

Прототип гибридного мюонного годоскопа для мюонографии крупномасштабных объектов

© Н.А. Пасюк,¹ Н.Н. Давиденко,² А.С. Кожин,^{1,3} К.Г. Компаниец,¹ Ю.Н. Конев,² С.В. Олейник,²
А.А. Петрухин,¹ Р.М. Фахрутдинов,^{1,3} М.Ю. Целинченко,¹ Д.В. Шудра,² В.В. Шутенко,¹ И.И. Яшин¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия

² Акционерное общество „Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций“,
109507 Москва, Россия

³ Институт физики высоких энергий им. А.А. Логанова Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“,
142281 Протвино, Московская обл., Россия
e-mail: NAPasyuk@mephi.ru

Поступило в Редакцию 15 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 30 мая 2024 г.

Принято к публикации 31 мая 2024 г.

Описана конструкция прототипа гибридного мюонного годоскопа, состоящего из сцинтилляционного стрипового детектора и детектора на дрейфовых трубках и предназначенного для регистрации треков заряженных частиц, в основном мюонов. Для каждого детектора были разработаны детектирующие системы, методы обработки данных и реконструкции треков частиц. Даны методики реконструкции событий и построения мюонограмм, а также приведены основные результаты экспериментов по локализации свинцовых сборок в пространстве на основе анализа разностных мюонограмм.

Ключевые слова: мюоны космических лучей, детекторы частиц, сцинтилляционные стрипы, SiPM, сцинтилляционный детектор, дрейфовая трубка, мюонный годоскоп, мюонография, мюонная томография, мюонограмма.

DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58569.40-24

Введение

В настоящее время бурное развитие получило новое направление экспериментальной физики — мюонография крупномасштабных объектов природного и искусственного происхождения с помощью мюонов — проникающей компоненты вторичных космических лучей. Интенсивность мюонов на поверхности Земли составляет около $100 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Поток мюонов формируется на высотах 15–20 км в основном в распадах заряженных π - и K -мезонов, возникающих при взаимодействии протонов и ядер первичных космических лучей с ядрами атомов атмосферы.

Мюоны в процессе прохождения через вещество теряют энергию преимущественно на ионизационные и радиационные процессы, а также испытывают многократное кулоновское рассеяние на ядрах, что приводит к изменению потока частиц. Большая проникающая способность делает космические мюоны привлекательным источником для дистанционного зондирования структуры крупномасштабных объектов. Средняя энергия мюонов на поверхности Земли, приходящих с вертикального направления, составляет около 4 GeV, что позволяет им проходить $\sim 20 \text{ м}$ воды. Угловое распределение потока мюонов зависит от зенитного угла, отсчитываемого от вертикали, как $\sim \cos^2(\theta)$, а средняя энергия увеличивается как $\sim \sec(\theta)$.

При проецировании зарегистрированных годоскопом треков мюонов в направлении на некоторую референтную плоскость, проходящую через центр „просвечиваемого“ объекта, можно получить (по аналогии с рентгенограммой) 2D-матрицу — мюонограмму — распределение плотности точек пересечения треков с плоскостью. Полученные мюонограммы объекта несколькими годоскопами с различных пересекающихся направлений дают возможность 3D-анализа (томографии) структуры объекта [1–3]. Другим способом реализации мюонной томографии является использование одного годоскопа, который перемещается вокруг исследуемого объекта.

Для реализации метода мюонографии [4] с целью дистанционной диагностики крупномасштабных объектов, в том числе ядерных реакторов, в НОЦ НЕВОД (НИЯУ МИФИ) в сотрудничестве с АО „ВНИИАЭС“ (Росатом) по заказу АО „Наука и инновации“ (ГК Росатом) был создан мобильный гибридный мюонный годоскоп. Годоскоп имеет модульный принцип построения и состоит из двух годоскопических систем [5–8]: сцинтилляционного стрипового детектора (ССД, SSD) и детектора на дрейфовых трубках (ДДТ, DTD). Каждый из детекторов представляет собой систему однопроекционных координатных плоскостей (ОКП), расположенных последовательно с ортогонально ориентированными стрипами (трубками) и образующих двухкоординатную систему регистрации, обеспечивающую независи-

мое детектирование треков мюонов в виде вертикальной и горизонтальной проекций. Каждая однопроекционная плоскость ССД представляет собой два смежно-расположенных модуля из 64 узких и длинных сцинтилляционных стрипов с оптоволоконным светосбором на кремниевые фотоумножители (SiPM). Однопроекционная плоскость ДДТ представляет собой две камеры-сборки по три слоя по 48 дрейфовых трубки в каждой (всего 288 трубок).

Каждый детектор имеет свои преимущества: стриповый детектор обладает высоким быстродействием, формирует триггер и определяет начальное положение трека, а детектор на дрейфовых трубках обладает высоким координатным разрешением и дает возможность формировать мюнограммы с разрешением, уступающим только ядерным эмульсиям.

Для проверки разработанных конструктивных решений регистрирующей системы, а также для отработки методов реконструкции событий и оценки возможности построения мюнограмм крупномасштабных объектов был собран и испытан полнофункциональный прототип гибридного мюонного годоскопа (ГМГ).

В специальном здании ангарного типа была смонтирована подвесная временная конструкция прототипа ГМГ, включающая в себя ССД, ДДТ, триггерную систему, системы сбора и обработки данных. С помощью прототипа ГМГ были проведены эксперименты по проверке работоспособности основных систем и методов реконструкции, обработки и анализа данных, на основе которых были построены мюнограммы. Основной задачей экспериментов являлось обнаружение и оценка точности локализации тестовых объектов (сборок стандартных свинцовых кирпичей) методом мюнографии на различных расстояниях и высотах от центра прототипа ГМГ.

В настоящей работе приводится описание конструкции и характеристик прототипа ГМГ, обсуждаются особенности и основные принципы разработанных методов реконструкции событий и построения мюнограмм, а также первые результаты по мюнографии свинцовых блоков с использованием прототипа ГМГ.

1. Конструкция прототипа гибридного мюонного годоскопа

Конструктивно прототип ГМГ имеет модульную структуру и состоит из двух годоскопов — сцинтилляционного стрипового детектора и детектора на дрейфовых трубках. ОКП детекторов чередуются между собой (рис. 1) и закреплены в вертикальном положении на подвесах к потолочной балке (рис. 2). Для исключения возможности поворота каждая плоскость дополнительно зафиксирована к специальной раме на полу. Координатные плоскости ССД в варианте прототипа ГМГ представляют собой только один модуль (64 стрипа). ОКП с горизонтально ориентированными стрипами размещены на разных высотах для обеспечения наилучшего захвата

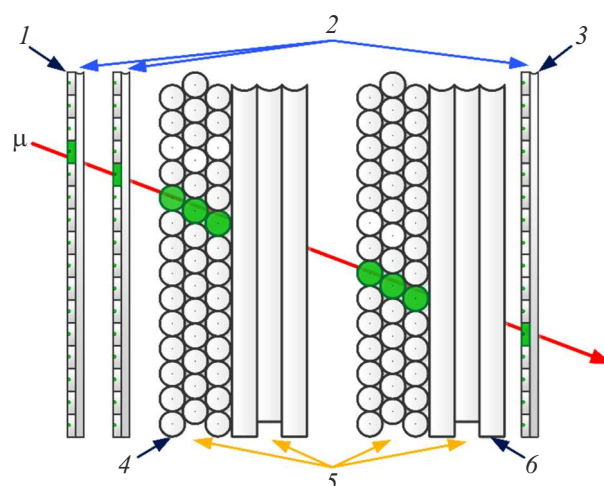


Рис. 1. Схема расположения детектирующих элементов прототипа ГМГ: 1 — „X“ стрипы, 2 — плоскости со сцинтилляционными стрипами, 3 — „Y“ стрипы, 4 — „X“ трубки, 5 — плоскости камер с дрейфовыми трубками, 6 — „Y“ трубки.

