



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»**

Препринт 2018–2

В.Н. Алферов, Д.А. Васильев, В.Ф. Головкин, П.П. Коробчук,
А.В. Лутчев, В.Х. Маляев, В.Н. Рядовилов, В.А. Соловьев,
В.Н. Федорченко, А.Н. Холкин

Измерение магнитного поля установки СВД-2

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2018

Аннотация

Алферов В.Н. и др. Измерение магнитного поля установки СВД-2: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2018-2. – Протвино, 2018. – 21 с., 20 рис., библиогр.: 7.

Приведено описание разработанной в ИФВЭ системы измерения магнитного поля большого объема, которая была использована для измерения магнитного поля экспериментальной установки СВД ускорительного комплекса У-70. Приведены параметры системы и результаты измерений.

Abstract

Alferov V. et al. The magnetic field measuring of SVD-2 setup: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2018-2. – Protvino, 2018. – p. 21, figs. 20, refs.: 7.

The magnetic field measuring system was constructed at IHEP for a large volume and used to measure the magnetic field of SVD setup at the accelerator complex U-70. The system parameters and measurement results are presented.

Введение

Основными целями экспериментов, выполняемых в настоящее время на установке Спектрометр с вершинным детектором (СВД) [1] на ускорительном комплексе ГНЦ ИФВЭ, являются исследования рождения очарованных частиц [2] и изучение многочастичных процессов [3]. С результатами экспериментальных исследований, полученными на установке к настоящему времени, можно ознакомиться на сайте ИФВЭ [4].

Установка СВД расположена на 22 канале ускорителя У-70 и может экспонироваться в пучках заряженных частиц и ионов ^{12}C в широком диапазоне их импульсов. В качестве спектрометрического магнита установки используется широко-апертурный магнит М-7. На рис. 1 приведена схема установки. Ось Z системы координат установки направлена по движению частиц первичного пучка и параллельно плоскости нижней полюсной обмотки. Ось Y направлена вертикально снизу вверх по нормали к этой плоскости. Ось X направлена так, чтобы получилась правая система координат. Центр ярма спектрометрического магнита М-7 принимается за начало декартовой системы координат (правой тройки XYZ) спектрометра.

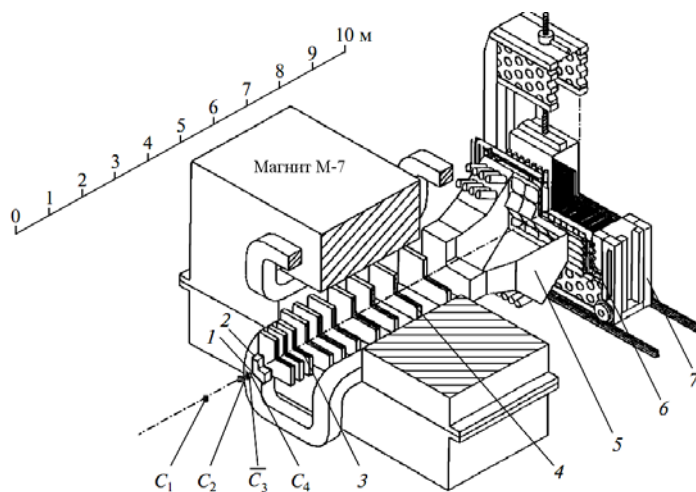


Рис. 1. Схема установки СВД: 1- мишень (М); 2- вершинный детектор (ВД); 3 – дрейфовые трубки (ДТ); 4 – пропорциональные камеры (ПК); 5- черенковский счетчик (ЧС); 6- сцинтилляционный годоскоп (СГ); 7- детектор гамма-квантов (ДЕГА); $C_1 - C_4$ – счетчики триггерной системы.

В процедуре восстановления импульса частиц используются координатные детекторы, расположенные сразу за мишенью в магнитном поле. Карта магнитного поля необходима также для прослеживания траектории заряженной частицы в черенковский счетчик, сцинтилляционный годоскоп и детектор гамма-квантов.

Выполненные в 1990 году измерения магнитного поля установки [5] не отвечают современным потребностям текущих экспериментов. В составе установки появились металлические конструкции (экран для экранировки фотоумножителей ЧС и т.п.), которых не было при прежних измерениях. Поэтому были выполнены новые измерения магнитного поля установки СВД.

Измерения индукции магнитного поля были выполнены системой датчиков Холла в автоматизированном режиме под управлением компьютера. Рабочая область измерений составила $(140. \times 88. \times 460.) \text{ см}^3$. В работе дается описание аппаратуры, приведены результаты измерений и их анализ, описаны процедуры получения карты магнитного поля установки СВД, которая в дальнейшем будет использоваться для проведения экспериментальных исследований.

Система для измерения магнитного поля

Измерение магнитного поля выполнялось сборками полупроводниковых арсенидогаллиевых датчиков Холла (ДХ) (рис. 2) производства ООО «Вега – Флекс» (Санкт-Петербург) [6], обеспечивающими измерение индукции поля по трем координатам. Каждая сборка (магнитометр) содержит три датчика Холла типа ПХЭ602817В.

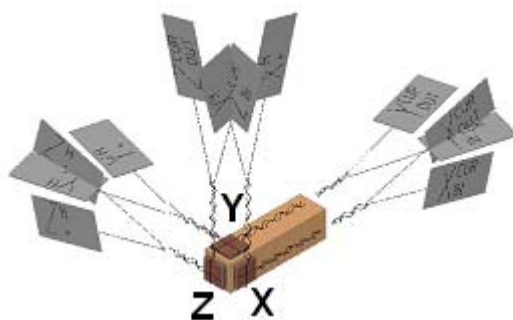


Рис. 2. Схема сборки датчиков Холла, смонтированных на керамическом основании.

Основные характеристики датчика Холла:

- магнитная чувствительность при $B=0.1$ Тл = $60 \div 75$ мкВ / мТл;
- ток питания = 100 мА;
- входное сопротивление = 4.5 Ом;
- температурный коэффициент чувствительности = $-0.004\% / ^\circ\text{C}$.

Схематическое изображение механической конструкции для измерения магнитного поля установки СВД приведено на рис. 3. Обозначение осей соответствует принятому в экспериментах на СВД правилу (Z-направление пучка, X- горизонталь, Y- вертикаль в правой системе координат). Измерения выполнялись 23 магнитометрами, закрепленными на вертикальной штанге (ось Y) с шагом 4 см. Штанга установлена на подвижной каретке, которая перемещалась по рельсам вдоль оси Z с шагом 4 см с использованием управляемого от ПК электродвигателя и ленточного привода. В поперечной плоскости (по оси X) штанга с магнитометрами перемещалась с шагом 4 см ручным приводом. Ориентация магнитометров на штанге соответствует измерениям компонентов индукции поля (B_x , B_y , B_z). Положение каретки, штанги и, соответственно, магнитометров по отношению к реперным меткам на ярме магнита измерялось с

точностью $1 \div 2 \text{ мм}$, что с учетом линейных размеров сенсора ($2 \times 2 \text{ мм}^2$) можно считать достаточным.

Перед измерениями индукции поля СВД датчики калибровались с помощью ЯМР в 6-метровом магните УНК при трех значениях поля: 3106, 4657, 6500 Гс и стабильностью тока 10^{-4} . Калибровка показала соответствие измеренных значений чувствительности паспортным данным. Показания при нулевом поле определялись как полуразность показаний при двух противоположных ориентациях в заведомо слабом внешнем поле.

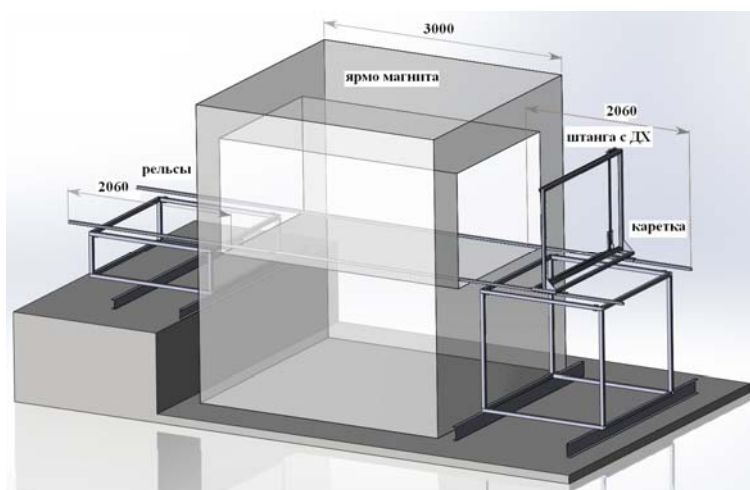


Рис. 3. Схематическое изображение механической конструкции для измерения магнитного поля.

