

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 524.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МЮОННОГО ГОДОСКОПА УРАГАН

© 2026 г. М. Ю. Целиненко^а *, Д. М. Громушкин^а, К. Г. Компаниец^а, Н. А. Пасюк^а,
С. С. Хохлов^а, В. В. Шутенко^а, И. И. Яшин^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: MYTselinenko@mephi.ru

Поступила в редакцию 14.07.2025 г.

После доработки 18.07.2025 г.

Принята к публикации 29.07.2025 г.

В статье рассматриваются возможности применения мюонного годоскопа УРАГАН, созданного в Научно-образовательном центре (НОЦ) НЕВОД (НИЯУ МИФИ, г. Москва) для прецизионной калибровки детекторов заряженных частиц. Приводятся результаты тестирования и анализа пространственной неоднородности распределения амплитуд откликов по площади различных сцинтилляционных детекторов.

Ключевые слова: мюон, мюонный годоскоп, сцинтилляционный стрип, многоканальная регистрирующая система

DOI: 10.56304/S207956292601046X

ВВЕДЕНИЕ

Мюонный годоскоп УРАГАН [1, 2], разработанный и созданный в НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ, является прецизионным широкоапертурным координатно-трековым детектором большой площади. УРАГАН способен в режиме реального времени изучать атмосферные и внеатмосферные процессы модуляции пространственно–углового распределения потоков мюонов со всех направлений верхней полусферы.

Годоскоп УРАГАН имеет модульную структуру и состоит из четырех идентичных сборок-супермодулей (СМ) с суммарной площадью 45 м². Каждый СМ можно рассматривать как отдельный детектор мюонов с эффективной площадью 11.5 м², способный регистрировать треки частиц в режиме online в диапазоне зенитных углов от 0° до 80° с высокой угловой (~1°) и пространственной (~1 см) точностью.

Схема одного супермодуля представлена на рис. 1. Регистрирующим элементом являются газоразрядные трубки, работающие в режиме ограниченного стримера, с сечением 1 см² и с внешним двухкоординатным съемом сигнала. Спрямленные трубки длиной 3.5 м сгруппированы по 16 штук в пены-камеры из пластика (ПВХ). Структурно СМ УРАГАН состоит из восьми координатных плоскостей (КП) — слоев камер с системой считывающих пластин, стрипов (всего 320 X каналов и 288 Y каналов с шагом 10 и 12 мм соответствен-

но). КП проложены слоями пенопластовых пластин толщиной 5 см, обернутых металлической фольгой. Каждый слой супермодуля включает в себя 20 пластиковых (ПВХ) камер. В трубках натянуты анодные вольфрамовые нити толщиной 100 мкм. Внутренние стенки трубок покрыты графитовым высокоомным (~100 кОм/□) покрытием. Считывающие X-стрипы (полосы из алюминиевой фольги шириной 4 мм) расположены вдоль направления анодных нитей, Y-стрипы шириной 10 мм расположены ортогонально X-стрипам на противоположной грани камер. Режим работы ограниченного стримера обеспечивается двухкомпонентной смесью Ag и CO² с добавлением паров n-пентана и рабочим напряжением (~4300 В).

Условием выработки общего триггера супермодуля является совпадение не менее четырех триггерных сигналов от сработавших в течение 250 нс любых X-координатных плоскостей, что позволяет с 99% эффективностью детектировать прохождение заряженной частицы через чувствительный объем супермодуля. Средний темп счета одного СМ составляет около 1700 событий в секунду.

МЕТОДИКА ТЕСТИРОВАНИЯ

Высокая точность реконструкции треков мюонов позволяет использовать СМ годоскопа УРАГАН для калибровки и прецизионного изучения зонной чувствительности сцинтилляционных детекторов заряженных частиц в потоке мюонов с из-

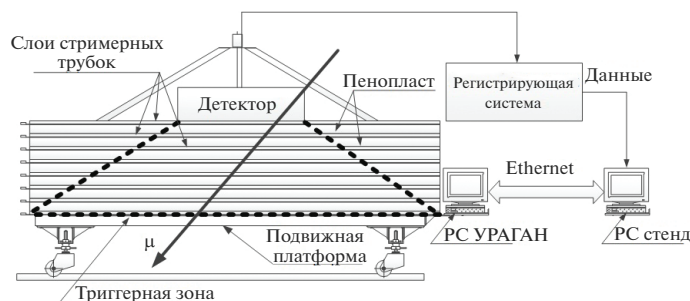


Рис. 1. Блок-схема супермодуля мюонного годоскопа УРАГАН в режиме тестирования детекторов.