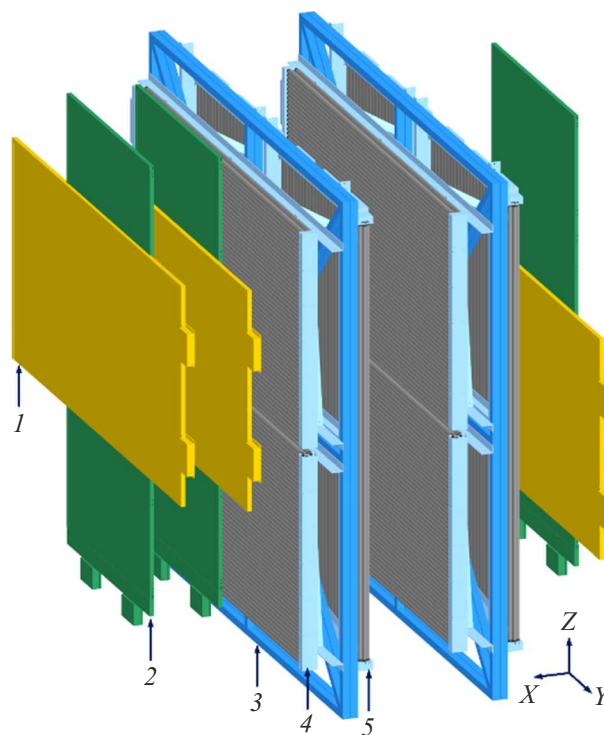


Рис. 2. 3D-модель прототипа ГМГ: 1 — плоскость ССД с горизонтальными стрипами, 2 — плоскость ССД с вертикальными стрипами, 3 — несущая рама модуля ДДТ, 4 — плоскость ДДТ с горизонтальными трубками, 5 — плоскость ДДТ с вертикальными трубками.

потока одиночных мюонов при зенитном угле $\sim 70^\circ$. В собранной конструкции расстояние между крайними плоскостями составляет ~ 3.5 м, при этом используется 6 ОКП ССД (384 сцинтилляционных стрипа) и 4 ОКП ДДТ (1152 дрейфовые трубки).

1.1. Сцинтилляционный стриповый детектор

ССД представляет собой многоканальную детектирующую систему, состоящую из шести ОКП [9]. Каждая ОКП, используемая в экспериментах с прототипом ГМГ, формируется из одного базового модуля (БМ) размером (Д×Ш×Т) $3196 \times 1500 \times 57$ mm с чувствительной площадью 2960×1478 mm². БМ состоит из 64 последовательно уложенных сцинтилляционных стрипов производства ООО „Унипласт“ (г. Владимир) [10], светосбор по длине которых осуществляется с использованием вклеенного спектросмещающего волокна (Wave Length Shifter) KURARAY Y-11(200)SJ [11]. Регистрация сигнала со светособирающих волокон выполняется SiPM Hamamatsu S13360-1350CS [12]. Стрип изготовлен с применением технологии экструзии листовых заготовок сцинтиллятора в форме полосы размером $2960 \times 23 \times 7$ mm. Внешняя поверхность каждого стрипа покрыта тонким слоем вспененного полистирола, имеющего высокий коэффициент диффузного отражения света. В канавку в середине одной из широких граней стрипа вклеено спектросмещающее волокно (файбер) диаметром 1 mm для переизлучения фотонов голубой части видимого светового спектра в зеленую. Фотоны на выходе файбера регистрируются SiPM посредством оптического разъема, вклеенного в стрип [9].

ССД является самостоятельной регистрирующей системой. Сигналы с SiPM одного БМ обрабатываются двумя платами считывающей электроники на базе 32-канальной микросхемы ASIC Petiros 2A [13] в паре с FPGA Altera Cyclone III EP3C16Q240C8N. Синхронизация всех БМ происходит через центральный блок (ЦБ) управления-триггирования [9] на базе Altera DEO-NANO-SoC FPGA Cyclone V [14] с переходными платами для возможности подключения большого количества плат считывания. При заданной кратности поступающих сигналов со сработавших плоскостей ЦБ формирует сигнал о хранении данных в стандарте LVDS и отправляет его во все FPGA плат БМ, а также на считывающую электронику ДДТ, где данная метка служит точкой синхронизации двух детекторов. При этом данные со всех сработавших каналов считываются и передаются системой сбора данных на центральный компьютер по Ethernet. Помимо формирования внутреннего триггерного условия, с помощью FPGA осуществляется управление настройками микросхемы ASIC, блоком напряжения питания SiPM и обмен данными с интерфейсными микросхемами.

1.2. ДДТ

ДДТ представляет собой многоканальную детектирующую систему, состоящую из четырех ОКП [15]. Каждая ОКП формируется из двух камер, состоящих из дрейфовых трубок. Каждая камера дрейфовых трубок размером (Д×Ш×Т) $3520 \times 1460 \times 210$ mm и чувствительной площадью 2960×1453 mm смонтирована на

дюралюминиевом каркасе и представляет собой сборку из 144 дрейфовых трубок, склеенных в три параллельных слоя по 48 трубок и подключенных к системе сбора данных [16]. Средний ряд трубок смещен на половину диаметра трубки, расстояние между центрами любых двух соседних трубок в камере и в плоскости составляет 30 mm. Аналогичные трехслойные сборки дрейфовых трубок используются в мюонном детекторе установки ATLAS на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРН (г. Женева) [17].

Используемая в ДДТ дрейфовая трубка разработана в НИЦ „КИ“-ИФВЭ (г. Протвино) и представляет собой тонкостенный алюминиевый цилиндр с толщиной стенки 0.40 mm, длиной 2996 mm и внешним диаметром 29.97 mm [18]. В качестве анода используется позолоченная сигнальная проволока диаметром 0.05 mm из вольфрам-рениевого сплава (97%W + 3%Re). Все трубки в каждом слое камеры соединены в последовательные цепочки с помощью газовых перемычек. Последняя трубка крайнего слоя камеры соединяется с общим газовым коллектором, в который через регулирующий редуктор подается газовая смесь Ar-CO₂ в соотношении 93:7.

Функционально каждая дрейфовая трубка является самостоятельным каналом регистрации. Для считывания данных используется плата MT-48, которая одновременно регистрирует сигнал с 48 трубок. Каждая камера дрейфовых трубок оснащена тремя независимыми платами считывания MT-48 [16] на базе микросхем Altera EP1K100QC208. Взаимодействие с платами осуществляется через USB-концентратор, а общая синхронизация и прием триггера от ССД выполняется через плату-разветвителя сигналов PMT-48 [16] на базе микросхемы Altera MAX3000ATC100.

2. Методы реконструкции событий

Для реализации методов реконструкции событий были заданы локальная и лабораторная системы координат. Применение двух координатных систем позволяет легко учитывать положение детекторов в пространстве путем перемещения и поворота локальной системы координат относительно лабораторной. Наличие двух систем координат также обосновано применяемыми методами реконструкции событий, основанными на проекциях треков частиц.

Для получения проекции сначала выполняется построение прямой линии в локальной системе координат, унифицированное в каждой однокоординатной плоскости, с использованием в таком случае всего двух координат вместо трех при использовании общей (лабораторной) системы координат.

Для лабораторной системы координат (ЛабСК) выбрана правая прямоугольная система координат [19], начало которой лежит в углу здания размещения прототипа ГМГ. Стрипы и трубки в отдельной координатной

плоскости ориентированы в определенном направлении, совпадающем с направлением либо Y_{Lab} (вертикальной), либо Z_{Lab} (горизонтальной) осей лабораторной системы координат, привязанной к годоскопу. Ось X_{Lab} совпадает с осью детектора, направленной перпендикулярно координатным плоскостям в сторону наблюдаемого объекта.