Чтобы обеспечить требуемую погрешность измерения индукции поля на уровне 10^{-3} , необходимо было снизить величину влияющих факторов: тока питания датчика, температуры, тока магнита, точности АЦП – до уровня 10^{-4} .

Блок-схема системы измерения приведена на рис. 4. Система может управляться от удаленного компьютера, размещенного в другом здании либо от ПК из домика экспериментаторов в зоне установки СВД.

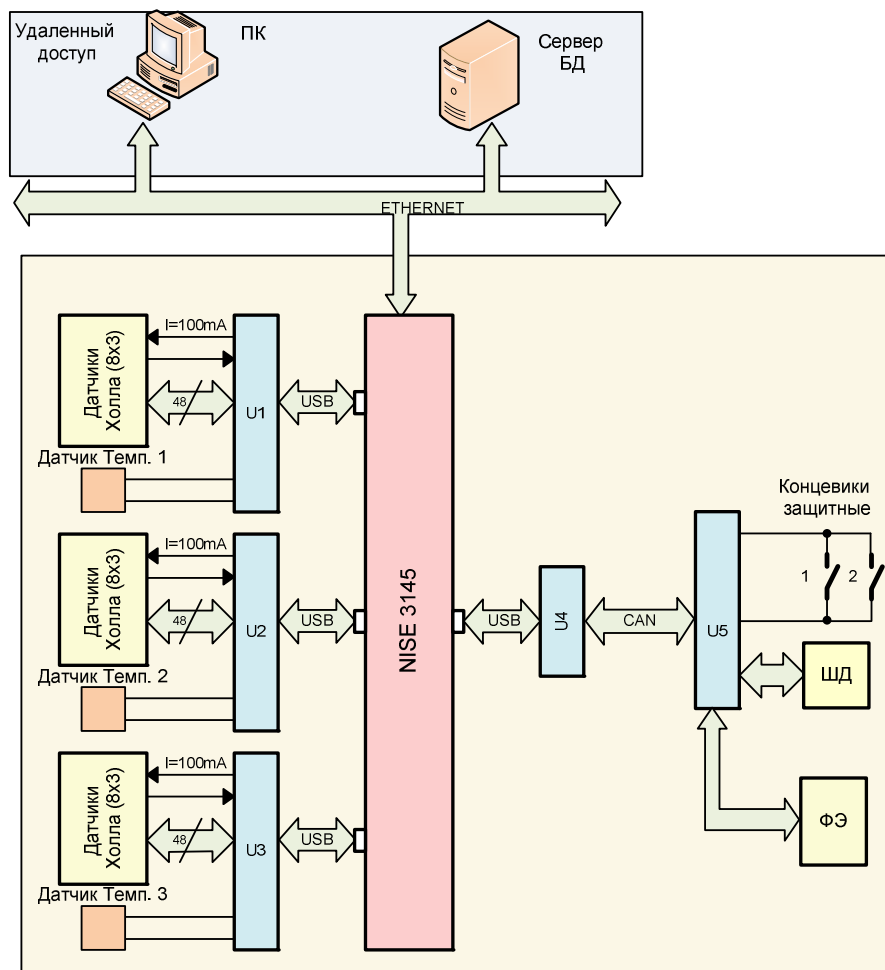


Рис. 4. Блок-схема системы для измерения магнитного поля установки СВД.

В состав системы измерения и управления входят следующие блоки:

- Три 24-канальных блока измерения сигналов датчиков Холла (U1, U2, U3).
- U4 – преобразователь интерфейсов (USB-CAN) - AC4 [7].
- Блок управления шаговым двигателем FL60STH86 с шагом по окружности 1 мм для перемещения каретки вдоль оси Z, обработки сигналов с фотоэлемента (ФЭ) и концевых выключателей (U5).

Блок измерения сигналов ДХ включает в себя:

- 24 входных канала с одновременной выборкой сигнала. Максимальная частота измерений 6 кГц.
- Диапазон измеряемых напряжений ± 120 мВ. Коэффициент усиления канала – 20.
- Встроенный стабильный источник тока 100 мА.

- АЦП для контроля тока.
- Два канала измерения температуры полупроводниковыми интегральными микросхемами-термодатчиками типа AD592 с точностью ± 0.5 °C.

Калибровка блоков производилась прибором В1-12 (паспортная погрешность установки напряжения не более 0.005%).

Измеренные шумы блоков, приведенные к входу, при частоте опроса $F=100$ Гц составляют ± 6 мкВ, это означает, что среднеквадратичное значение шумов не превышает уровень 10^{-4} от максимального входного сигнала ± 120 мВ.

Измеренные шумы источника тока ± 8 мкА, что составляет около 10^{-4} от величины тока.

Концевые выключатели ограничивают перемещение каретки. Фотодатчик (ФЭ), закрепленный на каретке, перемещается вдоль линейки с прорезями шириной 1 мм, нарезанными с шагом 4 см и задающие координату по оси Z. Полупроводниковые датчики температуры AD592 контролируют изменение температуры измерительных блоков и магнитометров в ходе измерений. Калибровочная точность датчиков температуры 0.5 °C, линейность в диапазоне температур от 0 °C до 70 °C равна 0.15 °C. Термочувствительность блоков измерения сигналов ДХ в целом при нулевом токе проверялась в термокамере SU-241 фирмы ESPEC. Значения тока магнита считывались в контроллере источника питания магнита и передавались на установку СВД по сети с задержкой в единицы секунд.

Процедура измерений

Рабочая область измерений была разделена на две половины по продольной оси Z: переднюю от ВД до центра магнита и заднюю от ДЕГА до центра магнита, каждая из них составила $(140. \times 88. \times 460.)$ см³. Измерения индукции (B) задней части магнитного поля установки СВД, выполненные в 2016 году при различных значениях ($I=1, 2, 3$ и 4 кА) тока в катушках магнита, служили для:

- начальной оценки измерений индукции;
- проверки паспортных данных каждого ДХ;

- получения зависимости индукции поля от тока в магните и проверки ее линейности;
- сравнения измерений с картой поля 1990 года [5];
- получения рекомендаций по усовершенствованию оборудования для окончательных измерений всего объема поля, которые были завершены в 2017 году.

Управление подвижной кареткой и считывание показаний датчиков осуществлялось с помощью программной платформы LabVIEW. Результаты измерений записывались в текстовые файлы, которые содержали служебную информацию: шаг измерительной каретки вдоль пучка и по горизонтали, ток магнита, показания датчиков температуры и усредненные данные по 100 измерениям индукции в одной точке для трех компонент поля в мТл с их дисперсией. Анализ первых измерений поля показал, что разброс показаний датчиков Холла в одной точке небольшой ($< 0.1\%$). Величины измеренных индукций поля неплохо согласуются в центре магнита со старой картой поля. Однако были выявлены проблемы в системе передвижения каретки из-за наличия деталей из нержавеющей стали в конструкции и электродвигателя для перемещения штанги с ДХ в поперечном направлении (ось X). Поэтому этот электродвигатель был удален из конструкции, и перемещение штанги с ДХ в поперечном направлении осуществлялось вручную. Для надежного позиционирования магнитометров в точках измерения по оси Z была смонтирована продольная линейка с прорезями через 4 см и система регистрации сигнала с фотодатчика при прохождении щели, доработана программа для остановки каретки по сигналу фотодатчика. Сравнения измеренных индукций поля в одной точке при движении каретки в обе стороны ($X=\text{const}$) показали, что значения $B(\text{вперед})$ и $B(\text{назад})$ совпадают с точностью лучше 1%. Поэтому в дальнейшем для анализа использовались только измерения, полученные при одном (вперед) прохождении строки. Измерения по оси Z выполнялись от малых к большим значениям поля. Найдено, что зависимость показаний ДХ от их температуры в диапазоне температур, при которых проводились измерения, $< 0.01\%$ и в дальнейшем эта зависимость не анализировалась.

