15

Мюонография структуры энергоблока Калининской АЭС

© Н.А. Пасюк,[1] Р.Р. Алыев,[2] Н.Н. Давиденко,[3] С.М. Киселев,[2] А.С. Кожин,[1,4] К.Г. Компаниец,[1] Ю.Н. Конев,[3] С.В. Олейник,[3] А.А. Петрухин,[1] Р.М. Фахрутдинов,[1,4] М.Ю. Целиненко,[1] В.В. Шутенко,[1] И.И. Яшин[1]

[1] Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
[2] Филиал АО „Концерн Росэнергоатом“ „Калининская атомная станция“,
171841 Удомля, Тверская обл., Россия
[3] Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций,
109507 Москва, Россия
[4] Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“,
142281 Протвино, Московская обл., Россия
e-mail: NAPasyuk@mephi.ru

Поступило в Редакцию 9 августа 2024 г.
В окончательной редакции 20 октября 2024 г.
Принято к публикации 21 октября 2024 г.

Изложены результаты проведенных в 2022–2023 гг. экспериментальных исследований внутренней структуры энергоблока Калининской АЭС с использованием метода мюонографии. Представлены описание конструкции гибридного мюонного годоскопа, метод построения мюонограмм, а также результаты первого эксперимента, проведенного в условиях нормальной эксплуатации энергоблока. Годоскоп был создан в НИЯУ МИФИ в 2022 г. для исследования внутренней структуры крупномасштабных объектов методом мюонографии. Детектирующая система годоскопа имеет гибридную структуру и состоит из сцинтилляционного стрипового детектора и детектора на дрейфовых трубках и предназначена для регистрации треков заряженных частиц в основном мюонов. Для каждого детектора были разработаны регистрирующие системы, методы обработки данных и реконструкции треков частиц.

Ключевые слова: мюоны космических лучей, детекторы частиц, сцинтилляционные стрипы, сцинтилляционный детектор, дрейфовые трубки, мюонный годоскоп, мюонография, мюонограмма, ядерный реактор.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59477.251-24

Введение

Поток мюонов образуется в верхних слоях атмосферы в результате взаимодействия протонов и ядер первичных космических лучей, а также вторичных адронов, с ядрами атомов атмосферы. Мюоны обладают значительной проникающей способностью, так как при характерной средней энергии на уровне моря от 4 до 100 GeV в зависимости от зенитного угла теряют энергию в основном на ионизацию. Одной из особенностей потока мюонов является зависимость его интенсивности и средней энергии от зенитного угла (отсчитываемого от вертикали): $I(\theta) = I(\theta_0) \cdot \cos^n \theta$, где показатель $n = n(p)$ является функцией импульса (энергии) мюонов [1]. Способность мюонов проникать через большие толщи вещества лежит в основе методов просвечивания масштабных природных или промышленных объектов.

Анализ изменений в пространственно-угловом распределении мюонов при прохождении через крупномасштабный объект может дать информацию о массовом составе и распределении плотности вещества, через которое они пролетели. Этот метод получил название мюонографии (по аналогии с рентгенографией).

Одним из первых метод мюонографии применил Л.У. Альварес в 1970 г. для поиска скрытых помещений в Великой пирамиде в Гизе [2]. В настоящее время мюонография применяется для неразрушающего контроля и создания изображений-мюонограмм с использованием различных методов визуализации: от двумерного анализа с использованием измерения ослабления потока мюонов до трехмерной мюонной томографии на основе многократного кулоновского рассеяния мюонов при их прохождении через вещество [3–5].

Метод мюонографии применяется для исследования различных объектов, включая мощные турбулентные явления в атмосфере и магнитосфере Земли (ураганы, мощные грозы, шквалы, снежные бури) [6–8], пирамиды [9,10], вулканы [11,12], геологические [13,14], археологические [15,16] и промышленные [17–20] объекты и т.д. Важная роль отводится мюонографии в разработке методов контроля за перемещением тяжелых делящихся веществ [21,22] и дистанционного мониторинга реакторов [23–25]. Особый интерес к мюонографии ядерных реакторов возник в связи с аварией на АЭС Фукусима-дайити [26–28]. Метод дистанционного зондирования аварийных реакторов с помощью мюонов оказался единственным, с помощью которого были получены оценки распределения расплавленного топлива внутри реакторной зоны.

С целью разработки методов мониторинга и неразрушающего контроля крупномасштабных объектов в

режиме реального времени, в том числе энергоблоков АЭС, с использованием метода мюонографии [29], в НОЦ НЕВОД (НИЯУ МИФИ) в сотрудничестве с АО „ВНИИАЭС“ (Росатом) был создан и протестирован мобильный гибридный мюонный годоскоп. В настоящей работе описываются особенности детектирующей и регистрирующей систем мюонного годоскопа, а также обсуждаются результаты первого эксперимента по мюонографии энергоблока с реактором ВВЭР-1000 на Калининской АЭС (г. Удомля), полученные в 2022 г. в режиме его штатной работы.

1. Конструкция гибридного мюонного годоскопа

Конструкция гибридного мюонного годоскопа (ГМГ) [30] имеет модульную структуру и состоит из двух независимых систем: детектора на дрейфовых трубках (ДДТ) [31] и сцинтилляционного стрипового детектора (ССД) [32]. Оба детектора имеют свои преимущества, и при совместной работе дополняют друг друга. Сцинтилляционный детектор прост в эксплуатации, дает возможность организовать быстрый триггер и оперативно реконструировать треки мюонов. ДДТ обеспечивает одно из лучших координатных разрешений треков мюонов, уступающее только ядерным эмульсиям.

Годоскоп (рис. 1) состоит из 10 чередующихся ортогонально ориентированных однопроекционных координатных плоскостей (ОКП) с чувствительной площадью 3×3 m каждая. Шесть плоскостей составляют сцинтилляционный детектор и четыре плоскости — ДДТ. Плоскости ДДТ состоят из трехслойных сборок 288 дрейфовых трубок длиной 3000 mm и диаметром 30 mm [31,33]. Плоскости ССД состоят из 128 длинных узких прямоугольных сцинтилляционных стрипов ($3000 \times 23 \times 7$ mm) с оптоволоконным светосбором на кремниевые фотоумножители (SiPM) [32,34]. Расстояние между крайними ОКП составляет 1.8 m.