Начало локальной системы координат (ЛокСК) ССД привязано к координатам первых стрипов БМ ОКП, где ось $X_{\text{loc}}^{\text{SSD}}$ направлена вдоль стрипа, $Z_{\text{loc}}^{\text{SSD}}$ — вдоль нумерации стрипов в сборке БМ, а $Y_{\text{loc}}^{\text{SSD}}$ — в сторону верхней грани стрипа. Начало локальной системы координат ДДТ привязано к координатам первых трубок дрейфовых камер, где ось $X_{\text{loc}}^{\text{DTD}}$ направлена вдоль трубки, $Z_{\text{loc}}^{\text{DTD}}$ — вдоль нумерации трубок в слое, а $Y_{\text{loc}}^{\text{DTD}}$ — в сторону увеличения номера слоя трубок.

Реконструкция параметров трека в детекторах основывается на его регистрации несколькими ОКП. Мюоны пересекают ОКП детектора, что приводит к срабатыванию счетчиков регистрирующей системы. Каждая координатная плоскость дает информацию о сработавших каналах, что позволяет оценить координату точки пересечения мюоном сборки ОКП. Данные нескольких координатных плоскостей с соответствующей ориентацией стрипов (трубок) позволяют провести реконструкцию трека в соответствующих проекционных плоскостях XY и XZ . Информация о двух проекциях дает возможность восстановить трек в пространстве. Совокупность восстановленных треков позволяет построить теневое изображение (мюонограмму) исследуемого объекта в потоке мюонов.

2.1. Реконструкция треков в стриповом детекторе

ССД содержит 6 ОКП сцинтилляционных стрипов: в трех ОКП стрипы ориентированы вдоль оси Y , в остальных трех — вдоль оси Z в ЛабСК. При этом регистрация событий осуществляется выделением межплоскостных совпадений сигналов. Так как каждая проекционная плоскость (XY и XZ) содержит три слоя проекций стрипов (рис. 3), для реконструкции одиночных треков был выбран метод поиска комбинаций сработавших стрипов, лежащих на прямых линиях. Для реконструкции трека проверяется наличие не менее трех сработавших Y -плоскостей и не менее трех Z -плоскостей одновременно, поскольку это позволяет эффективно выделять события с одиночными мюонами среди многочастичных событий. При этом алгоритм отбора событий может быть оптимизирован исходя из установленного триггерного условия межплоскостных совпадений.

При отборе событий искривленные траектории частиц отбрасываются на основе предположения о прямолинейности трека мюона. Поиск трека проводится последовательно для XY - и XZ -проекций ССД. На рис. 4 приведена иллюстрация алгоритма поиска „прямолинейного“ участка по координатам сработавших стрипов в проекционной плоскости XY . Алгоритм основывается на

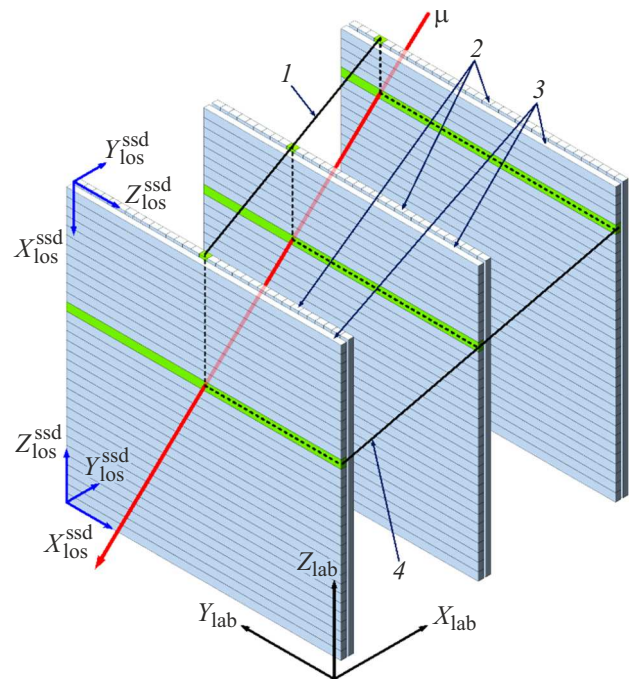


Рис. 3. Нахождение проекций трека в ССД: 1 — XY -проекция, 2 — Z -плоскость, 3 — Y -плоскость; 4 — XZ -проекция.

последовательном переборе всех сработавших стрипов и поиске всех возможных „прямолинейных“ участков. Для окончательной реконструкции трека используются координаты центров сработавших стрипов, для которых прямая линия описывается наилучшим образом. В качестве критерия нахождения сработавшего стрипа на ожидаемом „прямолинейном“ участке используется ширина допустимой области $w = k \cdot 23.1 \text{ mm}$, где 23.1 mm — ширина стрипа плюс расстояние между двумя соседними стрипами в БМ, а k — число, показывающее количество стрипов, входящих в допустимую область поиска сработавших стрипов в ОКП.

В представленной на рис. 4 иллюстрации алгоритма поиск начинается с верхней (начальной) сработавшей плоскости. Точки пересекающей прямой в каждой плоскости нумеруются подряд от младших номеров центров сработавших стрипов к старшим.

Рассматривается массив сработавших точек (i, j) , где j — номер сработавшей точки в плоскости номер i . Для случая, приведенного на рис. 4, берется координата центра первого в ряду сработавшего стрипа (в данном случае 1.3) и соединяется прямой линией с первой точкой (центр первого сработавшего стрипа) на соседней плоскости (2.2). Затем линия продолжается от точки (2.2) и ищется точка пересечения данной линии u_0 с линией, проходящей через центры стрипов. Также из точки (2.2) проводится линия к центру первого сработавшего стрипа следующей плоскости (3.3). Для проверки „прямолинейности“ используется разница Δu между u -координатой середины очередного проверяемого сра-

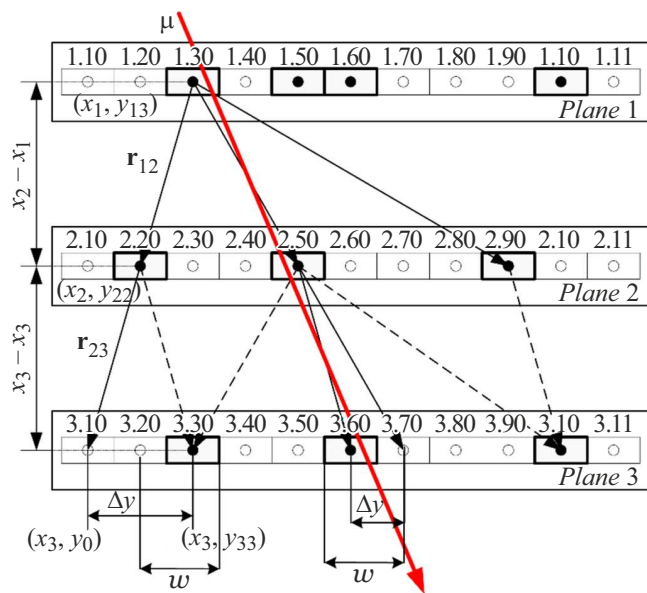


Рис. 4. Иллюстрация алгоритма поиска „прямолинейного“ участка в проекции XY .