Коэффициенты пропорциональности (k) для значений B_y , измеренные при разных величинах тока в магните ($I = 1, 2, 3, 4$ кА), отличаются от линейной зависимости в пределах ($-1.5\% \div -0.5\%$). В таблице 1 они приведены в качестве примера для одной пространственной точки в центре магнита.

Таблица 1. Коэффициент пропорциональности $k = B_y(4 \text{ кА}) / B_y(I)$.

$I, \text{кА}$	$B_y, \text{мТ}$	$k = B_y(4 \text{ кА}) / B_y(I)$
1.0	267.37	3.938 (-1.5%)
2.0	531.51	1.981 (-1.0%)
3.0	793.95	1.326 (-0.5%)
4.0	1052.75	1.0

Анализ измеренных данных

В 2017 году, после модернизации механической системы передвижения ДХ и улучшения электронной системы управления, были проведены измерения передней (от ВД до центра магнита = front) и задней (от ДЕГА до центра магнита = back) частей магнитного поля при токе в катушках 4 кА и 1 кА. Поле измерялось в 191935 пространственных точках. Анализ полученных массивов данных для каждой компоненты поля (B_x, B_y, B_z) проводился отдельно, после чего они были объединены в карту магнитного поля.

Коррекция значений индукции поля

Измеренные данные магнитной индукции (B) корректировались:

- на величину тока в магните при каждом измерении B (например, фактор $K_I = 4.0 / I(\text{кА})$), так как $I(\text{кА})$ мог меняться на величину $\sim 1\%$ при каждом новом включении тока магнита;
- у четвертого магнитометра (нумерация сверху вниз по штанге) не работал датчик для компоненты B_z , поэтому значение B_z для него вычислялось как среднее двух соседних датчиков/

Сглаживание измерений магнитного поля

Предварительные измерения магнитного поля показали, что использование

большого числа ДХ (23 шт. для каждой компоненты поля) при наличии индивидуальных физических характеристик у каждого из них (например, зависимости чувствительности от величины B) и ошибок их индивидуальных калибровочных измерений, предполагает на завершающей стадии проведения процедуры сглаживания данных и анализа результатов этой процедуры. Для иллюстрации этого эффекта на рис. 5 (слева) приведены зависимости основной компоненты $B_y(\text{back})$ от номера датчика ДХ в центре магнита для восьми горизонтальных координат X (четыре в одну сторону и четыре в другую от центра). Относительные «биения» от гладкой кривой значений $B_y(\text{back})$ двух соседних датчиков ДХ небольшие меньше 2%, но ожидается, что кривые должны быть гладкими. Кроме того, при небольших значениях B (на краях поля для B_y и для компонент B_x, B_z) относительные колебания могут иметь значительную величину.

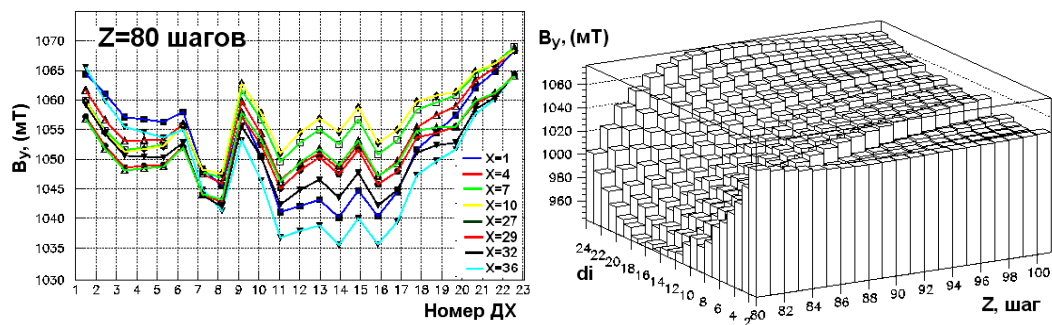


Рис. 5. Зависимости основной компоненты $B_y(\text{back})$ от номера датчика ДХ в центре магнита для восьми значений X (слева); плот $B_y(Z, \text{ДХ})$ (справа). На оси Z указан номер шага измерений.

Для сглаживания зависимостей индукции B_y от вертикальной координаты кривые фитировались полиномом 3-й степени. Результаты приведены на рис. 6.

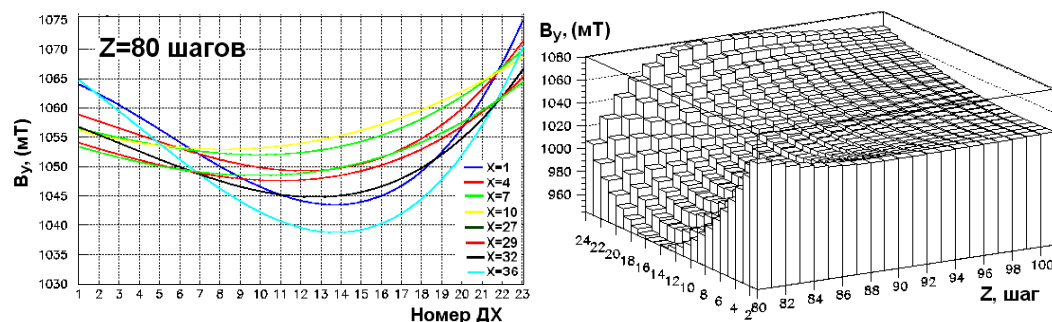


Рис. 6. Зависимости основной компоненты $B_y(\text{back})$ от номера датчика ДХ в центре магнита для восьми значений X (слева); плот $B_y(Z, \text{ДХ})$ (справа) после фитирования. На оси Z указан номер шага измерений.

Необходимость сглаживания зависимостей компоненты $B_z(Y)$ иллюстрирует рис. 7, который получен для измерений передней части поля. При малых значениях B_z их относительные колебания достигают иногда $\sim 20\%$.

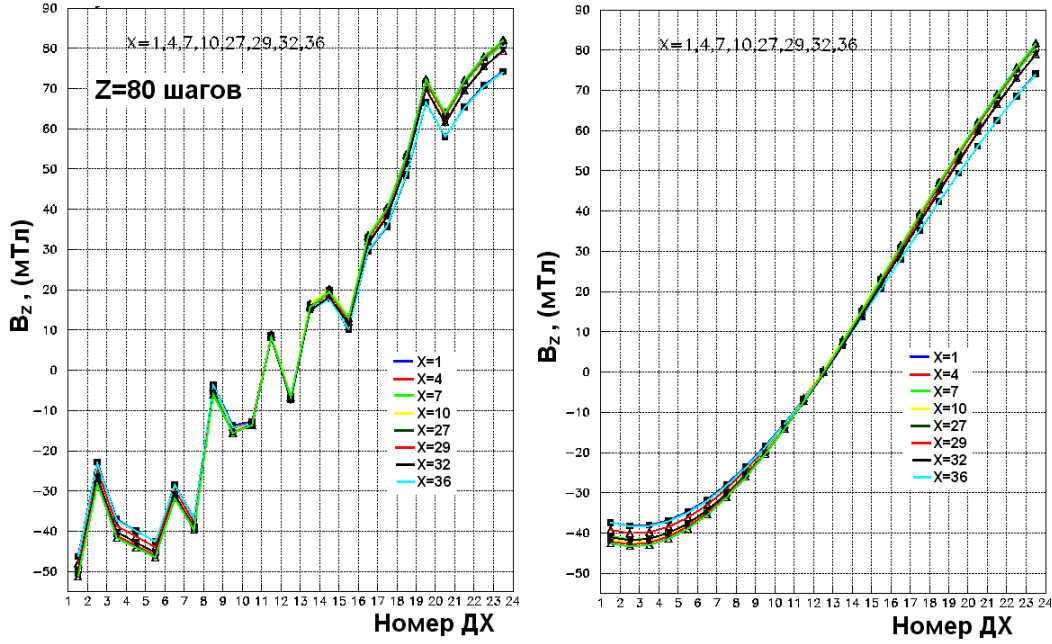


Рис. 7. Зависимости компоненты $B_z(\text{front})$ от номера датчика ДХ в центре магнита для семи значений X до (слева) и после (справа) фитирования.