Все плоскости объединены в основной несущей раме, которая представляет собой короб, состоящий из верхней, нижней и боковых обвязок (рис. 1). Рама закреплена на поворотной платформе (рис. 2), соединенной с мобильным модулем на двухосном шасси с выдвижными опорами. Это обеспечивает подвижность и удобство ориентации всей конструкции относительно исследуемого объекта. Перемещая ГМГ вокруг исследуемого объекта и просвечивая его из нескольких направлений, можно получить 3*D*-изображение (томографию). На раме также закреплена газовая система ДДТ с газовыми коллекторами. Габариты собранного ГМГ составляют 4.5 m в высоту, 2.5 m в ширину, 6.2 m в длину. Масса собранного ГМГ составляет около 4.5 t.

В 2022 г. были проведены исследования точностных характеристик годоскопа в НИЯУ МИФИ с использованием свинцовых блоков, размещенных на различных расстояниях и высотах [35]. Была продемонстрирована

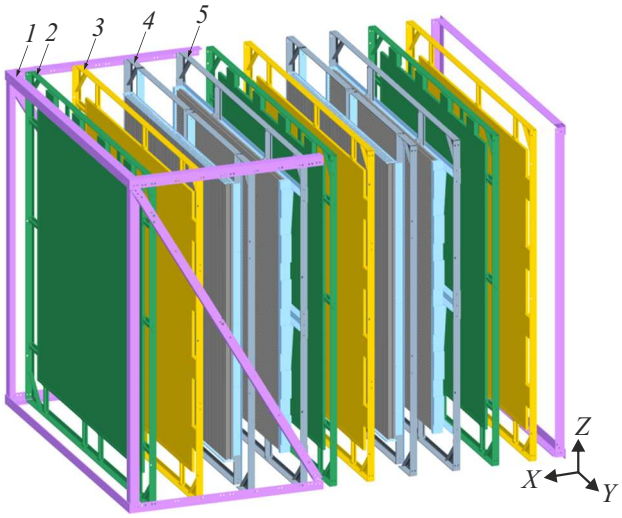


Рис. 1. 3*D*-модель ГМГ: *1* — основная несущая рама; *2* — плоскость ССД с вертикально-ориентированными стрипами; *3* — плоскость ССД с горизонтально-ориентированными стрипами; *4* — плоскость ДДТ с вертикально-ориентированными трубками; *5* — плоскость ДДТ с горизонтально-ориентированными трубками.



Рис. 2. Фотография ГМГ.

угловая точность около 2 mrad при локализации объектов размером $40 \times 40 \times 40$ cm на расстоянии до 40 m.

В 2022–2023 гг. с использованием ГМГ были проведены эксперименты по мюонографии энергоблока Ка-



Рис. 3. Размещение ГМГ относительно энергоблока.

лининской АЭС (г. Удомля). ГМГ размещался на расстоянии около 70 m от центра реактора на площадке в специальном пневмокаркасном модуле (рис. 3) размером 8.2×8.2 m с высотой 6.4 m [36]. Кроме пневмокаркасного модуля и ГМГ, стенд включал в себя аппаратную стойку, газовые баллоны, систему электрического питания и систему пожарной сигнализации. После установки и фиксации ГМГ координатные плоскости были наклонены на 12° для лучшего захвата мюонного потока, проходящего через наблюдаемый объект.

2. Метод построения мюонограмм

Для получения мюонограммы строится матрица на плоскости, перпендикулярной оси детектора. Каждая ячейка этой матрицы содержит информацию о количестве пересечений реконструированных треков, проходящих через нее. При этом для реконструкции событий в детекторах ГМГ и последующего построения мюонограмм определены локальная и лабораторная системы координат [35]. Использование двух систем координат (рис. 4) позволяет легко учитывать положение детекторов в пространстве с помощью перемещения и поворота локальной системы координат относительно лабораторной. Лабораторная система координат представлена правой прямоугольной системой, начальная точка которой расположена в углу несущей рамы 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 (рис. 4). Ось X_{lab} совпадает с осью детектора, направленной перпендикулярно координатным плоскостям в сторону наблюдаемого объекта. Начало локальной системы координат в ССД привязано к координатам первых стрипов ОКП, а в ДДТ — к координатам первых трубок дрейфовых камер.

Реконструкция параметров трека в детекторах основывается на его регистрации несколькими ОКП [35]. 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 трехмерном пространстве (рис. 5). Более подробно методы реконструкции событий и построения мюонограмм в детекторах ГМГ описаны в работе [35].

После реконструкции трека определяется точка его пересечения с референтной плоскостью, заданной на расстоянии L от детектора перпендикулярно оси X лабораторной системы координат и проходящей через исследуемый объект (рис. 5). Размеры этой плоскости Y_L и Z_L соответствуют зоне поиска исследуемого объекта. Площадь этой плоскости, определяемая значением $Y_L \times Z_L$, разбивается на ячейки с шагом Δy, Δz, формируя матрицу M размерностью $k = \text{int}(Y_L/\Delta y)$, $m = \text{int}(Z_L/\Delta z)$. При пересечении треком плоскости определяется номер соответствующей ячейки матрицы $M[i, j]$, в которую попала линия трека мюона, про-

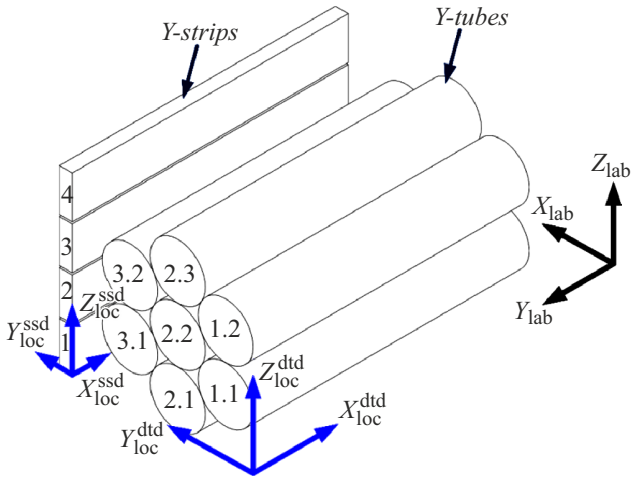


Рис. 4. Система координат ГМГ.