ботавшего стрипа (3.3) и y_0 проверяемой плоскости x_3 : $\Delta y = y_{33} - y_0$. Если точка не принадлежит допустимой области (выполнится условие $|\Delta y| > w$), то берется следующая точка на этой же плоскости. Поскольку просмотр точек в плоскости идет в сторону увеличения y , в случае если значение Δy в следующей плоскости положительно и уже превосходит w , происходит возврат к предыдущей плоскости и строится пробная прямая от другой точки с последующим перебором новых точек. Перебор точек делается до тех пор, пока $|\Delta y|$ не станет меньше или равным w (выполнится условие $|\Delta y| \leq w$). Для примера, приведенного на рис. 4, это прямая линия между точками $1.3 \rightarrow 2.5 \rightarrow 3.6$. Для этого участка записываются:

- среднее значение Δy : $\langle \Delta y \rangle$;
- модуль среднего значения Δy : $|\langle \Delta y \rangle|$;
- номера точек, принадлежащие найденному прямолинейному участку.

Аналогично проводится поиск других „прямолинейных“ участков и запись их характеристик как в текущей, так и в других комбинациях сработавших плоскостей. Среди всех найденных участков выбираются те, у которых оказалось меньшее значение параметра $Crit = |\langle \Delta y \rangle|/3$. Затем последовательно проводятся следующие процедуры:

- линейная аппроксимация выбранных точек-кандидатов;
- поиск точек в коридоре шириной L ;
- окончательная линейная аппроксимация всех точек внутри коридора $L = 40$ mm.

Описанная процедура проводится для Y - и Z -стрипов независимо (для XY - и XZ -проекций ССД). Далее по полученным проекциям трека находится трек в простран-

стве. Полученный таким образом трек частицы (прямая) далее используется для анализа угловых распределений и построения мюнограмм.

2.2. Реконструкция треков в дрейфовом детекторе

Для реконструкции событий в ДДТ используется информация о координатах центров сработавших трубок (анодных проволочек) и их времена срабатывания.

Регистрация событий осуществляется непрерывно в течение последовательных интервалов („окон“) длительностью 16.8 ms. При этом фиксируется время появления импульса с дискретностью 1 ns относительно начала „окна“ регистрации. Поскольку в промежутке „окна“ через детектор может проходить несколько мюонов, для их разделения на одиночные частицы выполняется процедура кластеризации — поиск последовательных групп (кластеров) сработавших трубок, для которых разница времен срабатывания не превышает 800 ns (максимальное время дрейфа). В качестве критерия прохождения через ДДТ одиночной частицы используется условие наличия сигналов от не менее 11 трубок во всех четырех однопроекционных координатных плоскостях, причем в каждой плоскости детектора должно быть не менее двух сработавших трубок. На рис. 5 показан пример кластеризации событий в „окне“ по времени для одной камеры дрейфовых трубок, цветовая градация показывает времена срабатывания трубок.

При выполнении условия „не менее 11 трубок“ в детекторе осуществляется реконструкция сегментов трека в камерах, в которых обнаружены кластеры. Каждая трехслойная камера на дрейфовых трубках позволяет получить лишь проекцию сегмента трека в соответствующей координатной плоскости: XY или XZ .

Реконструкция сегмента трека основана на оценке расстояний от центров анодных проволочек до прошедшего через них трека по относительным временам их срабатывания. Это делается по $r(t)$ -зависимости, которая получается по результатам калибровки, основанной на процедуре кластеризации всех событий в окне 168 s. Для трубок каждого кластера вычисляются относительные времена срабатывания. Для этого из времен срабатывания трубок кластера вычитается минимальное из времен t_0 . При этом относительное время срабатывания каждой трубки в кластере получается систематически смещенным в сторону меньших времен. Затем по всем кластерам, выделенным во временном окне, строится суммарный временной спектр (рис. 6). Из полученного распределения удаляется нулевой бин и выполняется

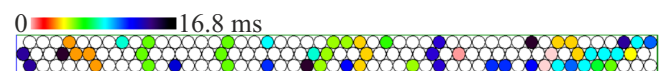


Рис. 5. Кластеризация событий по времени внутри одного „окна“ набора данных.

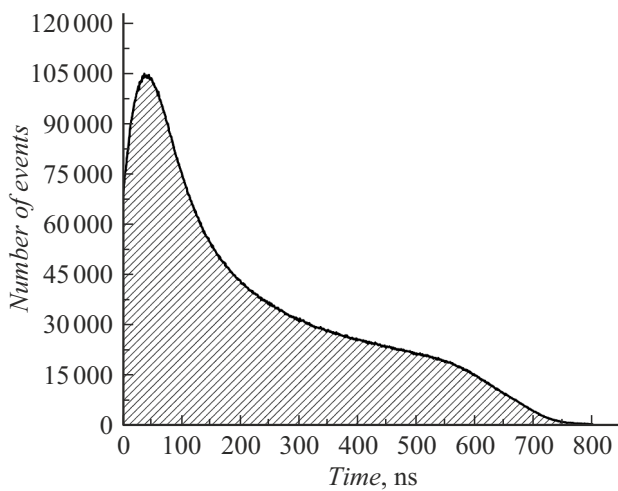


Рис. 6. Временной спектр кластеризованных сигналов.

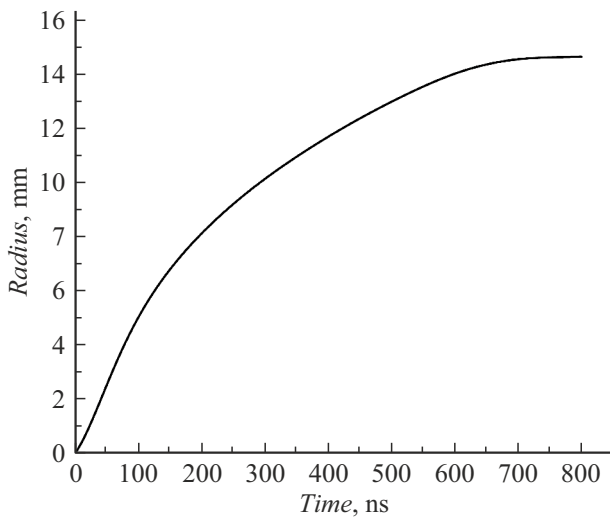


Рис. 7. Зависимость $r(t)$, полученная из интеграла временного спектра.

интегрирование относительно радиуса трубки. Получившаяся кривая (рис. 7) представляет собой искомую $r(t)$ -зависимость для одной трубки. Данная зависимость связывает время срабатывания относительно t_0 для кластера, в котором находится трубка, и расстояние от проволоочки этой трубки до трека частицы.

После выделения групп (кластеров) сработавших трубок находятся проекции треков, которые могли бы дать наблюдаемую комбинацию сработавших трубок в группе.

Алгоритм строится на методе преобразования Хафа (Hough Transform) [20]. На рис. 8 приведены локальные и лабораторная системы координат, которые используются для реконструкции трека с помощью ДДТ. Трек состоит из двух сегментов в каждой проекции, которые представляются в параметрическом виде (в ЛокСК ось Z направлена вдоль нумерации трубок, а ось Y вдоль

нумерации слоев сборок трубок):

$$z \sin(\varphi) + y \cos(\varphi) = c. \quad (1)$$

Данное представление удобно тем, что позволяет линейным образом вычислять расстояние от трека до произвольной точки (y_0, z_0) , которая определяет координату анодной проволоочки сработавшей дрейфовой трубки в системе координат (r, φ) :

$$r = c - \sin(\varphi)z_0 - \cos(\varphi)y_0. \quad (2)$$

В этом случае задача реконструкции сводится к нахождению касательной, оптимальным образом описывающей окружности в сработавших трубках кластера, радиусы которых определяются по $r(t)$ -зависимостям. Касательная прямая $ay + bz + c = 0$ (рис. 9) может быть получена из уравнения (2) введением следующих обозначений: $a = \cos(\varphi)$; y — координата оси абсцисс; $b = \sin(\varphi)$; φ — угол наклона радиус-вектора; z — координата оси ординат; $c = -r$; r — радиус-вектор.