Для проверки, не искажает ли вышеописанная процедура сглаживания измеренных значений индукции B и ее зависимостей от координат, вычислялась величина $\Delta B/B = (B_{\text{meas}} - B_{\text{fit}})/|B_{\text{fit}}|$ для каждой измеренной точки, которая отражает также ошибки измерений индукции. Распределение величины $\Delta B_y/B_y$, включающее 88596 измеренных точек в передней части магнита, имеет среднее значение $\langle \Delta B_y/B_y \rangle = 0.01$ и $\sigma = 0.03$, для 86018 точек в задней части магнита имеем $\langle \Delta B_y/B_y \rangle = 0.08$ и $\sigma = 0.18$. Зависимость этой величины от значения B_{fit} для основной компоненты поля B_y приведена на рис. 8. Видно, что в центре магнита ($B_y > 500$ мТл) величина $\Delta B_y/B_y$ не превышает 0.5% для передней и 1% для задней части магнита.

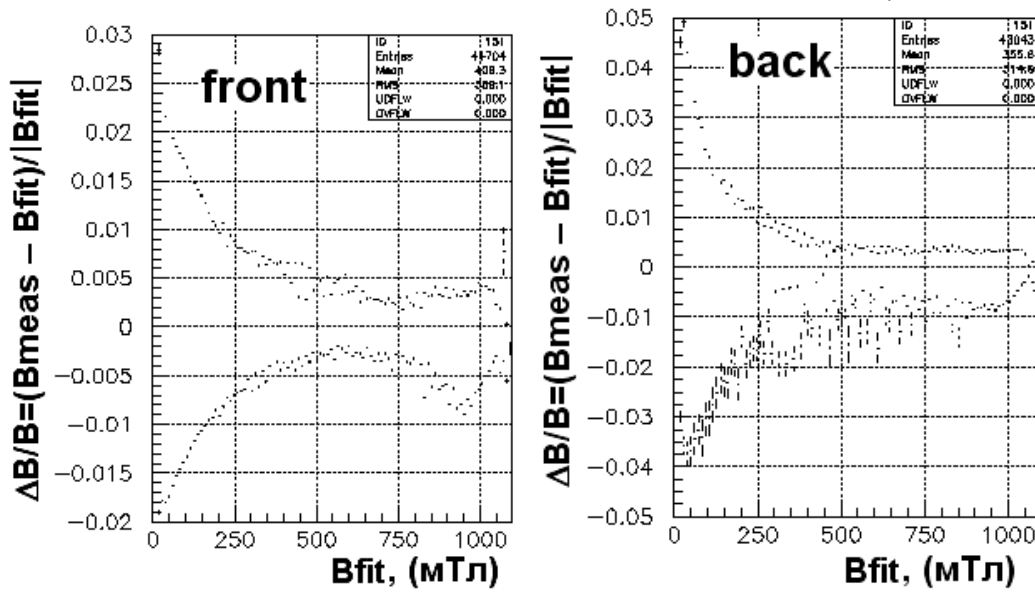


Рис. 8. Относительная разница $\Delta B/B = (B_{\text{meas}} - B_{\text{fit}}) / |B_{\text{fit}}|$ для измерений в передней (слева) и задней частях магнита (справа).

Аналогичные распределения для компоненты B_z показывают, что $\langle \Delta B_z/B_z \rangle = 0.01$, $\sigma = 0.26$ для передней и $\langle \Delta B_z/B_z \rangle = 0.07$, $\sigma = 0.26$ для задней части магнита. Для компоненты B_x имеем $\langle \Delta B_x/B_x \rangle = -0.04$, $\sigma = 0.36$ для передней и $\langle \Delta B_x/B_x \rangle = -0.07$, $\sigma = 0.34$ для задней части магнита. Для значений $B_z > 100$ мТл средняя ошибка $\langle \Delta B_z/B_z \rangle \sim 5\%$. Для самой слабой компоненты B_x ошибки $\Delta B_x/B_x$ могут достигать $\sim 20\%$.

Переход в систему координат центра магнита

Карта магнитного поля, используемая для геометрической реконструкции событий в установке СВД, представляет собой массивы значений трех компонент индукции B_x , B_y и B_z в системе координат, привязанной к геометрическому центру магнита. Измерения магнитного поля получены в системе координат измерительной установки (X_0 , Y_0 , Z_0). Задача – перейти в систему координат магнита (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 – центр внутреннего объема яра, представляющего собой параллелепипед). Для этого использовались геометрические измерения яра магнита и размеры механической конструкции измерительной установки и ее положения относительно яра.

Карты силовых линии поля на проекциях (в продольной и поперечной плоскостях) имеют характерные особенности (симметрии). Эти симметрии позволяют восстановить оси магнитного поля в пространстве. Положение осей поля зависит от положения осей ярма магнита и от геометрии его катушек. Для определения центра поля по оси Z строились распределения $B_y(Z)$ вблизи центра магнита ($100 < Z < 114$ шагов или интервалов измерений, $X=18$ шагов и Y для ДХ13) для измерений передней и задней частей (см. рис. 9). Индукция максимальна в центре поля ($Z'=0$). Из анализа рис. 9 следует, что центр поля находится в точке $Z=105$ шагов для измерений передней половины и $Z=110$ шагов для измерений задней половины поля магнита.

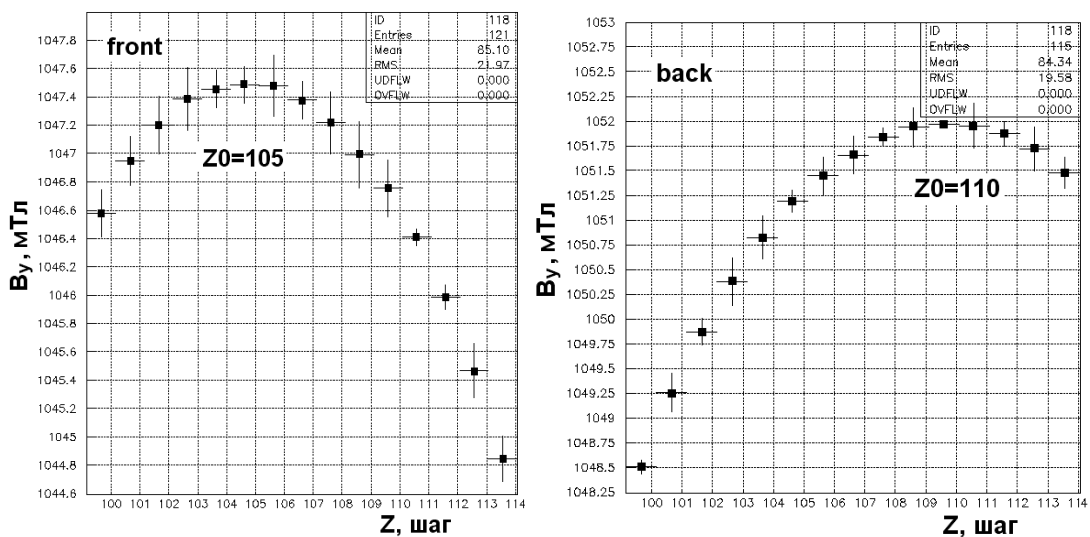


Рис. 9. Зависимость индукции $B_y(Z)$ для измерений в передней (слева) и задней частях магнита (справа). На оси Z указан номер шага измерений.

После перехода в систему $Z'=Z-105$ шагов для измерений в передней части можно показать, что центр Z'_0 остается центром для всех шагов по X (см. рис. 10 слева). На рис. 10 справа показано, что положение центра также не зависит от величины тока магнита и от процедур сглаживания поля при токе $I=4$ кА. Чтобы сравнить значения B_y при токах 1 и 4 кА, представлена величина $4.0 \times B_y(1 \text{ кА})$. Аналогичные рисунки для измерений в задней части магнита показывают, что координата $Z_0=110$ шагов соответствует центру поля ($Z'=0$).