вестными треками [3]. На рис. 1 приведена схема исследовательского стенда для тестирования и калибровки детекторов частиц. Исследуемый образец детектора располагается над верхней координатной плоскостью (см. рис. 1). Супермодуль регистрирует треки мюонов, которые пересекают заранее выделенную триггерную зону верхней КП МГ УРАГАН (рис. 1, пунктирная линия). Площадь этой эффективной зоны выбирается больше площади изучаемого детектора. При появлении сигнала о прохождении частицы через триггерную зону информация о сработавших каналах СМ передается на ПК УРАГАН для анализа в режиме реального времени. Если система экспозиции определяет событие как трек одиночного мюона, она вырабатывает триггерный сигнал для считывания и анализа информации исследуемого детектора с помощью внешней регистрирующей системы. В качестве такой системы могут применяться: цифровой осциллограф или многоканальные платы считывания на основе больших интегральных микросхем специального назначения. Параметры реконструированного трека в каждом событии передаются с компьютера СМ УРАГАН на центральный компьютер исследовательского стенда по Ethernet. Полученная матрица распределения плотности точек пересечения выделенных годоскопом УРАГАН треков мюонов с плоскостью, проходящей через исследуемый детектор, называется мюонограммой. Программное обеспечение стенда позволяет последовательно просматривать положение каждого трека в объеме детектора и выводить информацию об откликах. Данная конфигурация эксперимента позволяет изучать распределение амплитуд сигналов откликов по всей площади и по объему исследуемого детектора в диапазоне углов, определяемых триггерной зоной. Неоднородность отклика по площади исследуемых детекторов можно оценить следующей величиной $\delta_A = 100\sigma_A/A$, где A — средняя амплитуда распределения по мюонограмме; σ_A — среднее квадратичное отклонение амплитуды по ячейкам мюонограммы от среднего сигнала. С помощью описанной методики ранее были протес-

тированы детекторы различной геометрической конфигурации: сцинтилляционные счетчики системы калибровочных телескопов черенковского водного детектора НЕВОД [4], сцинтилляционные счетчики, которые являются основными детекторами установок НЕВОД-ШАЛ [5] и Tunka-Grande [6], регистрирующие модули сцинтилляционного мюонного годоскопа [7] и регистрирующие модули гибридного мюонного томографа [8]. В статье приводятся результаты тестирования новых детекторов частиц: сцинтилляционных тайлов адронных калориметров эксперимента sPHENIX, сцинтилляционного модуля детектора реакторных антинейтрино и однопроекционной плоскости мобильного мюонного годоскопа.

ТЕСТИРОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ТАЙЛОВ АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА sPHENIX

С помощью СМ УРАГАН были проведены калибровочные измерения характеристик сцинтилляционных пластин-тайлов для внешнего и внутреннего адронных калориметров эксперимента sPHENIX [9]. Тайлы представляют собой сцинтилляционные пластины толщиной 7 мм из полистирола различной формы, определяемой положением тайлов в адронных калориметрах. В одной из граней тайлов изготовлена канавка, в которую вклеено спектросмещающее оптическое волокно (файбер) Kuraray Y-11. Форма канавки определялась исходя из типоразмера тайла. Два конца файбера выведены в оптический разъем, ответная часть которого содержит кремниевый фотоумножитель Hamamatsu S12572-33-015P с размерами входного окна $3 \times 3 \text{ мм}^2$. Для внутреннего и внешнего адронных калориметров на ООО «Унипласт» (г. Владимир, Россия [10]) были изготовлены пластины 24 различных типоразмеров, по 12 для каждого калориметра. Кроме того, были изготовлены тайлы с тремя различным расположением вклеенных файберов: конфигураций Z, В и М. Поверхности пластин тайлов покрыты диффузно отражающим слоем на основе вспененного полистирола. Кроме того, тайлы обернуты светоизо-