Легко заметить, что расстояние определяется со знаком, который может быть фиксирован введением ориентации на треке. С практической точки зрения удобно рассматривать трек, распространяющийся в направлении Y . Такой выбор фиксирует знак $\sin(\varphi) > 0$.

Параметры трека получаются в результате минимизации функционала методом наименьших квадратов,

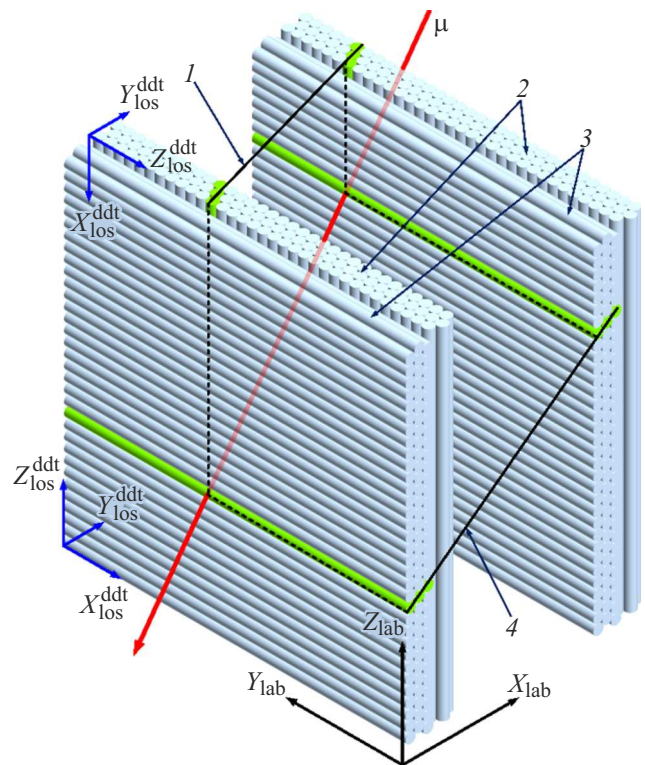


Рис. 8. Нахождение проекций трека в ДДТ: 1 — XY -проекция; 2 — Z -плоскость; 3 — Y -плоскость; 4 — XZ -проекция.

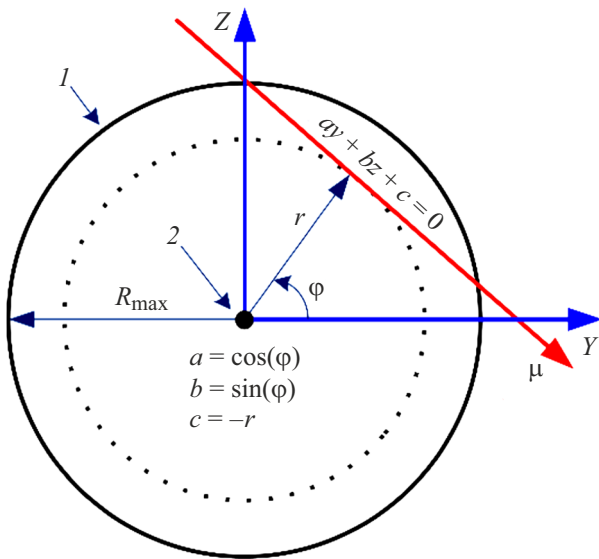


Рис. 9. Иллюстрация уравнения касательной к окружности: 1 — катод, 2 — анод.

основанном на алгоритме Левенберга–Марквардта [21]:

$$X^2(a, b, c) = \sum_i^N \frac{(ay_i + bx + c - r_i)^2}{(\sigma_{r_i})^2}, \quad (3)$$

где N — количество сработавших трубок, значение σ_r учитывает время прохождения сигнала по проволоке, время пролета мюона, собственное разрешение трубок и вклад многократного рассеяния на материале детектора.

При реконструкции проекций треков частиц в пространстве недостаточно рассматривать каждую камеру по отдельности, необходимо анализировать срабатывание всех проекций совместно. Это обусловлено тем, что, в общем случае, локальная система координат ОПК может быть смещенной и повернутой на некоторый угол как относительно локальной системы координат другой плоскости с подобной ориентацией камер, так и относительно ЛабСКС. Значения смещений и поворотов определяются качеством монтажа камер и плоскостей в целом, и перед проведением измерений тщательно измеряются.

Далее проводится поиск сегментов в разных камерах, принадлежащих одной проекции трека. Для этого в каждой камере одной проекции по найденным прямым (сегментам трека частицы) ищутся подобные, угол между которыми не превышает $\Delta\varphi = 5^\circ$. Происходит сшивка двух сегментов. Для этого через каждый сегмент трека проводится плоскость параллельно направлению трубок.

После нахождения проекционных плоскостей треков в отдельных камерах необходимо сопоставить их между собой для нахождения общей проекции трека, которая соответствует треку одной частицы. Так как дрейфовые камеры расположены на некотором расстоянии друг от друга и ориентация их осей может быть различна из-за погрешностей монтажа, для сопоставления проекций

необходимо найти уравнение общей поверхности (4). Сделать это можно через вектор нормали к поверхности $n = (A, B, C)$:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (4)$$

$$A = \frac{V_x}{|V|}; B = \frac{V_y}{|V|}; C = \frac{V_z}{|V|}; D = -\frac{(P_1V)}{|V|}, \quad (5)$$

$$V = (P_2 - P_1) \times (P_3 - P_1), \quad (6)$$

где A, B, C — единичные векторы в соответствующих осях, D — расстояние от начала системы координат до рассматриваемой плоскости, P_1 и P_2 — середины проекции первой ОПК в X_{Loc}^{DTP} -координате начала и конца рабочей зоны трубки соответственно, P_3 и P_4 — середины проекции второй ОПК в X_{Loc}^{DTP} -координате начала и конца рабочей зоны трубки соответственно.

Аналогичным образом находится плоскость в другой проекции. После этого по нормализованному векторному произведению перпендикуляров двух пересекающихся плоскостей (7) находятся направляющие косинусы искомой прямой линии, которая и будет являться треком частицы:

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

2.3. Метод построения мюонограмм

Метод построения мюонограмм для ССД и ДДТ одинаков. Построение начинается с определения положения сработавших каналов (центров трубок или стрипов) при пролете частицы и получении трека по проекционным плоскостям XY и XZ в лабораторной системе координат. Далее ищется точка (X_1, Y_1, Z_1) пересечения реконструированного по проекционным плоскостям трека с некоторой референтной плоскостью размером Y_L и Z_L , заданной на расстоянии $X = L$ перпендикулярно оси и проходящей через исследуемый объект (рис. 10). Геометрические размеры референтной плоскости определяются размерами зоны поиска, в которой находится исследуемый объект.

Площадь плоскости, определяемая значением $Y_L Z_L$, разбивается на ячейки с шагом $\Delta y, \Delta z$, образуя матрицу M размерностью $k = \text{int}(Y_L/\Delta y), m = \text{int}(Z_L/\Delta z)$. При пересечении l -м треком плоскости в точке с координатами y_l и z_l определяется номер ячейки матрицы M , в которую „попала“ линия трека мюона, проведенная от детектора к плоскости (в обратном треку направлении). Соответственно в данную ячейку матрицы, содержащую информацию о количестве попаданий трека, прибавляется единица $M[i, j] = M[i, j] + 1$.