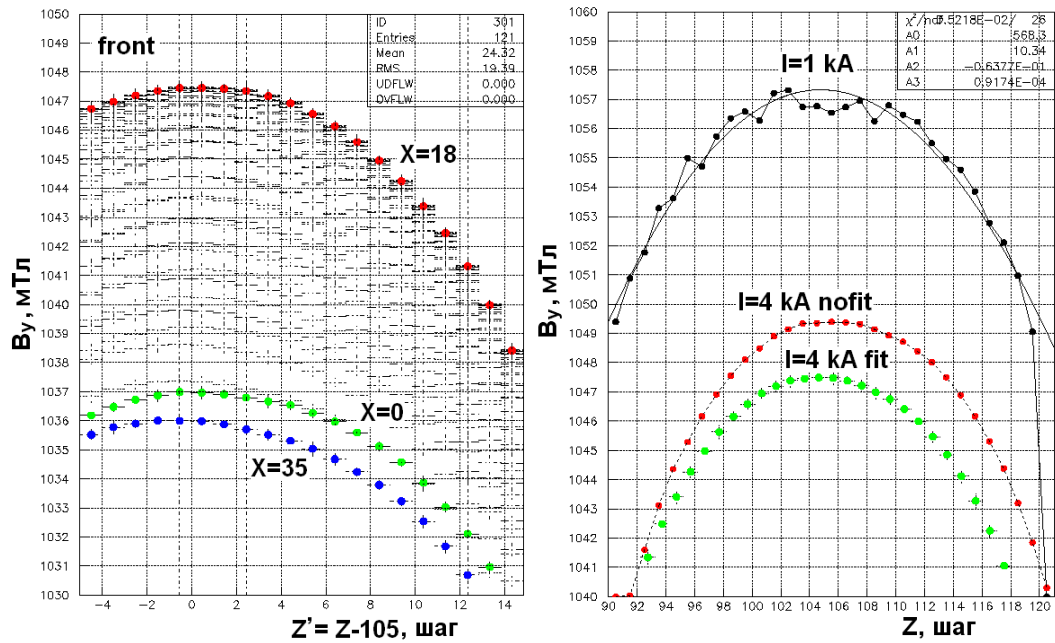


Рис. 10. Зависимость индукции $B_y(Z'=Z-105)$ для разных X (слева) и зависимость индукции $B_y(Z, X=18, Y=d13)$ для $I=1$ кА и $I=4$ кА до и после сглаживания (справа).

Далее нужно определить координаты X_0 и Y_0 . Для этого строились проекции индукции $B_y(X)$ и $B_y(Y)$ для различных значений координаты Z . Пример зависимости $B_y(X)$ для $Z_0=80$ шагов и всех датчиков ДХ ($d1 \div d23$) показан на рис. 11 (слева). Для центрального ДХ ($d13$) $B_y(X)$ имеет максимум при $X_0=18$ шагов.

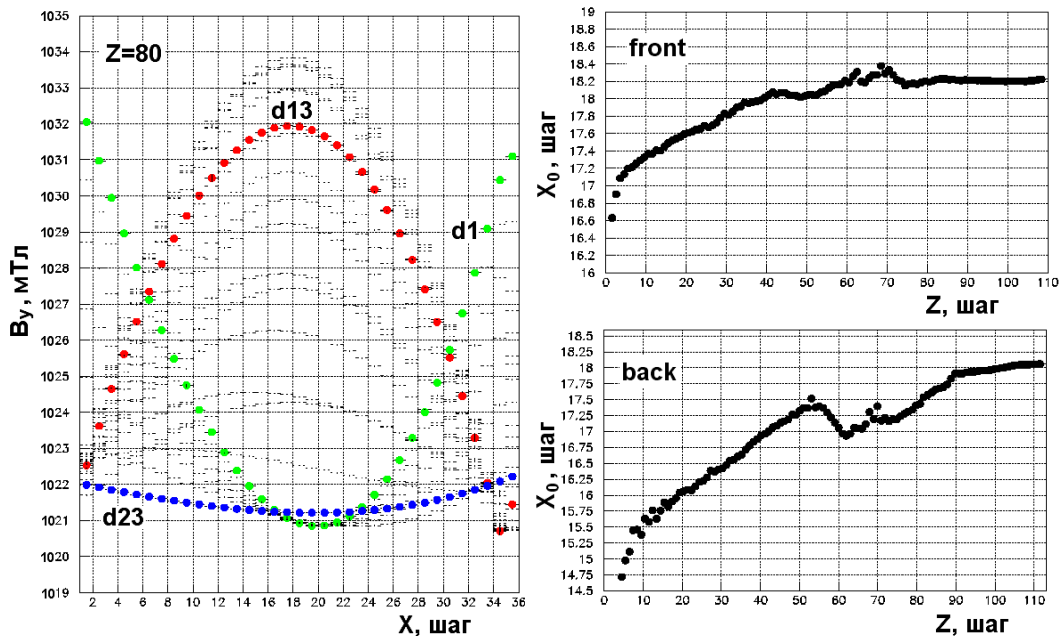


Рис. 11. Зависимость индукции $B_y(X)$ для $Z=80$ шагов (слева) и зависимость $X_0(Z)$ для передней и задней частей (справа). На оси Z указан номер шага измерений.

Оказалось, что значение $X_0=18$ шагов постоянно только в ярме магнита ($Z_0 > 70$) и изменяется с уменьшением координаты Z вне магнита (см. рис. 11 справа). Такое поведение X_0 связано с тем, что направляющие рельсы, проложенные вне магнита для перемещения измерительной каретки с магнитометрами, были повернуты на небольшой угол в горизонтальной плоскости по отношению к рельсам в ярме и, соответственно, оси магнитного поля. Поэтому при переходе в систему координат магнита этот факт учитывался. Для каждого шага по Z значение координаты X_0 было свое.

Анализ проекций $B_y(Y)$ для различных значений координаты Z показал, что за вертикальную координату Y_0 центра поля нужно принять положение датчика d13 при всех значениях Z , с учетом того, что нумерация датчиков имела направление сверху вниз, то есть самым верхним был d1, а нижним датчик d23.

После нахождения координат центра магнита (X_0, Y_0, Z_0) можно объединить данные для измерений передней и задней частей поля магнита и представить их в системе координат (X', Y', Z'). Полученные результаты по компонентам поля для тока магнита 4 кА приведены на рисунках 12 ÷ 17.

Компонента B_y

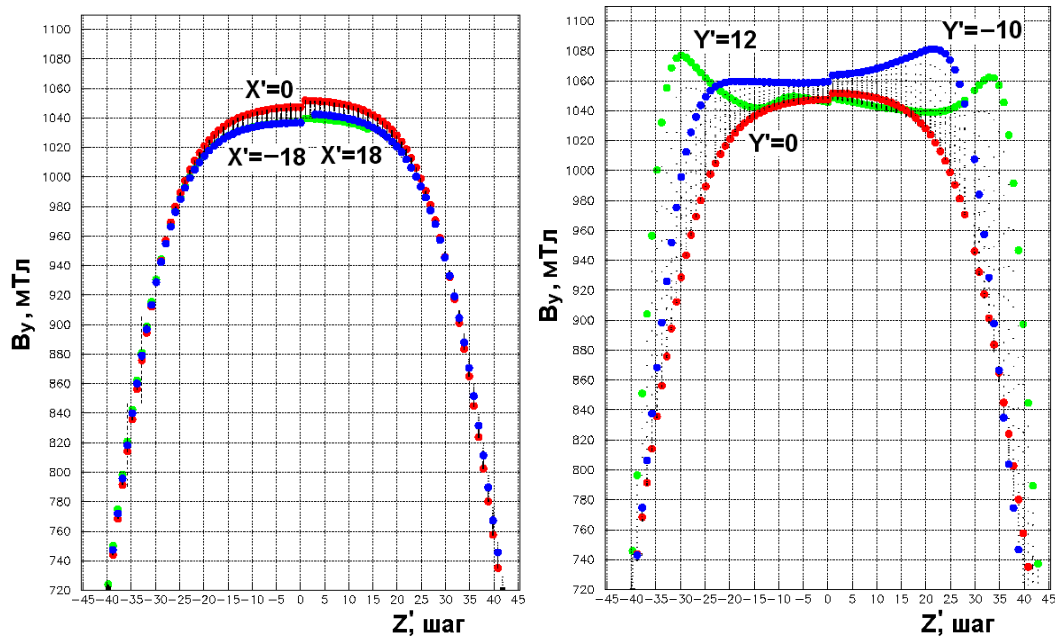


Рис. 12. Зависимость индукции $B_y(Z')$ для $Y'=0$ и разных шагов по X' (слева) и зависимость $B_y(Z)$ для $X'=0$ и разных шагов по Y' (справа).