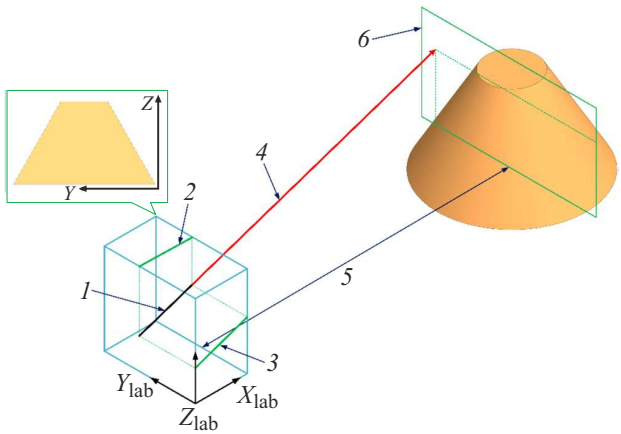


Рис. 5. Схема построения мюонограмм: *1* — реконструированный трек; *2* — XY-проекция; *3* — XZ-проекция; *4* — спроецированный трек; *5* — расстояние до объекта; *6* — референтная плоскость.

веденная от детектора к плоскости в обратном треку направлении. В данную ячейку матрицы прибавляется единица $M[i, j] = M[i, j] + 1$. В совокупности ячеек такая матрица представляет собой теневое изображение и отображает распределение областей неоднородностей в угловом распределении зарегистрированного потока мюонов, связанных с особенностями строения наблюдаемого объекта.

Сопоставление экспериментальных матриц с моделированным потоком мюонов, прошедших через ГМГ в пределах апертуры без объекта, позволяет получать мюонограммы (матрицы с учетом угловой зависимости мюонов) и расчетные матрицы толщин вещества наблюдаемого объекта. Матрицы толщин дают усредненную оценку количества вещества, пройденного частицами до места регистрации. Расчет потока частиц, включая мюоны, проводился с помощью моделирования широких атмосферных ливней от первичных протонов с энергиями от 1 до 10^4 GeV с шагом $\Delta(\log_{10}(E_0)) = 0.1$. Моделирование проводилось с использованием программного пакета CORSIKA версии 7.7500.

Протоны моделировались в стандартной атмосфере с учетом ее кривизны в диапазоне зенитных углов от 0 до 89° и в диапазоне азимутальных углов от 0 до 360°. Уровень наблюдения — 173 m. При моделировании первичных заряженных адронов учитывались ионизационные потери и отклонение в магнитном поле Земли (согласно модели IGRF2020 от 01.08.2023) на пути от входа в атмосферу до первого взаимодействия. Для описания адронных взаимодействий применялись две модели: QGSJET-II-04 для высоких энергий и FLUKAINFN2021.2.9 для низких энергий. Граница перехода между моделями составляла 80 GeV.

Моделирование включает несколько этапов. На первом этапе моделируются случайные направления и положения трека частицы $T(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \varphi, \theta)$ в пространстве лабораторной системы координат, где x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 — точки начала и конца трека, а θ и φ — зенитные и азимутальные направления. Отбираются те треки, которые пересекают референтную плоскость и находятся в пределах апертуры детектора. Затем находится пересечение трека с ячейками матрицы $M[i, j]$ на референтной плоскости. Зная площадь ячейки в матрице S и расстояние до референтной плоскости, можно рассчитать телесный угол $\mathrm{d}\Omega$ каждой ячейки и оценить интенсивность потока мюонов $[\mathrm{cm}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{sr}^{-1}]$ на единицу времени $\mathrm{d}t$ с учетом эффективности регистрации ε:

$$I(S, \Omega) = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}S \cdot \mathrm{d}\Omega \cdot \varepsilon \cdot \mathrm{d}t}. \qquad (1)$$

После этого по соответствующим ячейкам матрицы $M[i, j]$ находится матрица отклонений $D[i, j]$ числа треков в эксперименте $N_{i,j}$ относительно числа треков в модели $N_{0i,j}$ с учетом коэффициента нормировки B: $D_{i,j} = N_{i,j}/(B \cdot N_{0,i,j})$, где $B = \Sigma_{i,j}(N_{i,j})/\Sigma_{i,j}(N_{0i,j})$. С использованием расчетной таблицы зависимости интенсивности потока мюонов от зенитного угла и пороговой энергии для каждой ячейки экспериментальной матрицы находится такая пороговая энергия $E_{i,j}$, при которой интенсивность потока по сравнению с модельной пороговой энергией $E_{0i,j}$ изменилась бы в $D_{i,j}$ раз. Данная таблица была получена на основе расчетного спектра в CORSIKA по формулам из работ [37,38]. Толщина вещества X с учетом минимальных ионизационных потерь мюоном в $2\,\mathrm{MeV}\cdot\mathrm{g}^{-1}\cdot\mathrm{cm}^2$ при этом оценивается следующим образом:

$$X_{i,j}[\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}^{-2}] = \frac{(E_{i,j} - E_{0i,j})[\mathrm{MeV}]}{2.0[\mathrm{MeV}\cdot\mathrm{g}^{-1}\cdot\mathrm{cm}^2]}. \qquad (2)$$

3. Мюонография энергоблока АЭС

Длительность эксперимента по мюонографии энергоблока на Калининской АЭС, проведенного осенью 2022 г., составила 20 календарных дней, за которые было реконструировано 130 млн треков одиночных мюонов. Основной целью измерений было наблюдение за энергоблоком, работающим в штатном режиме, проверка

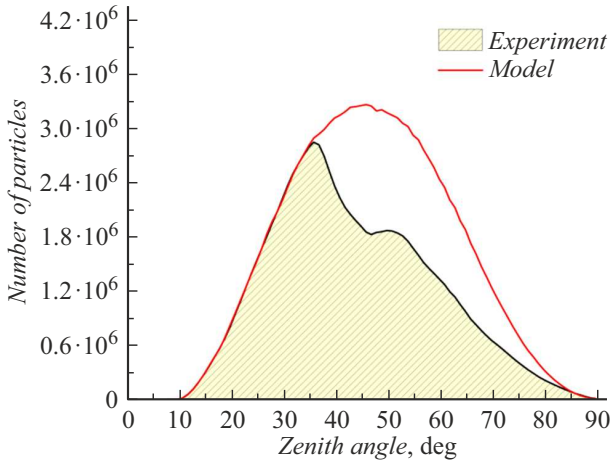


Рис. 6. Распределение количества треков ГМГ по зенитному углу.