В первом приближении координатное разрешение деталей объекта в матрице M связано с координатным разрешением годоскопа через следующее отношение:

$$\Delta Y \approx (L/b)\delta y, \quad \Delta Z \approx (L/b)\delta z, \quad (8)$$

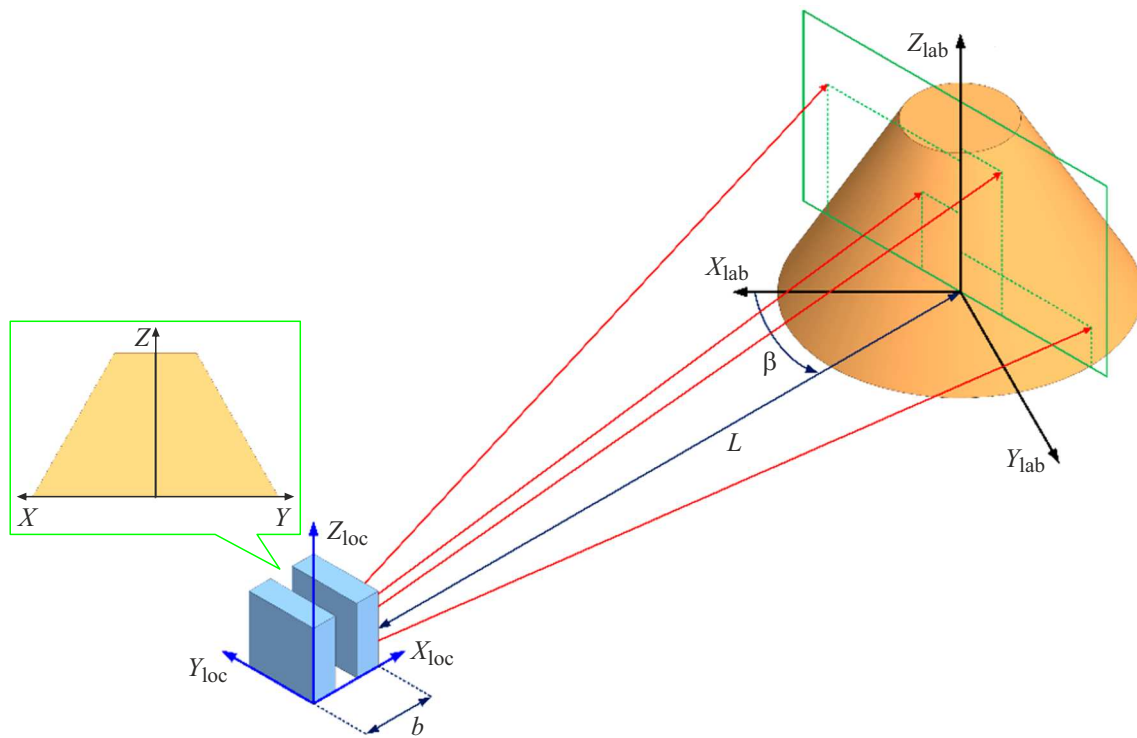


Рис. 10. Схема построения мюонограмм.

где ΔY и ΔZ — погрешности в положении объекта на расстоянии L от точки наблюдения, δy и δz — разрешение годоскопа, b — длина базы годоскопа (расстояние между крайними плоскостями).

Для локализации на мюонограмме областей с динамическими изменениями в структуре изучаемого детектора применяется разностный метод. В основе метода лежит вычитание из статической мюонограммы M_s динамической мюонограммы M_d . При этом статическая мюонограмма формируется по результатам длительной экспозиции, в течение которой никаких динамических изменений не наблюдалось. Динамическая мюонограмма соответственно получается во время предполагаемых динамических изменений. Статическая мюонограмма нормируется на статистику динамической. Так как распределение числа зарегистрированных треков мюонов по ячейкам матрицы имеет статистический характер, необходимая точность измерения может быть достигнута за счет увеличения объема экспериментальных данных.

Значения разностной матрицы M_δ находятся по формуле

$$M_\delta = \frac{M_d - M_s d}{\sqrt{M_s d}}, \quad (9)$$

где d — нормировочный коэффициент, рассчитанный по формуле:

$$d = \frac{\sum_{i,j} (M_d[i, j])}{\sum_{i,j} (M_s[i, j])}. \quad (10)$$

Для более четкого проявления отклонений, связанных с динамическими изменениями в структуре объекта, при вычитании матриц дополнительно применяется гауссов фильтр низких частот [22], который учитывает вес каждой ячейки матрицы. Использование фильтра Гаусса низких частот с радиусом R_F дает следующее соотношение:

$$n_{i,j} = \frac{\sum_{l,m} (f_k n_{l,m})}{\sum_{l,m} (f_k)}, \quad (11)$$

$$f_k = \exp\left(-\frac{(l-i)^2 + (m-j)^2}{2R_F^2}\right), \quad (12)$$

где $n_{i,j}$ — значение в ячейке (i, j) после фильтра, $n_{l,m}$ — значение в ячейке (l, m) до фильтрации.

При формировании сглаженной разностной мюонограммы отклонения количества обнаруженных событий в ячейке (i, j) от значения в этой ячейке для статической мюонограммы в единицах статистических погрешностей $\Delta n_{i,j}/\sigma(n_{i,j})$ с учетом дисперсий значений ячеек, участвующих в сглаживании, применяются следующие выражения:

$$\Delta n_{i,j} = \frac{\sum_{l,m} (f_k n_{l,m})}{\sum_{l,m} (f_k)} - \frac{\sum_{l,m} (f_k \overline{n_{l,m}})}{\sum_{l,m} (f_k)}, \quad (13)$$

$$\sigma(n_{i,j}) = \frac{\sqrt{\sum_{l,m} (f_k^2 \overline{n_{l,m}})}}{\sum_{l,m} (f_k)}. \quad (14)$$

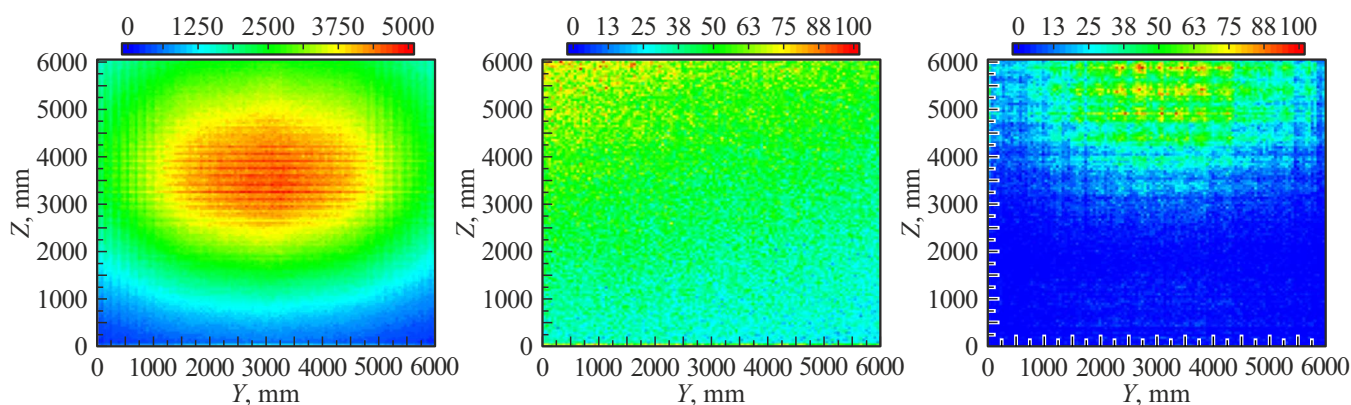


Рис. 11. Базовые матрицы: ДДТ на расстоянии 5.3 м (слева), ДДТ на расстоянии 37.5 м (в центре) и ССД на расстоянии 5.3 м (справа).

3. Мюнография свинцовых сборок

Для проверки возможности реализации метода мюнографии с помощью полнофункционального прототипа ГМГ были проведены экспериментальные серии измерений по локализации тестовых объектов — сборок свинцовых кирпичей, расположенных в определенных точках в пределах апертюры детектора. Другой целью экспериментов являлась оценка точностных характеристик разработанной регистрирующей системы и методов обработки данных.