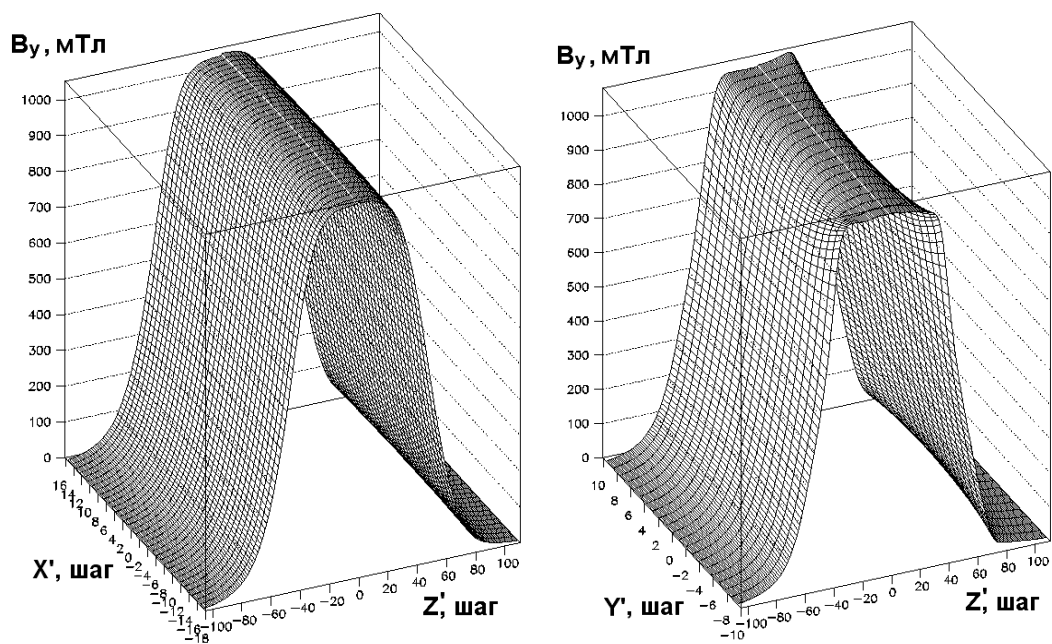


Рис. 13. Плот $B_y(Z', X')$ для $Y'=0$ (слева) и плот $B_y(Z', Y')$ для $X'=0$ (справа).

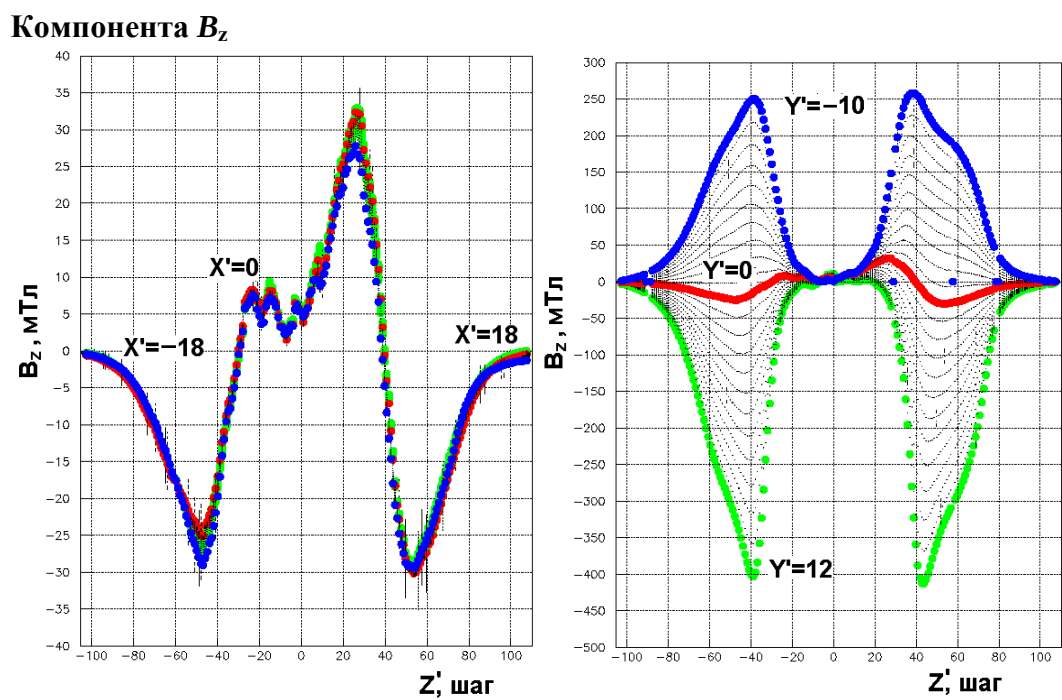


Рис. 14. Зависимость индукции $B_z(Z')$ для $Y'=0$ и разных шагов по X' (слева) и зависимость $B_z(Z)$ для $X'=0$ и разных шагов по Y' (справа).

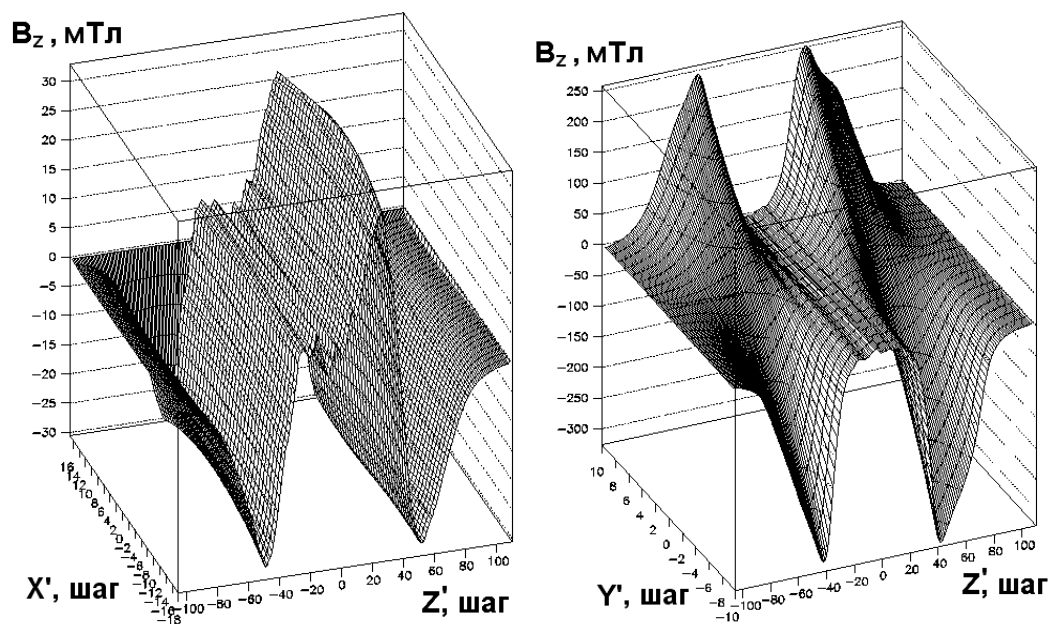


Рис. 15. Плот $B_z(Z', X')$ для $Y'=0$ (слева) и плот $B_z(Z', Y')$ для $X'=0$ (справа).

Компонента B_x

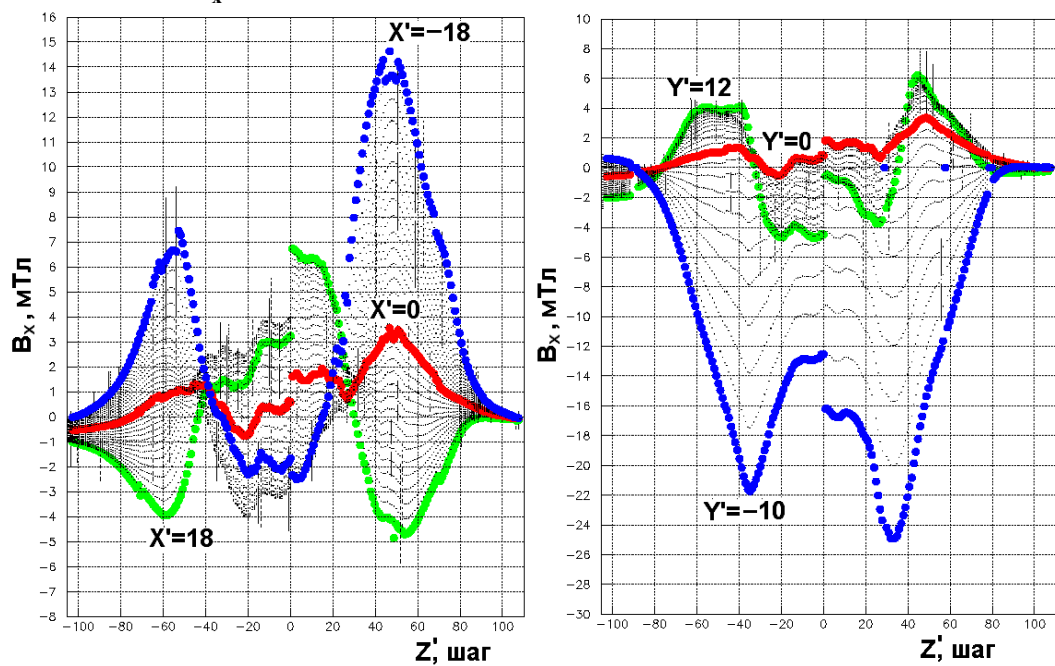


Рис. 16. Зависимость индукции $B_x(Z')$ для $Y'=0$ и разных шагов по X' (слева) и зависимость $B_x(Z)$ для $X'=0$ и разных шагов по Y' (справа).