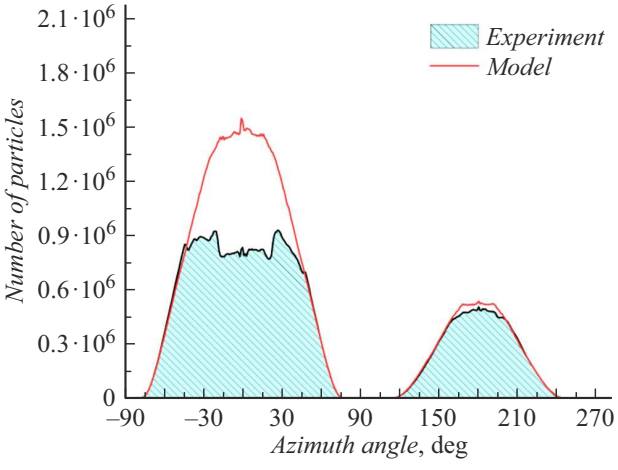


Рис. 7. Распределение количества треков ГМГ по азимутальному углу.

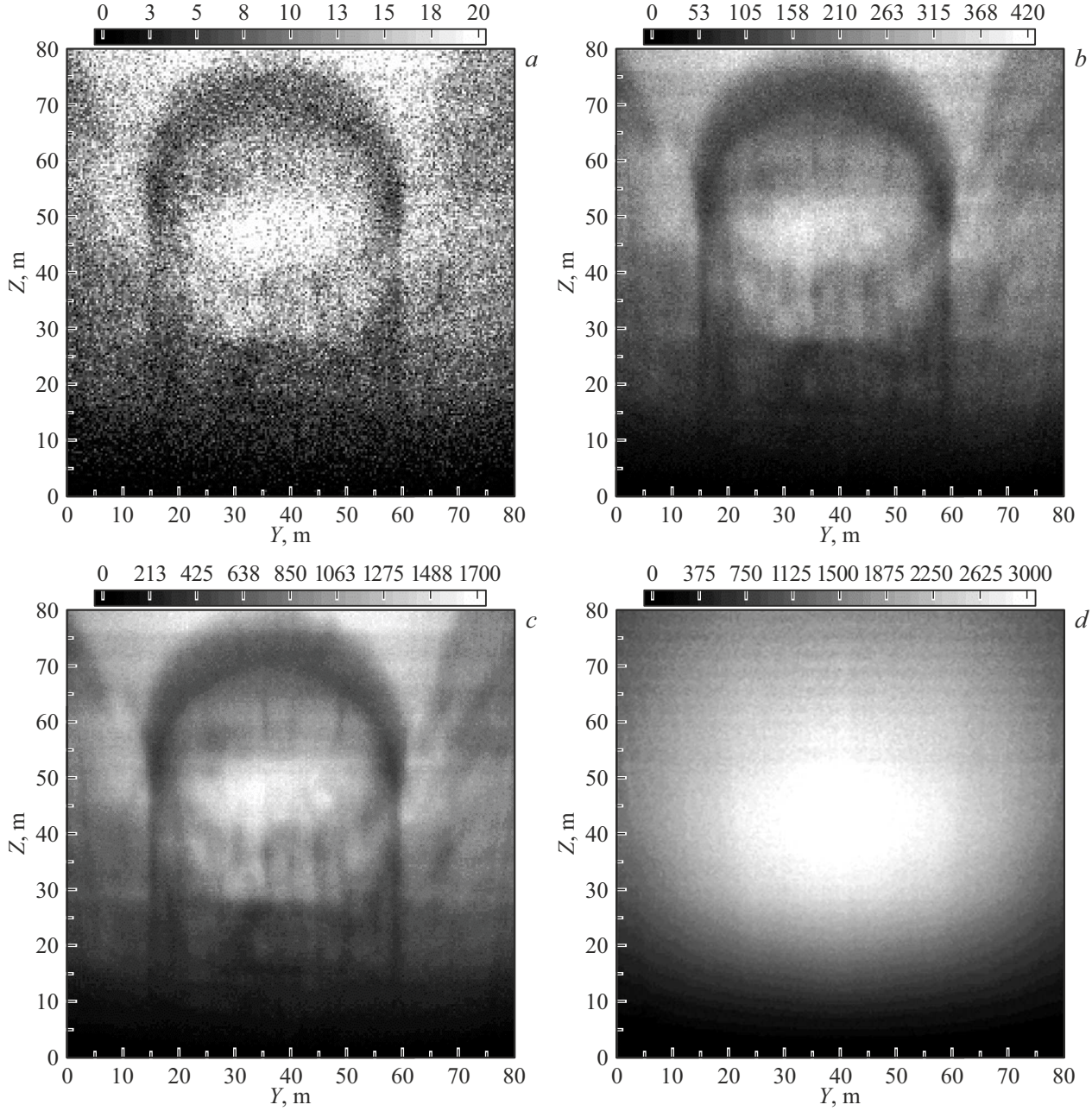


Рис. 8. Матрицы числа треков: *a* — 5 h; *b* — 5 days; *c* — 20 days; *d* — модель.

работоспособности системы ГМГ и отработка методики получения мюонограмм.

По реконструированным событиям были получены зенитно-угловые и азимутальные распределения треков с шагом 1°. На рис. 6 показано распределение по зенитному углу в прямом направлении (со стороны энергоблока), а на рис. 7 — распределение по азимутальному углу, где от 0 до 180° — прямое направление, а от 180 до 360° — обратное (с другой стороны детектора). Угловая апертура детектора в прямом направлении составляет 80° по зенитному углу и 160° по азимутальному углу. На рисунке отчетливо видно уменьшение потока в направлении на энергоблок и на здание с противоположной стороны. Полученные экспериментальные угловые распределения дали возможность осуществить тонкую настройку модельного спектра мюонов путем сопоставления модели и эксперимента на участках, где поток мюонов не экранирован зданиями. Модельные угловые распределения без энергоблока показаны красной гистограммой на рис. 6 и 7.

На рис. 8 продемонстрирована скорость формирования экспериментальных мюонограмм. Также показана модельная матрица без препятствий на траектории движения частиц. Моделирование проводилось с использованием спектра частиц, полученного с помощью программного пакета CORSIKA описанным выше спо-

собом, с последующей нормировкой на экспериментальные данные. Матрицы строились на расстоянии 60 m от центра детектора и имеют размеры 80×80 m с разрешением ячеек 0.4×0.4 m. Границы гермооболочки и строений реакторного отделения проявляются уже после нескольких часов наблюдений, а с увеличением объема данных повышается контрастность изображения. Наглядность изображения также зависит от выбранной цветовой градации и размера ячейки матрицы. Размытость изображения в нижней части вызвана естественным уменьшением потока мюонов и, как следствие, уменьшением статистики.