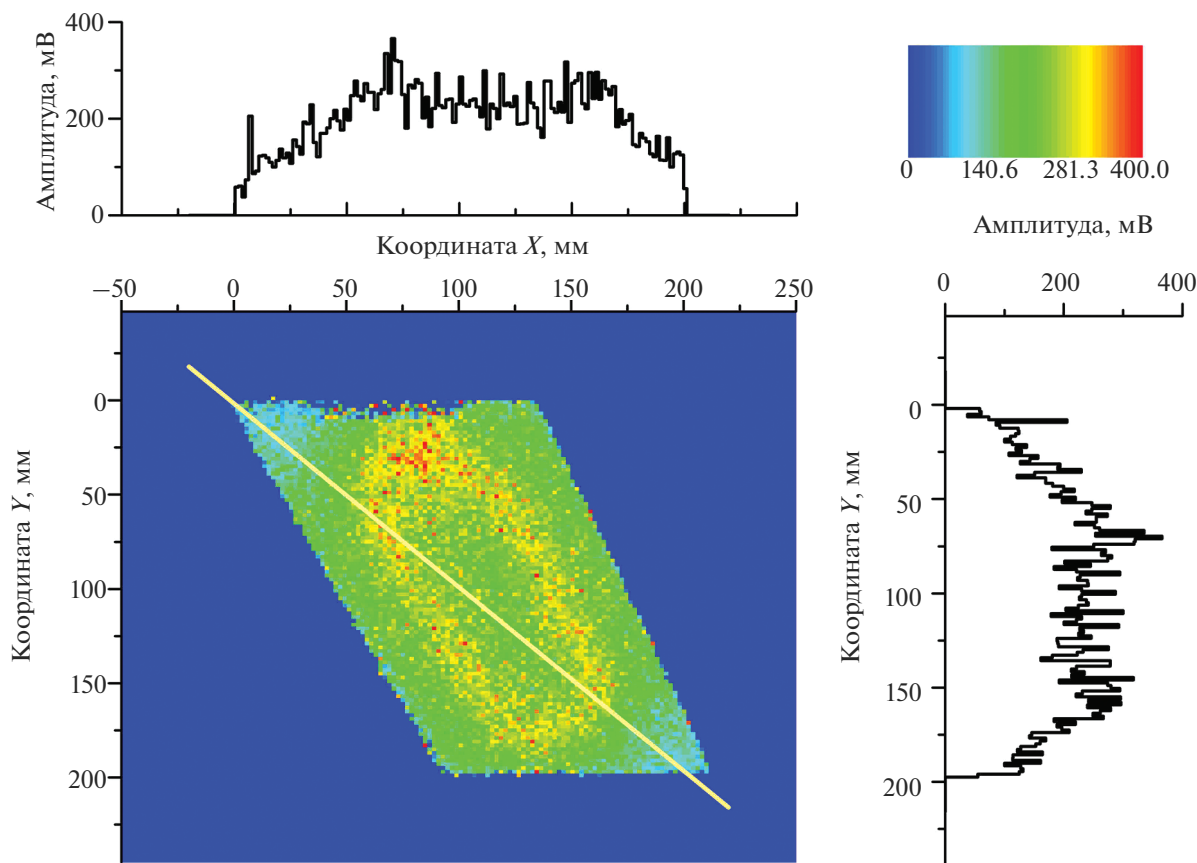


Рис. 2. Мюнограмма сцинтилляционного тайла типоразмера Z для эксперимента sPhenix.

лирующей тонкой пленкой Tedlar (DuPont) [11]. В качестве внешней регистрирующей системы применялся цифровой осциллограф.

Для каждого образца тайлов были получены мюнограммы-матрицы — двумерные распределения амплитуд сигналов-откликов по чувствительной площади сцинтилляторов. Примеры измеренных мюнограмм исследуемых образцов трех типоразмеров тайлов внутреннего и внешнего адронных калориметров приведены на рис. 2–4. Изменение значений средних амплитуд в ячейках матрицы показано цветом: от синего (малые амплитуды) до красного (большие). По осям отложены координаты X и Y в мм. Размеры ячеек в мюнограммах для тайлов внутреннего калориметра составили $2 \times 2 \text{ мм}^2$, для внешнего калориметра — $5 \times 5 \text{ мм}^2$. На гистограммах приведены значения амплитуд по диагональному разрезу матрицы, обозначенному пунктирной белой линией. Средние амплитуды A по матрицам всех протестированных пластин составили: $221.1 \pm 51.2 \text{ мВ}$, $100.3 \pm 18.7 \text{ мВ}$, $125.1 \pm 18.7 \text{ мВ}$ для тайлов типоразмеров Z, В и М соответственно. На мюнограммах отчетливо прослеживаются особенности

светосбора в соответствии с расположением вклеенного фибера. Желтые и красные области соответствуют прохождению треков вблизи места прокладки оптического волокна. Для тайлов Z, В и М внутреннего калориметра коэффициенты неоднородности δ_A составили 16, 19 и 23% соответственно.

ТЕСТИРОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО МОДУЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДЕТЕКТОРА РЕАКТОРНЫХ АНТИНЕЙТРИНО

Для проведения как фундаментальных, так и прикладных исследований в области реакторных антинейтрино сотрудниками НИЦ “Курчатовский институт” и НИЯУ МИФИ ведется разработка детектора, регистрирующего антинейтрино по реакции обратного бета-распада. Детектор будет состоять из отдельных модулей, каждый из которых является независимым сцинтилляционным спектрометром. Спектрометр представляет собой пластиковый сцинтиллятор, просматриваемый с двух сторон фотоэлектронными умножителями. На СМ УРАГАН проведены исследова-

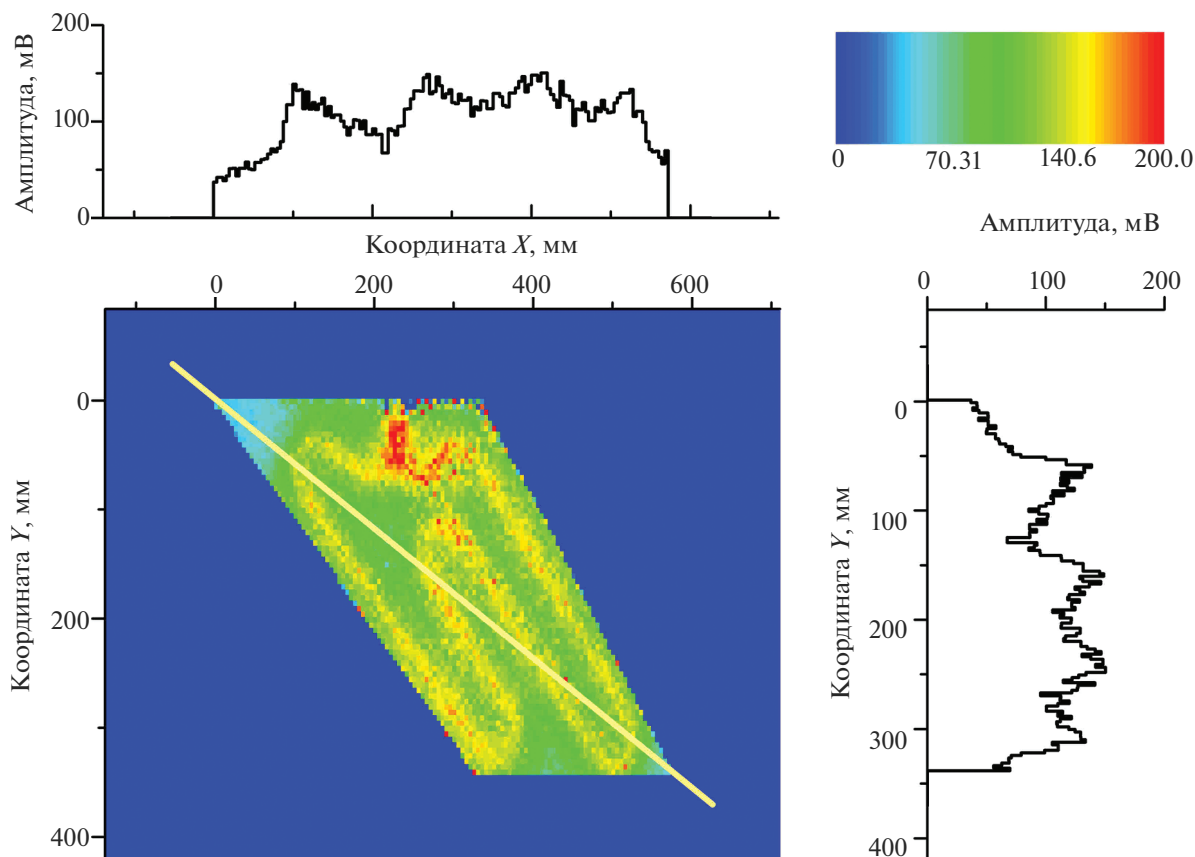


Рис. 3. Мюнограмма сцинтиляционного тайла типоразмера В для эксперимента sPhenix.