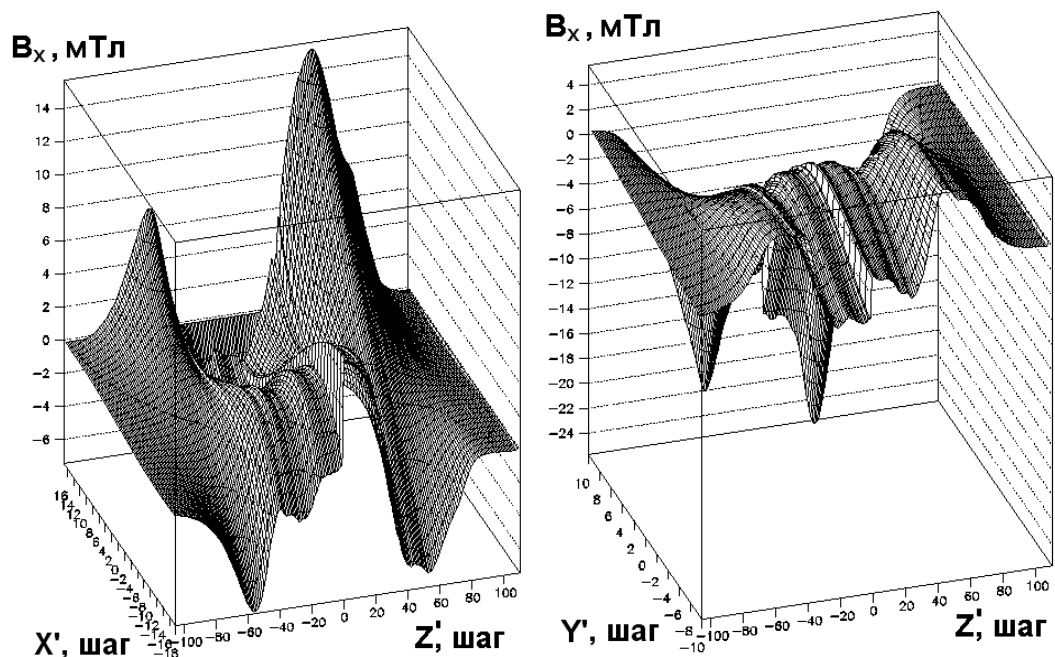


Рис. 17. Плот $B_x(Z', X')$ для $Y'=0$ (слева) и плот $B_x(Z', Y')$ для $X'=0$ (справа).

В точке сшивки компонентов поля, измеренных в двух половинах, в центре магнита наблюдается их небольшое различие на уровне $2 \div 4$ мТл для компоненты B_x , наибольшее на краях магнита. Для компоненты B_z эта разница еще меньше. Для компоненты B_y результаты этих измерений совпадают с точностью $\sim 0.5\%$, что может быть принято за оценку систематической ошибки, выполненных измерений магнитного поля установки СВД-2.

Сравнение со старой картой

Измеренная карта магнитного поля установки СВД-2 сравнивалась с аналогичной картой, полученной в 1990 году специалистами из ОИЯИ (г. Дубна) [5] и используемой в системе обработки экспериментальных данных. Имеет смысл сравнивать только данные для передней части магнита, так как старая карта была получена в этой области и далее транспонировалась симметрично на заднюю часть. Новая карта не симметрична по оси Z относительно центра из-за установки железного экрана перед ЧС. При совмещении систем координат старой и новой карт поля получены рисунки $18 \div 20$, на которых демонстрируется сравнение карт для разных компонент поля.

Компонента B_y (рис. 18)

- 1) в центральной области магнита ($-30 < Z' < 0$ шагов или $-120 < Z' < 0$ см) выполняется соотношение $B_y(\text{new}) > B_y(\text{old})$ в пределах 1%;
- 2) в области больших градиентов поля ($-70 < Z' < -30$ шагов или $-280 < Z' < -120$ см) при $B_y > 300$ мТл наблюдается монотонное превышение $B_y(\text{old}) > B_y(\text{new})$ от 1% до 10%;
- 3) в области слабого поля $B_y < 100$ мТл ($-100 < Z' < -70$ шагов или $-400 < Z' < -280$ см) имеется значительное отличие новой карты от старой, когда $B_y(\text{old}) > B_y(\text{new})$ и $\Delta B_y / B_y > 10\%$.

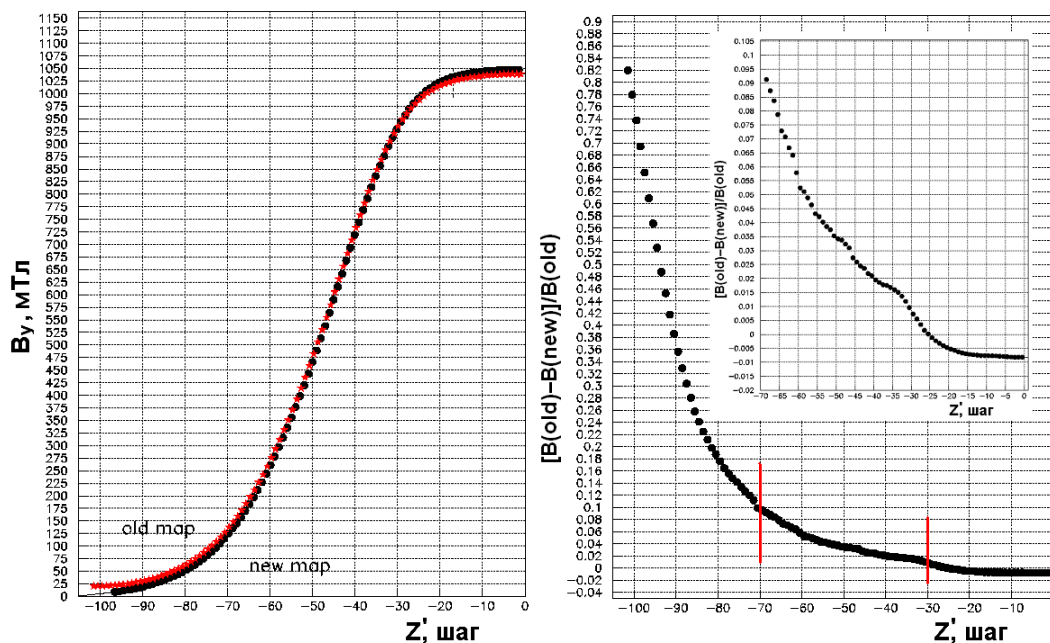


Рис. 18. Зависимость индукции $B_y(Z')$ вдоль продольной оси ($X', Y' = 0$) для старой (красные звезды) и новой (черные кружки) карт (слева) и зависимость относительной разности $\Delta B_y / B_y$ от продольной координаты Z' (справа).

Компонента B_z (рис. 19)

Отличия для компоненты B_z можно характеризовать тем, что при индукции поля $B > 100$ мТл (в области вне магнита и при $Y' \neq 0$), обе карты совпадают в пределах $\pm 10\%$.

Компонента B_x (рис. 20)

Старая карта показывает равенство нулю значений индукции B_x во всех областях, что не согласуется с новыми измерениями поля даже качественно. Несмотря на то, что величина B_x мала ($|B_x| < 20$ мТл), она отличается от 0 даже внутри ярма, особенно вдали от оси поля.