Первоначально в течение месячной экспозиции была проведена экспериментальная серия по получению мюнограммы M_s без тестовых объектов в апертюре детектора. После завершения измерений были последовательно установлены тестовые объекты (свинцовые сборки) в пределах апертюры на разных расстояниях и высотах. Для каждого положения объекта проводилось новое измерение в течение 14 days и формировались мюнограммы M_d . Далее для получения разностных мюнограмм M_δ применялся метод, описанный в разд. 2.3. На основании анализа мюнограмм M_δ делалось заключение о координатах и размерах расположения тестовых объектов.

За время эксперимента были использованы несколько тестовых объектов: сборка свинцовых кирпичей с размерами $200 \times 200 \times 205$ mm (была размещена прямо напротив детектора на высотах 1.2 и 1.6 m на расстоянии 5.3 m от его центра) и сборка свинцовых кирпичей размером $400 \times 400 \times 430$ mm (была установлена на третьем этаже соседнего здания на высоте 10.3 m на расстоянии 37.5 m под азимутальным углом 17°).

На рис. 11 показаны базовые матрицы с ячейками 50×50 mm, полученные по данным ДДТ и ССД. Различная интенсивность точек в поле матрицы говорит о пространственно-угловом распределении восстановленных треков мюонов (в штуках). На матрице ССД можно заметить сетчатую структуру, которая обуслов-

лена наличием зазоров между стрипами однослойной конструкции координатной плоскости.

На рис. 12, *a, b* приведены разностные мюнограммы, полученные по данным ДДТ при локализации первого тестового объекта на высотах 1.2 и 1.6 m и расстоянии 5.3 m по горизонтали от центра прототипа ГМГ. На рис. 12, *c* приведена разностная мюнограмма по данным ДДТ для второго объекта, расположенного на высоте 10.3 m и на расстоянии 37.5 m. Соответствующая мюнограмма для первого объекта на высоте 1.6 m по данным ССД приведена на рис. 12, *d*. На рисунках дополнительно построены графики с гистограммами разрезов вдоль горизонтальной и вертикальной красных линий и диагональной синей линии. В разностных матрицах области с синим цветом соответствуют недостатку событий в угловом распределении мюонов, красным — избыток. Квадратами обозначены ожидаемые размеры и местоположение искомого объекта. Для лучшего проявления отклонений при вычитании матриц дополнительно применялся гауссов фильтр низких частот, который учитывает вес каждой ячейки матрицы.

Как можно видеть, на полученных разностных матрицах присутствуют несколько областей с недостатком событий. Это вызвано различными флуктуациями в регистрируемых данных и их малой статистической обеспеченностью, в результате чего различные изменения в потоке частиц и работе детектора сказываются на конечном результате. Выделение пятна искомого объекта среди остальных (ложных) пятен осуществляется путем перемещения референтной плоскости вдоль оси X_{Lab} вблизи искомого объекта. В этом случае пятна, вызванные статистическими флуктуациями, изменяются и перемещаются сильнее пятна с искомым объектом, которое практически стабильно. В качестве количественной оценки при этом используется величина отклонения, которая в случае флуктуаций (ложных пятен) меняется сильнее, чем в искомом объекте.

По гистограммам разностной матрицы были оценены точность локализации и размеры наблюдаемого объекта,

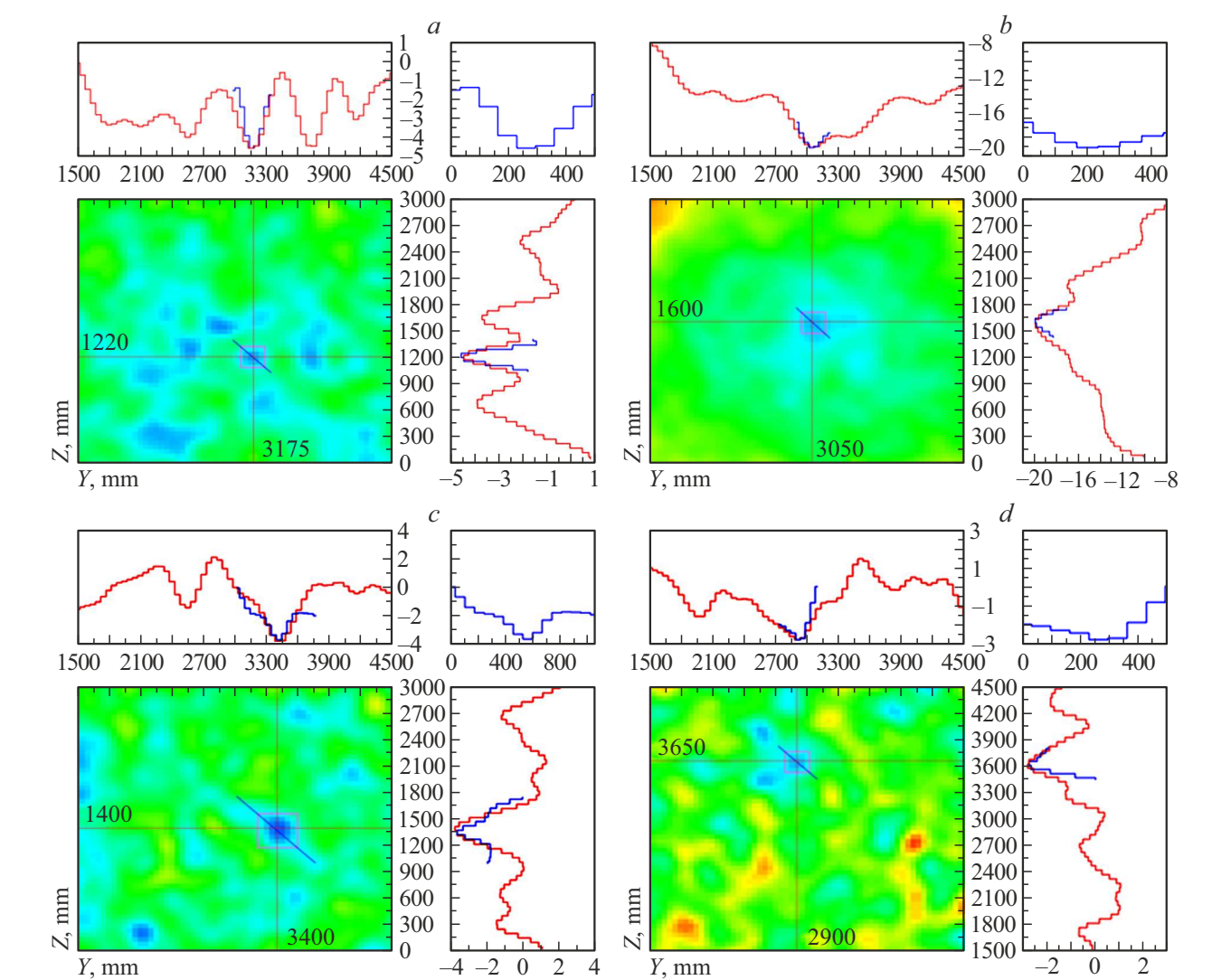


Рис. 12. Разностные матрицы: *a* — ДДТ с объектом на высоте 1.2 м; *b* — ДДТ с объектом на высоте 1.6 м; *c* — ДДТ с объектом на высоте 10.3 м; *d* — ССД с объектом на высоте 1.6 м.