Модельная матрица используется для нормировки экспериментальных данных с целью учета и исключения систематического влияния сильной угловой зависимости потока мюонов, что позволяет более точно выделять участки с анизотропией.

На рис. 9 представлена матрица-мюонограмма, полученная с учетом статистики зарегистрированных мюонов с нормировкой на модельный спектр. На рис. 10 приведена матрица толщин вещества по ячейкам матрицы. При сопоставлении рис. 9 и 8, *c* видно, что нормированная матрица более детально отображает особенности структуры комплекса энергоблока. Вертикальные полосы в центре изображения и „крылья“ в областях от 0 до 10 m и от 65 до 80 m по оси Y соответствуют бетонным стенкам и перекрытиям вспомогательных помещений обстройки реакторного отделения. Реакторная зона располагается на высоте от 15 до 35 m, а ниже 15 m проецируются подреакторные помещения, оборудование и комплекс турбин машинного зала.

4. Интерпретация мюонограмм энергоблока АЭС

Изображение, получаемое ГМГ при наблюдении объекта под определенным углом к горизонту, подвергается перспективной трансформации из-за построения матриц по трекам, реконструированным в проекционных углах $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$ детектора, с последующим проецированием в обратном направлении на референтную плоскость. На рис. 11 наглядно показано, как внутренняя структура энергоблока с реактором ВВЭР-1000 искажается на мюонограмме, полученной на расстоянии 68 m от детектора. Поскольку детектор по горизонтали расположен практически по центру реактора, искажения по ширине изображения (ось Y) минимальны. По оси Y в диапазоне от 17 до 32 m находятся бассейны выдержки, между 32 и 41 m — реакторная зона, между 41 и 51 m — бассейны перегрузки и турбина машинного зала, а от 5 до 17 m и от 55 до 70 m — вспомогательные помещения. По вертикали (ось Z) изображение растягивается от нижней части вверх. По оси Z в диапазоне от 0 до 15 m проецируются машинный зал и плиты перекрытия, между 15 и 35 m — реакторная зона, а от 35 до 80 m — вспомогательные и защитные сооружения верхней части гермооболочки.

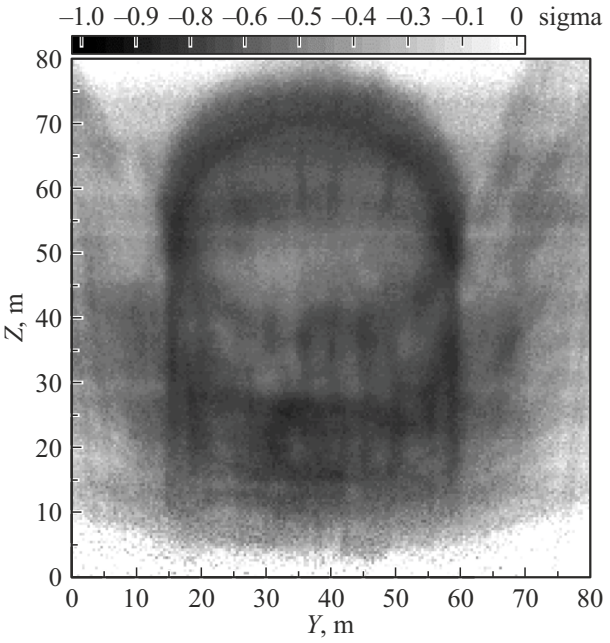


Рис. 9. Матрица отклонений.

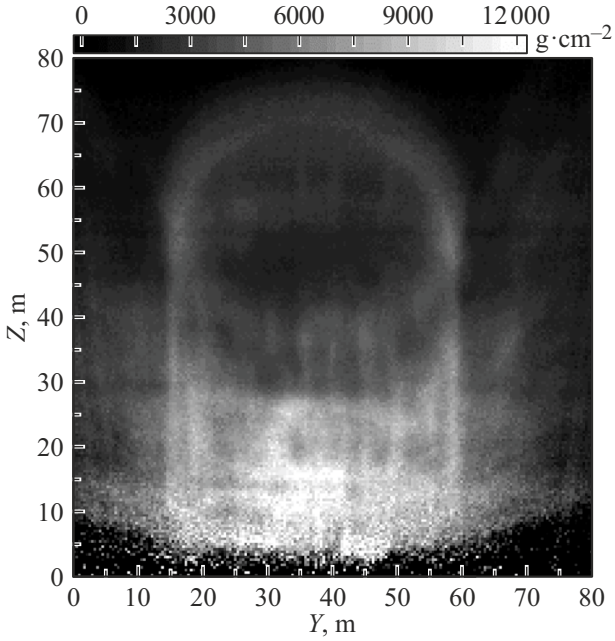


Рис. 10. Матрица толщин.

Из мюонограмм можно оценить толщину стен гермооболочки реакторного здания. Однако проблема заключается в том, что объекты, через которые проходят мюоны, экранированы слоем вещества, эквивалентного 10–12 m бетона. Важную роль в экранировке реактора играет горизонтальная подреакторная бетонная плита толщиной 3 m, расположенная на высоте 10 m. Прохождение мюонов через такой слой приводит к многократному кулоновскому рассеянию, что делает контуры объектов размытыми.