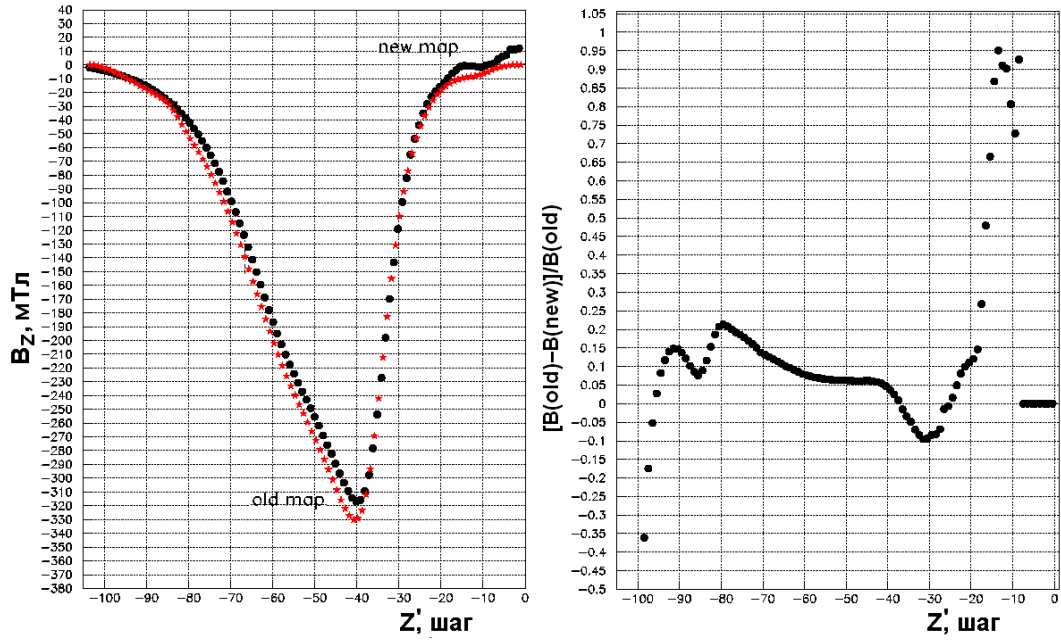


Рис. 19. Зависимость индукции $B_z(Z')$ вдоль продольной оси ($X'=0$, $Y'=-10$ шагов) для старой (красные звезды) и новой (черные кружки) карт (слева) и зависимость относительной разности $\Delta B_y / B_y$ от продольной координаты Z' (справа).

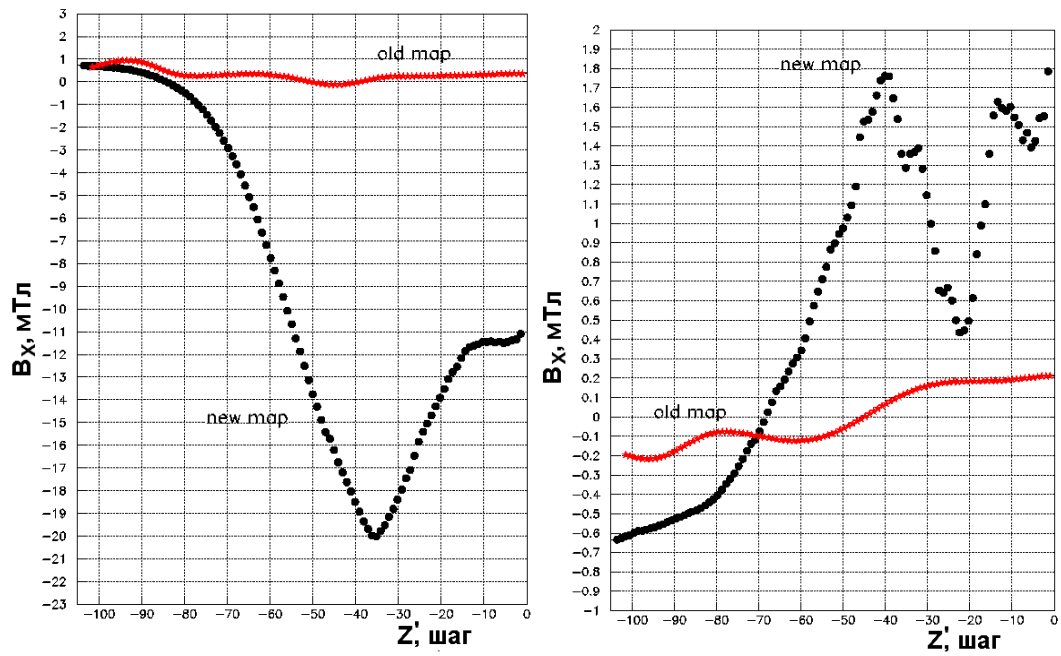


Рис. 20. Зависимость индукции $B_x(Z')$ вдоль продольной оси ($X'=0$, $Y'=10$ шагов) (слева) и ($X'=0$, $Y'=0$) (справа) для старой (красные звезды) и новой (черные кружки) карт.

Заключение

Новые измерения магнитного поля установки СВД были вызваны появлением металлоконструкций в составе установки, которых не было при измерении карты поля в 1990 году. Проблемы с геометрической реконструкцией событий, проявившиеся при обработке экспериментальных данных, также частично обусловлены неполным соответствием старой карты реальной геометрии установки СВД. Измерения магнитного поля были выполнены системой трехкомпонентных магнитометров в автоматизированном режиме под управлением компьютера. Управление подвижной кареткой и считывание показаний датчиков Холла осуществлялось с помощью программной платформы LabVIEW. Результаты измерений записывались в текстовые файлы, которые содержали служебную информацию (шаг измерения вдоль пучка и по горизонтали, ток магнита, показания датчиков температуры и т.д.) и усредненные данные по 100 измерениям индукции в одной точке трех компонент поля в мТл с их дисперсией. Рабочая область измерений была разделена на две половины от центра магнита, каждая из которых составила $(140. \times 88. \times 460.) \text{ см}^3$. В системе координат, когда продольная ось (Z) совпадает с направлением пролета пучковых частиц, измерялись три компоненты индукции (B_x, B_y, B_z) магнитного поля с шагом 4 см по каждой координате (всего 191935 пространственных точек) и при разных значениях тока в катушках ($I = 1, 2, 3, 4 \text{ кА}$). Результаты анализа полученных данных показывают, что:

- ошибки измерения основной компоненты B_y в области ярма магнита ($B_y > 500 \text{ мТл}$) не превышают 1%. Вне магнита при $B_y < 100 \text{ мТл}$ они могут достигать ~10%;
- средняя ошибка измерений компонент поля B_x и B_y составила 5%;
- как и ожидалось, новая карта не симметрична относительно центра магнита в продольном направлении (в отличие от старой карты) из-за дополнительных металлоконструкций;
- в передней части поля ярма магнита различия новой и старой карт для B_y не превышают 1%, вне магнита наблюдается монотонное превышение $B_y(\text{старая}) > B_y(\text{новая})$ от 1% до 10%;

- значения B_z для новой и старой карт совпадают в пределах 10%;
- старая карта дает значения B_x близкие к нулю, тогда как новая карта показывает, что в некоторых областях поля компонента $B_x \sim 20$ мТл и не равна нулю даже внутри ярма магнита.

Список литературы

- [1]. В. В. Авдейчиков и др. ПТЭ, 2013, № 1, с. 14–37.
- [2]. Е. Н. Ардашев и др. Препринт ИФВЭ 96-98, Протвино, 1996.
<http://web.ihep.su/library/pubs/prep1996/ps/96-98.pdf>
- [3] В. В. Авдейчиков и др. Препринт №P1-2004-190, ОИЯИ (Дубна 2005).
- [4] www.ihep.ru (Комплекс У-70 → Установки → Действующие установки → СВД).
- [5] И.В. Богуславский и др. Препринт №P1-90-247, ОИЯИ (Дубна 1990).
- [6] ООО «Вега – Флекс», www.sensorspb.ru
- [7] Д.А. Васильев и др. Препринт ИФВЭ 2011-2, Протвино, 2011.

Рукопись поступила 27 марта 2018 г.

В.Н. Алферов и др.
Измерения магнитного поля установки СВД.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	30.03.2018.	Формат	$60 \times 84/16$.	Цифровая печать.
Печ.л.	1,5.	Уч.– изд.л.	2,2.	Тираж 80.
			Заказ 4.	Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2018-2,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2018