Результаты измерений размеров тестовых объектов

№ п/п	Параметр (координат)	Реальный размер, mm	Измеренный размер, mm	Абсолютная погрешность размера, mm	Реальное положение, mm	Измеренное положение, mm	Абсолютная погрешность положения, mm
1	Ширина (Y)	200	192.1	−7.8	3156	3162.6	6.6
	Высота (Z)	205	197.7	−7.2	1203	1214.8	11.8
2	Ширина (Y)	200	203.4	3.4	3052	3051.3	−0.6
	Высота (Z)	205	206.7	1.7	1601	1563.1	−37.8
3	Ширина (Y)	400	345.8	−54.1	3386	3416.5	30.5
	Высота (Z)	430	460.6	30.6	1468	1382.3	−85.6

которые приведены в таблице. Средние отклонения в размерах по измеренным данным составили ± 10 mm на расстоянии 5.3 m от детектора и ± 100 mm на расстоянии 37.5 m. Оценочная угловая точность детектора по полученным результатам составляет ~ 2 mrad.

Закключение

В со бранном в НИЯУ МИФИ прототипе гибридного мюонного годоскопа была реализована модульная схема сборки детектирующей и регистрирующих систем, ко-

торая в дальнейшем была использована при создании полноразмерного широкоапертурного прецизионного гибридного мюонного годоскопа.

По результатам экспериментальных серий измерений были получены первые результаты, подтверждающие работоспособность разработанных систем гибридного мюонного годоскопа и возможность получения мюонограмм на его основе. По результатам обработки экспериментальных данных на обоих детекторах был отработан разностный метод построения мюонограмм для выделения объектов, расположенных на различных расстояниях и высотах относительно центра детектирующей системы. Основной проблемой метода оказалась ограниченность статистики динамической мюонограммы, что привело к возникновению статистических флуктуаций в конечной разностной мюонограмме и усложнило обнаружение реального положения области дефицита мюонов, связанной с наличием тестового объекта. Несмотря на это, по данным обоих детекторов были получены мюонограммы сборок из свинцовых кирпичей, анализ которых дал возможность определить их размеры и положение в пространстве, а также оценить точность локализации.

Благодарности

Авторы благодарят коллектив НОЦ НЕВОД (НИЯУ МИФИ) за содействие при выполнении работ по созданию мюонного годоскопа, а также коллектив ИРТ-2000 (НИЯУ МИФИ) за возможность проведения эксперимента со свинцовыми сборками.

Финансирование работы

Разработка и исследование гибридного мюонного годоскопа проводились в рамках договоров между Национальным исследовательским ядерным университетом „МИФИ“ и АО „Всероссийский Научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций“ от 19.11.2019 № 00-3-700-0650 и АО „Всероссийский Научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций“ с АО „Наука и инновации“ от 09.04.2019 № 313/1658-Д.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Simpson, A. Clarkson, S. Gardner, R.A. Jebali, R. Kaiser, D. Mahon, J. Roe, M. Ryan, C. Shearer, G. Yang. Appl. Radiat. Isot., **157**, 109033 (2020). DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.109033
- [2] C. Park, K.B. Kim, Y.S. Chung, M.K. Baek, I. Kang, S. Lee, H. Chung, Y.H. Chung. Nucl. Instrum. Methods A, **1040**, 167081 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167081
- [3] J. Saraiva, C. Alemparte, D. Belver, A. Blanco, J. Callon, J. Collazo, A. Iglesias, L. Lopes. Nucl. Instrum. Methods A, **1050**, 168183 (2023). DOI: 10.1016/j.nima.2023.168183
- [4] Н.С. Барбашина, В.В. Борог, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, Д.А. Тимашков, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. *Способ и устройство для получения мюонографий* (Патент RU2406919C2 от 20.12.2010, Федеральный ин-т промышленной собственности, URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/4e/6d/b5/12929dad5e5150/RU2406919C2.pdf>)
- [5] И.И. Астапов, М.М. Каверзнев, Ю.Н. Конев, А.А. Петрухин, С.С. Хохлов, И.И. Яшин. *Мюонный годоскоп и устройство для диагностики объектов* (Патент RU2761333C1 от 07.12.2021 Федеральный ин-т промышленной собственности, URL: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/761/333/%D0%98%D0%97-02761333-00001/document.pdf>)
- [6] I.I. Yashin, N.N. Davidenko, A.O. Dovgopoly, R.M. Fakhroutdinov, M.M. Kaverznev, K.G. Kompaniets, Yu.N. Konev, A.S. Kozhin, E.N. Paramoshkina, N.A. Pasyuk, M.Yu. Tselinenko, O.P. Yuschenko, O.V. Zolotareva. Phys. Atom. Nucl., **84**, 1171 (2021). DOI: 10.1134/S1063778821130421
- [7] I.I. Yashin, V.V. Kindin, K.G. Kompaniets, N.N. Pasyuk, M.Yu. Tselinenko. Bull. Russ. Academ. Sci.: Phys., **85**, 458 (2021). DOI: 10.3103/S1062873821040389
- [8] А.А. Борисов, М.Ю. Боголюбский, Н.И. Божко, А.Н. Исаев, А.С. Кожин, А.В. Козелов, И.С. Плотников, В.А. Сенько, М.М. Солдатов, Р.М. Фахрутдинов, Н.А. Шаланда, О.П. Ющенко, В.И. Якимчук. ПТЭ, **2**, 5 (2012).
- [9] Н.А. Пасюк, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, М.Ю. Целиненко, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. ПТЭ: принята к публикации 06.12.2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.21424.53762 (препринт).
- [10] Сайт ООО „Унипласт“, URL: <http://www.uniplast-vladimir.com>
- [11] Сайт фирмы KURARAY, URL: <http://kuraraypsf.jp/psf/ws.html>
- [12] Datasheet HAMAMATSU MPPC S13360 series — Cat. No. KAPD1052E04 Aug. 2016 DN.
- [13] Сайт фирмы Weeroc, URL: <https://www.weeroc.com/products/sipm-read-out/petiroc-2a>
- [14] Сайт фирмы Terasic, URL: <https://www.terasic.com.tw/en/>
- [15] Н.А. Пасюк, А.А. Борисов, К.Г. Компаниец, А.С. Кожин, Р.М. Фахрутдинов, М.Ю. Целиненко, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. ПТЭ: принята к публикации 14.08.2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.15552.51200(препринт).
- [16] Н.И. Божко, А.Н. Исаев, А.С. Кожин, И.С. Плотников, В.И. Сенько, М.М. Солдатов, Н.А. Шаланда, В.И. Якимчук. *Система накамерной электроники на основе модуля МТ-48 для бестриггерного режима работы томографа на космических мюонах* (Препринт ИФВЭ 2015—13. Протвино, 2015)
- [17] J. Bensinger, N. Bojko, A. Borisov, R. Fakhroutdinov, S. Goryatchev, V. Goryatchev, V. Gushchin, K. Hashemi, A. Kojine, A. Kononov, A. Larionov, E. Paramoshkina, A. Pilaev, N. Skvorodnev, A. Tchougouev, H. Wellenstein. Nucl. Instrum. Methods A, **494**, 480 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01535-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01535-8)

- [18] A. Borisov, R. Fakhroutdinov, A. Kojine, A. Larionov, A. Pilaev, V. Rybatchenko, Yu. Salomatin. Nucl. Instrum. Methods A, **494**, 214 (2002). DOI: 10.1016/S0168-9002(02)01468-7
- [19] Г.Ф. Лаптев. *Элементы векторного исчисления* (Наука, М., 1975), с. 38.
- [20] A.S. Hassanein, S. Mohammad, M. Sameer, M.E. Ragab. IJCSI, **12** (1), 139 (2015). DOI: 10.48550/arXiv.1502.02160
- [21] K. Madsen, H.B. Nielsen, O. Tingleff. *Methods for Non-Linear Least Squares Problems* (IMM, DTU, Lyngby, 2004)
- [22] Р. Гонсалес, Р. Вуде, С. Эддинс. *Цифровая обработка изображений* (Техносфера, М., 2012), с. 329.