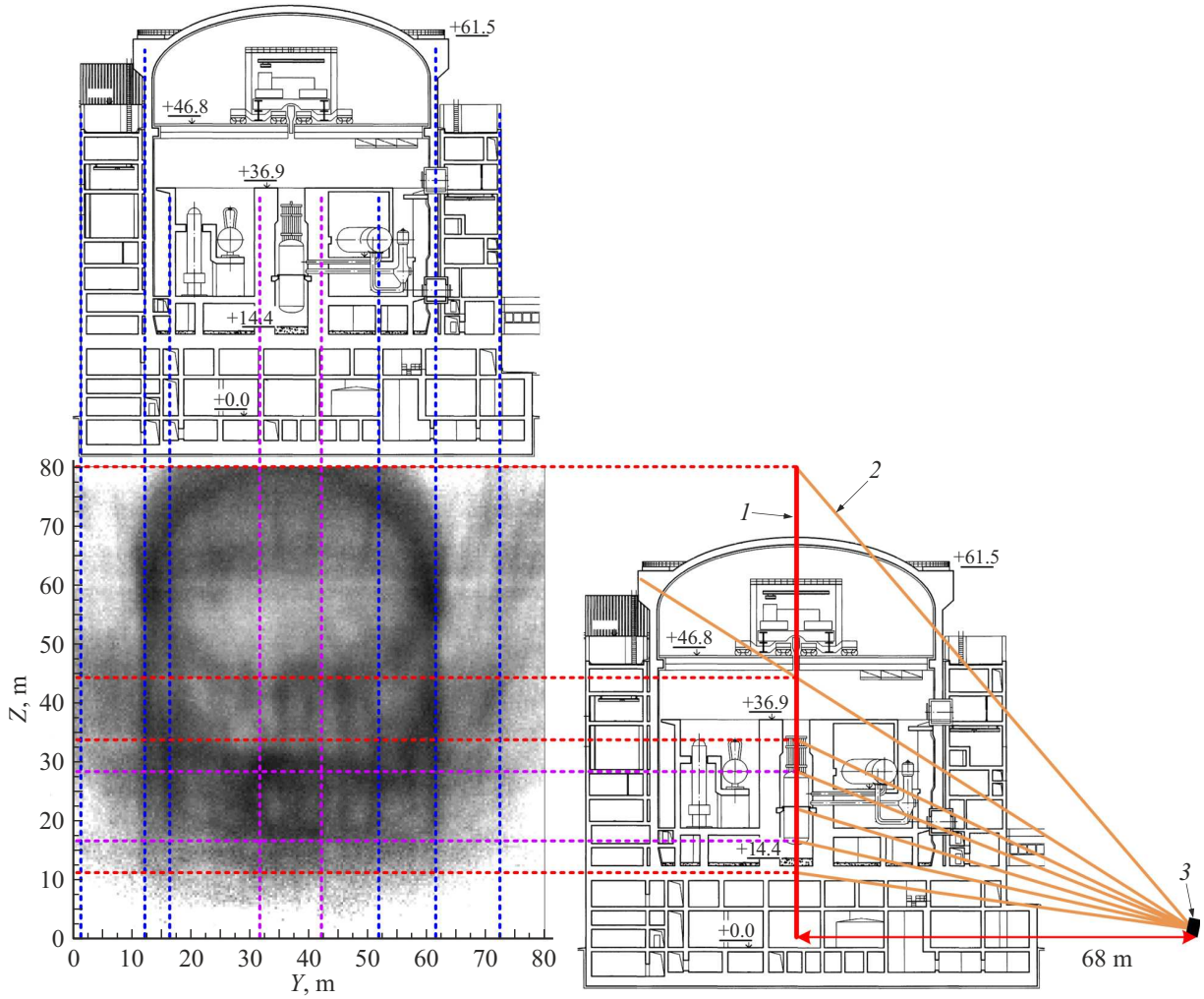


Рис. 11. Схема формирования мюонограммы энергоблока АЭС: *1* — референтная плоскость; *2* — трек частицы; *3* — детектор.

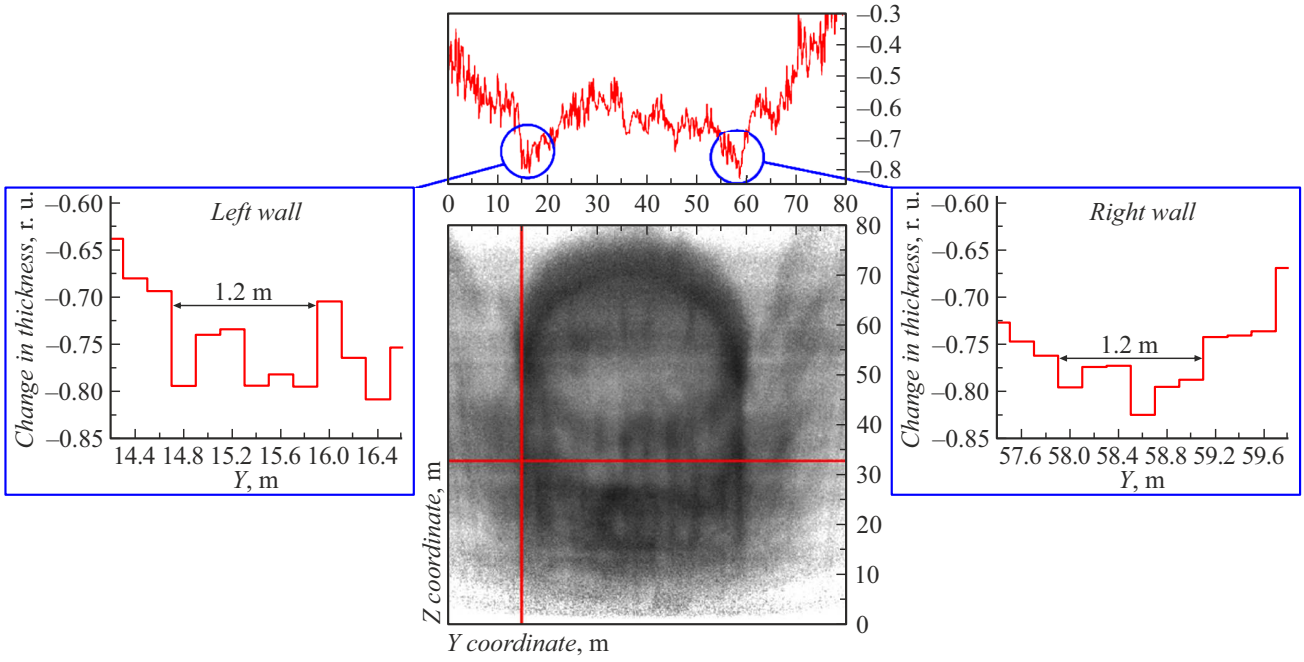


Рис. 12. Измерение толщины стен гермооболочки энергоблока.

Для проверки точности измерений был выбран объект, при прохождении через который мюоны претерпевают меньше всего рассеяния — вертикальный участок стены гермооболочки. На рис. 12 представлены мюонограмма и гистограммы по горизонтальному разрезу. Горизонтальный разрез на высоте 32 m выбран из-за отсутствия крупных объектов, которые могли бы искажать результаты измерений. Шаг гистограммы составил 20 cm. Измерения показали, что толщина стенки составляет 120 ± 20 cm, что совпадает реальной толщиной. Внешний край стенки измерен с пространственной точностью не хуже 10 cm, что соответствует угловому разрешению 1.5 mrad. Эти результаты хорошо согласуются с данными измерений на прототипе ГМГ в МИФИ [35].