ния опытного образца сцинтиляционного модуля детектора для регистрации реакторных антинейтрино. Тестируемый модуль представляет собой прямоугольный пластиковый сцинтиллятор (полистирол со сцинтилляционными добавками 2% РТР и 0.05% РОРОР) с геометрическими размерами $50 \times 50 \times 700$ мм³ (ИФВЭ НИЦ КИ г. Протвино) и просматривается одним ФЭУ (ФЭУ-184 производства ООО “Научно-технический центр “Промышленная электроника”, г. Зеленоград), установленным с одного из торцов модуля. Другой торец заклеен зеркальной пленкой. Модуль обернут светоотражающим покрытием таким образом, что между поверхностью сцинтиллятора и покрытием имеется воздушная прослойка. В качестве материала для светоотражающего покрытия используется материал Tyvek, поверхность которого способна отражать свет с коэффициентом диффузного отражения 0.9–0.95. Контакт между входным окном ФЭУ и сцинтиллятором осуществлялся с помощью световода, изготовленного из полистирола без сцинтилляционных добавок. В качестве внешней регистрирующей системы применялся цифровой осциллограф.

На рис. 5 приведена мюнограмма сцинтиляционного модуля детектора для регистрации реакторных антинейтрино. Цветом показаны амплитуды срабатывания детектора при прохождении через его объем мюона, трек которого был успешно реконструирован в мюонном годоскопе УРАГАН. Яркие области соответствуют большей длине трека внутри модуля и, соответственно, большему энерговыделению и амплитуде сигнала ФЭУ. На верхней и правой гистограммах приведены значения амплитуд по горизонтальному и вертикальному срезам соответственно. На вертикальной гистограмме отчетливо видно плавное уменьшение светосбора с увеличением расстояния до ФЭУ-184, на горизонтальной – распределение амплитуд откликов близкое к равномерному. Краевые эффекты как на матрице, так и на гистограммах обусловлены наличием наклонных треков, прошедших через детектор, а также триггерной зоной, размеры которой превышают размеры детектора. Средняя амплитуда по площади сцинтиляционного модуля при регистрации треков мюонов составила $A = 475.2 \pm 26.7$ мВ.

