим доступа:
<http://serv.izmiran.ru/webff/igrf-13gm.html>
- [8] A.D. Lukyanov, D.M. Voronin, A.N. Fazliakhmetov, E.P. Veretynkin, A.M. Gangapshev, V.N. Gavrin, T.V. Ibragimova, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, B.K. Lubsandorzhiev, Yu.M. Malyshkin, D.A. Nanzanov, G.Ya. Novikova, V.B. Petkov, A.Yu. Sidorenkov, O.Yu. Smirnov, N.A. Ushakov, A.A. Shikhin, E.A. Yanovich. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **87**, 929 (2023).
- [9] В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. *Теплонаправления* (Энергия, М., 1975)