Заключение

Разработанный широкоапертурный гибридный мюонный годоскоп был использован для отработки методики мюонографии работающего энергоблока Калининской АЭС с реактором ВВЭР-1000. По результатам первого эксперимента было подтверждено корректное функционирование гибридного мюонного годоскопа и его способность к получению мюонограмм. Важно отметить, что годоскоп, установленный вне энергоблока, продемонстрировал возможность визуализации структуры блока ядерного реактора.

Полученные изображения позволяют идентифицировать различные компоненты конструкции энергоблока. Однако сложность идентификации мелких объектов, несмотря на хорошую угловую точность детектора (~ 2 mrad), связана с большими толщинами фоновых бетонных стен и перекрытий ($10000-14000$ g/cm^2), которые проецируются на исследуемые объекты. Кроме того, границы конструкций становятся менее четкими при недостаточной статистике и вследствие многократного кулоновского рассеяния на плотных структурах энергоблока, особенно в нижней части реактора.

Благодарности

Авторы благодарят коллектив НОЦ НЕВОД за ценные советы, плодотворное обсуждение результатов и помощь в создании, тестировании и развертывании ГМГ на Калининской АЭС, а также сотрудников Калининской АЭС и филиала АО „ВНИИАЭС“ (г. Удомля) за оказанную помощь в проведении экспериментальных исследований.

Финансирование работы

Разработка и исследование гибридного мюонного годоскопа проводились в рамках договора 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 договора 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] P.K.F. Grieder. *Cosmic rays at Earth: researcher's reference manual and data book* (Elsevier, 2001), p. 432.
[2] L.W. Alvarez, J.A. Anderson, F.E. Bedwei, J. Burkhard, A. Fakhry, A. Girgis, A. Goneid, F. Hassan, D. Iverson, G. Lynch, Z. Miligy, A.H. Moussa, M. Sharkawi, L. Yazolino. Science, **167** (3919), 832 (1970). DOI: 10.1126/science.167.3919.832
[3] L. Bonechi, R. D'Alessandro, A. Giammanco. Rev. Phys., **5**, 100038 (2020). DOI: 10.1016/j.revip.2020.100038
[4] L. Olah, H.K.M. Tanaka, D. Varga. *Muography: Exploring Earth.s Subsurface with Elementary Particles* (John Wiley & Sons, 2022)
[5] International Atomic Energy Agency. *Muon imaging: Present status and emerging applications* (Vienna, 2022)
[6] N.S. Barbashina, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, G. Mannocchi, A.A. Petrukhin, O. Saavedra, D.A. Timashkov, G. Trinchero, D.V. Chernov, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. Instrum. Exp. Tech., **51** (2), 180 (2008). DOI: 10.1134/S002044120802005X
[7] I.I. Yashin, N.V. Ampilogov, I.I. Astapov, N.S. Barbashina, V.V. Borog, A.N. Dmitrieva, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, G. Mannocchi, A.S. Mikhailenko, A.A. Petrukhin, O. Saavedra, V.V. Shutenko, G. Trinchero, E.I. Yakovleva. J. Phys.: Conf. Ser., **409**, 012192 (2013). DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012192
[8] N.V. Ampilogov, I.I. Astapov, N.S. Barbashina, V.V. Borog, A.N. Dmitrieva, A.A. Kovylyaeva, K.G. Kompaniets, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. J. Phys.: Conf. Ser., **675**, 032042 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/675/3/032042
[9] K. Morishima, M. Kuno, A. Nishio, N. Kitagawa, Y. Manabe, M. Moto, F. Takasaki, H. Fujii, K. Satoh, H. Kodama, K. Hayashi, S. Odaka, S. Procureur, D. Attie, S. Bouteille, D. Calvet, C. Filosa, P. Magnier, I. Mandjavidze, M. Riallot, B. Marini, P. Gable, Y. Date, M. Sugiura, Y. Elshayeb, T. Elnady, M. Ezzy, E. Guerriero, V. Steiger, N. Serikoff, J. Mouret, B. Charles, H. Helal, M. Tayoubi. Nature, **552**, 386 (2017). DOI: 10.1038/nature24647
[10] S. Procureur, K. Morishima, M. Kuno, Y. Manabe, N. Kitagawa, A. Nishio, H. Gomez, D. Attie, A. Sakakibara, K. Hikata, M. Moto, I. Mandjavidze, P. Magnier, M. Lehuraux, T. Benoit, D. Calvet, X. Coppolani, M. Kebbiri, P. Mas, H. Helal, M. Tayoubi, B. Marini, N. Serikoff, H. Anwar, V. Steiger, F. Takasaki, H. Fujii, K. Satoh, H. Kodama, K. Hayashi, P. Gable, E. Guerriero, J. Mouret, T. Elnady, Y. Elshayeb, M. Elkarmoty. Nature Commun., **14**, 1144 (2023). DOI: 10.1038/s41467-023-36351-0
[11] H.K.M. Tanaka. Phil. Trans. R. Soc. A, **377** (2137), 20180142 (2019). DOI: 10.1098/rsta.2018.0142
[12] M. D'Errico, F. Ambrosino, A. Anastasio, S. Basnet, L. Bonechi, M. Bongi, A. Bross, R. Ciaranfi, L. Cimmino, V. Ciulli, R. D.Alessandro, A. Giammanco, F. Giudicepietro, S. Gonzi, R. Karnam, G. Macedonio, V. Masone, N. Mori,

M. Moussawi, M. Orazi, G. Passeggio, R. Peluso, A. Pla-Dalmau, C. Rendon, A. Samalan, G. Saracino, G. Scarpato, P. Strolin, M. Tytgat, E. Vertechi, L. Viliani. JAIS, **1**, 273 (2022). DOI: 10.31526/jais.2022.273

[13] D. Bryman, J. Bueno, K. Davis, V. Kaminski, Z. Liu, D. Oldenburg, M. Pilkington, R. Sawyer. Building Exploration Capability for the 21st Century: Society of Economic Geologists, **18**, 235 (2014). DOI: 10.5382/SP.18.11

[14] A. Lechmann, D. Mair, A. Ariga, T. Ariga, A. Ereditato, R. Nishiyama, C. Pistillo, P. Scampoli, F. Schlunegger, M. Vladymyrov. Earth-Sci. Rev., **222**, 103842 (2021). DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103842