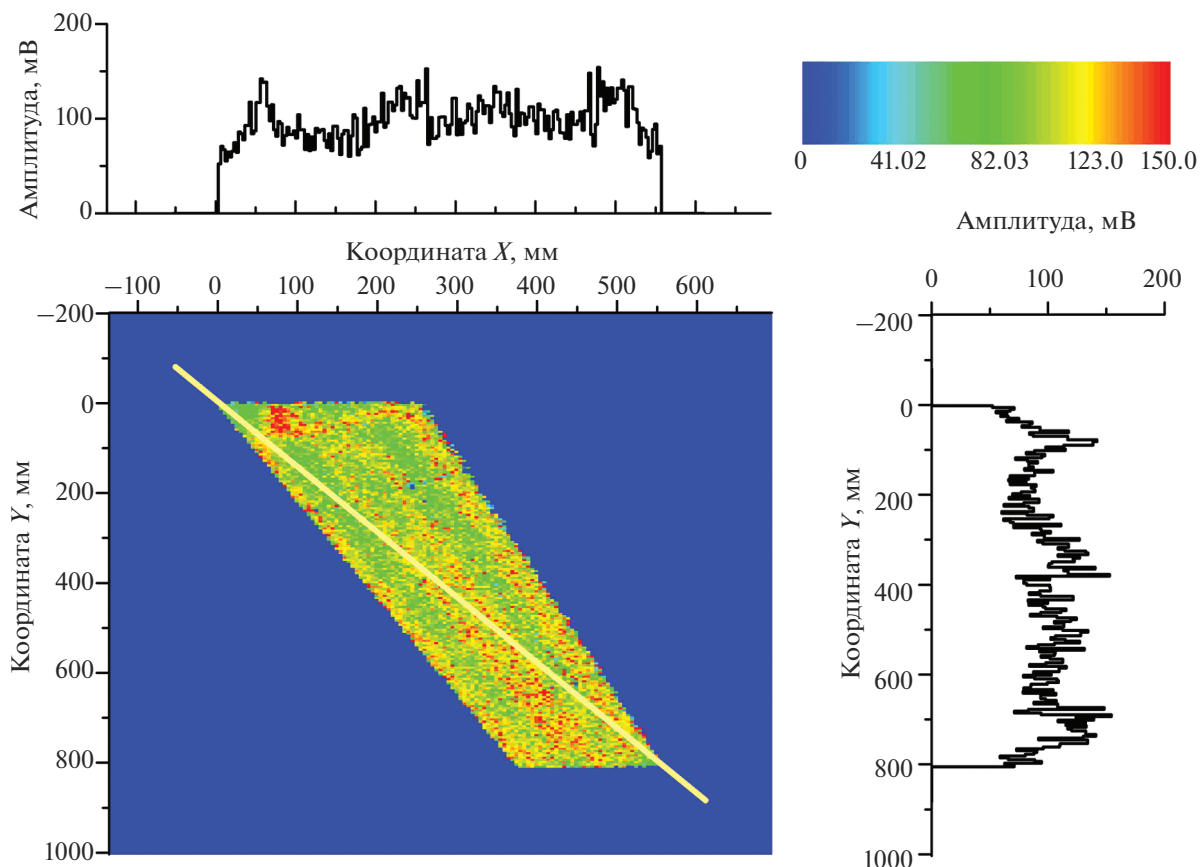


Рис. 4. Мюнограмма сцинтилляционного тайла типоразмера М для эксперимента sPhenix.

Пространственная неоднородность отклика по площади детектора составила величину $\sim 10\%$.

ТЕСТИРОВАНИЕ ОДНОПРОЕКЦИОННОЙ ПЛОСКОСТИ МОБИЛЬНОГО МЮОННОГО ГОДОСКОПА

В НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ создается мобильный мюонный годоскоп (ММГ) для мюнографии различных объектов. Годоскоп состоит из шести однопроекционных координатных плоскостей. Каждая плоскость состоит из светоизолированного бокса, в котором расположена сборка из 192 сцинтилляционных стрипов на основе полистирола с добавлением р-терфина и РОРОР (ООО “Унипласт”, г. Владимир [10]) с оптоволоконным светосбором на кремниевые фотоумножители Joinbon TN-3050 SMT с размерами входного окна $3 \times 3 \text{ мм}^2$. Каждый стрип имеет размеры $1000 \times 10 \times 7 \text{ мм}^3$. В одну из граней в канавку вклеено спектросмещающее оптоволокно. Дополнительно стрип обернут светопоглощающей плен-

кой Tedlar для устранения оптических наводок между стрипами и подавления внешней засветки. Стрипы собраны в два слоя по 96 шт. и смещены на половину ширины стрипа для обеспечения высокой эффективности регистрации из-за уменьшения слепых зон и для увеличения числа точек на регистрируемом треке.

В эксперименте тестировался прототип, состоящий из 32-х сцинтилляционных стрипов, собранных в светоизолированном корпусе в два слоя по 16 шт. Съем сигналов с кремниевых фотоумножителей осуществляется с помощью 32-канальной считывающей платы на основе ASIC Petiros 2A [12].

На рис. 6. представлена мюнограмма результатов тестирования прототипа. На рисунке плотность точек пересечения треков, выделенных СМ УРА-ГАН, с плоскостью, проходящей между слоями стрипов, группируется вдоль конкретных стрипов. На рисунке стрипы ориентированы вертикально. Средняя амплитуда отклика по всем стрипам $A = 308$ кодов АЦП со среднеквадратичным откло-