[15] A. Abiev, A. Bagulya, M. Chernyavskiy, A. Dashkina, A. Dimitrienko, A. Gadjiev, M. Gadjiev, V. Galkin, A. Gippius, L. Goncharova, V. Grachev, N. Konovalova, A. Managadze, N. Okateva, N. Polukhina, T. Roganova, T. Shchedrina, N. Starkov, A. Teymurov, V. Tioukov, S. Vasina, P. Zarubin. Appl. Sci., **9** (10), 2040 (2019). DOI: 10.3390/app9102040

[16] A.B. Alexandrov, A.M. Anokhina, S.G. Vasina, A.A. Gippius, S.A. Gorbunov, V.M. Grachev, N.S. Konovalova, Yu.O. Krasilnikova, A.A. Larionov, A.K. Managadze, I.A. Melnichenko, N.M. Okateva, S.S. Paramonov, A.A. Petrukhin, N.G. Polukhina, T.M. Roganova, Zh.T. Sadykov, N.I. Starkov, E.N. Starkova, V.E. Tioukov, M.M. Chernyavskii, V.I. Shevchenko, T.V. Shchedrina. Bull. Lebedev Phys. Inst., **50**, 603 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623120023

[17] K. Chaiwongkhot, T. Kin, H. Ohno, R. Sasaki, Y. Nagata, K. Kondo, Y. Watanabe. IEEE Transactions Nucl. Sci., **65** (8), 2316 (2018). DOI: 10.1109/TNS.2018.2855737

[18] P.M.R. Arbol, P.G. Garcia, C.D. Gonzalez, A. OrioAlonso. Phil. Trans. R. Soc. A., **377**, 20180054 (2019). DOI: 10.1098/rsta.2018.0054

[19] S. Barnes, A. Georgadze, A. Giammanco, M. Kiisk, V.A. Kudryavtsev, M. Lagrange, O.L. Pinto. Instruments, **7** (1), 13 (2023). DOI: 10.3390/instruments7010013

[20] M. Moussawi, A. Giammanco, V. Kumar, M. Lagrange. PoS., **452**, 29 (2024). DOI: 10.22323/1.452.0029

[21] J.M. Durham, D. Poulson, J. Bacon, D.L. Chichester, E. Guardincerri, C.L. Morris, K. Plaud-Ramos, W. Schwendiman, J.D. Tolman, P. Winston. Phys. Rev. Appl., **9** (4), 044013 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.044013

[22] M.J. Weekes, A.F. Alrheli, D. Barker, D. Kikola, A.K. Kopp, M. Mhaidra, J.P. Stowell, L.F. Thompson, J.J. Velthuis. JINST, **16**, P05007 (2021). DOI: 10.1088/1748-0221/16/05/P05007

[23] G. Jonkmans, V.N.P. Anghel, C. Jewett, M. Thompson. Annals Nucl. Energy, **53**, 267 (2013). DOI: 10.1016/j.anucene.2012.09.011

[24] J. Perry, M. Azzouz, J. Bacon, K. Borozdin, E. Chen, J. Fabritius, E. Milner, H. Miyadera, C. Morris, J. Roybal, Z. Wang, B. Busch, K. Carpenter, A.A. Hecht, K. Masuda, C. Spore, N. Toleman, D. Aberle, Z. Lukic. J. Appl. Phys., **113**, 184909 (2013). DOI: 10.1063/1.4804660

[25] B. Lefevre, H. Gomez, S. Procureur, D. Attie, L. Gallego, P. Gonzales, M. Lehuraux, B. Lesage, I. Mandjavidze, P. Mas, D. Pomarede. EPJ Web Conf., **288**, 07001 (2023). DOI: 10.1051/epjconf/202328807001

[26] H. Miyadera, K.N. Borozdin, S.J. Greene, Z. Lukic, K. Masuda, E.C. Milner, C.L. Morris, J.O. Perry. AIP Advances, **3**, 052133 (2013). DOI: 10.1063/1.4808210

[27] N. Kume, H. Miyadera, C.L. Morris, J. Bacon, K.N. Borozdin, J.M. Durham, K. Fuzita, E. Guardincerri, M. Izumi, K. Nakayama, M. Saltus, T. Sugita, K. Takakura, K. Yoshioka. JINST, **11**, P09008 (2016). DOI: 10.1088/1748-0221/11/09/P09008

[28] H. Fujii, M. Gi, K. Hara, S. Hashimoto, K. Hayashi, H. Kakuno, H. Kodama, M. Mizokami, S. Mizokami, K. Nagamine, K. Sato, S. Sekita, H. Shirai, S. Kim, T. Sumiyoshi, A. Suzuki, Y. Takada, K. Takahashi, Y. Takahashi, F. Takasaki, D. Yamada, S. Yamashita. Prog. Theor. Exp. Phys., **2021** (2), 023C01 (2021). DOI: 10.1093/ptep/ptaa137

[29] 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)

[30] 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)

[31] N.A. Pasyuk, A.A. Borisov, K.G. Kompaniets, A.S. Kozhin, R.M. Fakhrutdinov, M.Yu. Tselinenko, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. Instrum. Exp. Tech., **67** (2), 219 (2024). DOI: 10.1134/S0020441224700489

[32] 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(препринт): 10.13140/RG.2.2.21424.53762

[33] 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).

[34] И.И. Яшин, В.В. Киндин, К.Г. Компаниец, Н.А. Пасюк, М.Ю. Целиненко. Известия РАН. Серия физическая, **85** (4), 598 (2021). DOI: 10.31857/S0367676521040396 [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]

[35] Н.А. Пасюк, Н.Н. Давиденко, А.С. Кожин, К.Г. Компаниец, Ю.Н. Конев, С.В. Олейник, А.А. Петрухин, Р.М. Фахрутдинов, М.Ю. Целиненко, Д.В. Шудра, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. ЖТФ, **94** (8), 1398 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58569.40-24

[36] Электронный ресурс. Сайт ООО НПП „Ангарные системы“, URL: https://nebo-chel.ru/naduvnye-sooruzhenija/pnevmokarkasnye-moduli

[37] J. Chen, H. Li, Y. Li, P. Liu. JINST, **18**, P08008 (2023). DOI: 10.1088/1748-0221/18/08/P08008

[38] M. Guan, M.C. Chu, J. Cao, K.B. Luk, C. Yang. *A parametrization of the cosmic-ray muon flux at sea-level*, arXiv:1509.06176 (2015). DOI: 10.48550/arXiv.1509.06176