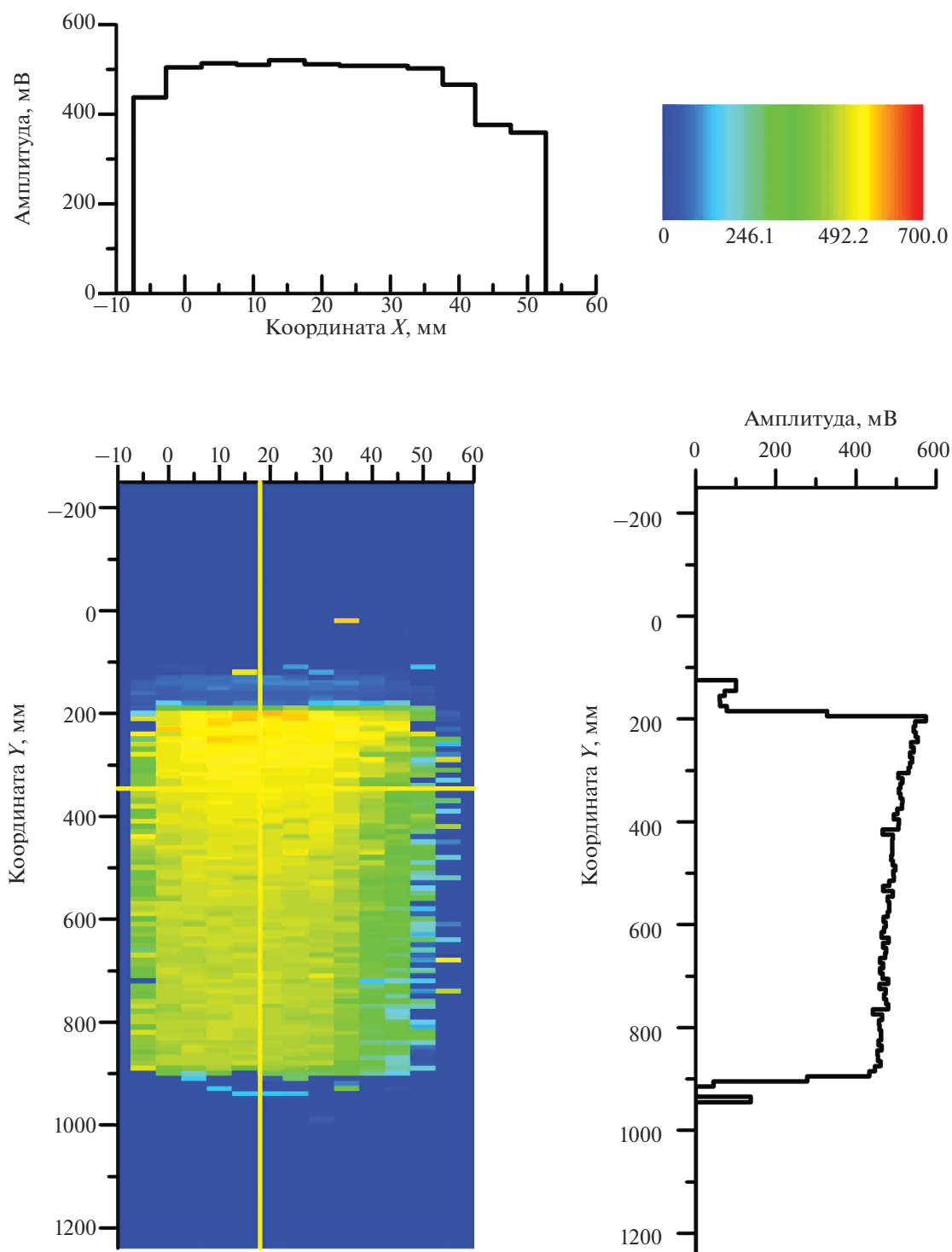


Рис. 5. Мюнограмма прототипа модуля детектора для регистрации реакторных антинейтрино.

нением $\sigma_A = 45$ кодов, неоднородность отклика по площади прототипа составила величину $\sim 14\%$. На гистограмме сверху приведено распределение

амплитуд по ячейкам матрицы, расположенным на расстоянии 10 см от регистрирующих кремниевых фотоумножителей. На гистограмме справа

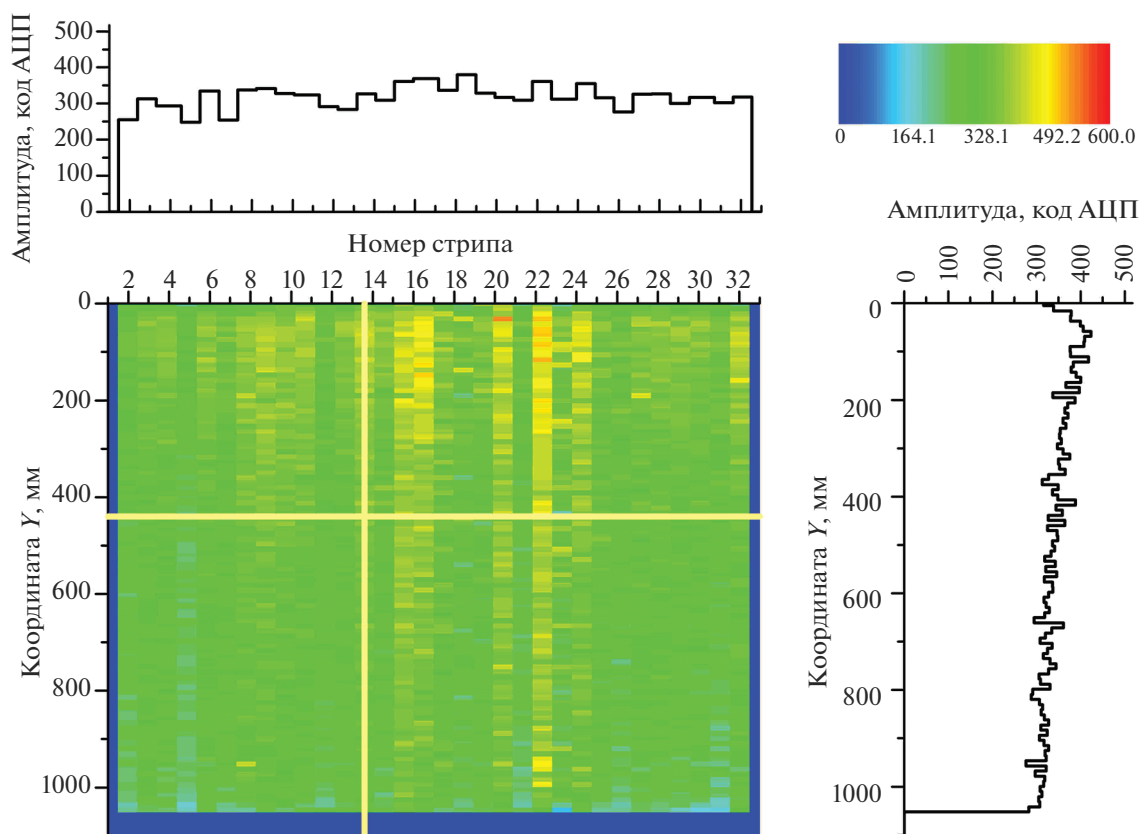


Рис 6. Мюнограмма прототипа регистрирующей системы мобильного мюонного годоскопа.

приведена зависимость отклика отдельного стрипа. Видно, что отклик на конце стрипа составляет ~86% от максимального.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика позволяет проводить прецизионную калибровку и оценку параметров сцинтилляционных детекторов различных форм и размеров в потоке мюонов с известными треками, выделяемыми мюонным годоскопом УРАГАН, а также оценивать спектры сигналов откликов, их неоднородность по площади. В случае многоканальных систем данная методика позволяет проверять работоспособность всех регистрирующих каналов, проводить их настройку с целью выравнивания чувствительности, а также получать оценку кросс-канальных наводок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на базе уникальной научной установки “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект “Исследование групп мюонов в Baikal-GVD и развитие детектирующих модулей для

регистрации астрофизических и реакторных нейтрино”, № FSWU-2025-0024) и в рамках программы ПРИОРИТЕТ-2030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., et al. // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. P. 180–186.
2. Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., et al. // Bull. Rus. Acad. Sci. Ser.: Phys. 2007. V. 71 (7). P. 1044–1046.
3. Ampilogov N.V., Barbashina N.S., Kompaniets K.G., et al. // Bull. Rus. Acad. Sci. Ser.: Phys. 2015. V. 79 (3). P. 386–388.
4. Amelchakov M.B., Bogdanov A.G., Zadeba E.A., et al. // Instrum. Exp. Tech. 2018. V. 61 (5). P. 673–679.
5. Likiy O.I., Ampilogov N.V., Astapov I.I., et al. // Instrum. Exp. Tech. 2016. V. 59 (6). P. 781–788.
6. Monkhoev R.D., Budnev N.M., Chiavassa A., et al. // J. Instrum., 2017. V. 12. P. C06019.
7. Ампилов Н.В., Астапов И.И., Барбашина Н.С. и др. // Ядерн. физ. инжинир. 2012. Т. 3 (5). С. 460–468.
8. Pasyuk N.A., Kompaniets K.G., Petrukhin A.A., et al. // Instrum. Exp. Tech. 2024. V. 67 (4). P. 672–681.
9. Aidala C.A., Bailey V., Beckman S., et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2018. V. 65 (12). P. 2901–2919.
10. ООО “Унипласт”. <http://uniplast-vladimir.com/>.
11. DuPont de Nemours, Inc. <https://www.dupont.com/>.
12. Weeroc Company. <https://www.weeroc.com>.

Study of the Characteristics of the Scintillation Detectors Using the Muon Hodoscope URAGAN

M. Yu. Tselinenko¹, *, D. M. Gromushkin¹, K. G. Kompaniets¹, N. A. Pasyuk¹,
S. S. Khokhlov¹, V. V. Shutenko¹, and I. I. Yashin¹

¹ National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: MYTselinenko@mephi.ru

Received July 14, 2025; revised July 18, 2025; accepted July 29, 2025

Abstract—In the paper, the possibilities of using the URAGAN muon hodoscope, created at the Scientific and Educational Center (SEC) NEVOD (MPhI, Moscow), for a precise calibration of charged particle detectors are discussed. The results of testing and analysis of the spatial non-uniformity of the distribution of response amplitudes over the area of various scintillation detectors are presented.

Keywords: muon, muon hodoscope, scintillation strip, multichannel registering system