

УДК 539.1.074.3:520.374

ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЮОННОГО ТОМОГРАФА НА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СТРИПАХ С ОПТОВОЛОКОННЫМ СВЕТОСБОРОМ

© 2021 г. И. И. Яшин¹ *, В. В. Киндин¹, К. Г. Компаниец¹, Н. А. Пасюк¹, М. Ю. Целиненко¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: iiyashin@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Мюоны космических лучей уже давно используются для изучения внутренней структуры различных крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения. Метод, по аналогии с рентгенографией, получил название мюонографии. Для реализации этого метода необходимы широко апертурные мюонные годоскопы. Приводятся результаты тестирования различных элементов детектирующей системы мюонного годоскопа, разрабатываемого в НИЯУ МИФИ.

DOI: 10.31857/S0367676521040396

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое развитие получили экспериментальные методы дистанционного зондирования крупномасштабных структур естественного и искусственного происхождения, основанные на анализе проникающей компоненты космических лучей на поверхности Земли – потоке мюонов, которые образуются в верхней тропосфере на высотах 15–20 км в результате взаимодействия космических лучей (КЛ) с ядрами атомов воздуха. В основе мюонографии [1] различных объектов лежит технология визуализации распределения внутренней плотности крупномасштабных структур, таких как мощные турбулентные явления в атмосфере и магнитосфере Земли [2, 3], пирамиды [4, 5], вулканы [6, 7], геологические и промышленные объекты, включая ядерные реакторы [8, 9].

Для реализации метода мюонографии в НИЯУ МИФИ совместно с ВНИИАЭС разрабатывается широкоапертурный прецизионный мюонный годоскоп, основным детектирующим элементом которого являются длинные сцинтилляционные стрипы (3000 мм × 23 мм × 7 мм) производства АО Унипласт (г. Владимир) [10]. Каждый стрип представляет собой полосу сцинтиллятора на основе полистирола, покрытого тонким слоем вспененного полистирола, имеющего высокий коэффициент диффузного отражения света. В одной из больших граней проделана канавка глубиной 2 мм, в которую вклеено спектросмещающее оптическое волокно KURARAY Y-11(200) 1мм BJS [11].

Для сопряжений отполированного торца одного из концов волокна с кремниевым фотоумножителем (SiPM) Hamamatsu S13360-1350CS [12] изготовлен оптический разъем, одна часть которого смонтирована в стрип, а во вторую установлен SiPM (см. рис. 1а).

Конструктивно стрипы сгруппированы в базовые модули (БМ) по 64 шт. Кабели (витые пары) от 64 SiPM сводятся на две платы считывания, выполненные на основе 32-канальной микросхемы ASIC PETIROC. Два БМ формируют регистрирующий слой (3 × 3 м²). Два слоя с взаимно-ортогональным направлением стрипов образуют координатную плоскость (КП). В мюонном годоскопе предусмотрено четыре КП, которые обеспечивают надежную реконструкцию треков мюонов. Цель данной статьи – представить результаты тестирования основных элементов будущего мюонного годоскопа, которые свидетельствуют о возможности его создания с заданными параметрами.

ТЕСТИРОВАНИЕ СТРИПОВ

Тестирование характеристик стрипов осуществлялось на автоматизированном измерительном стенде, светоизолированный бокс которого позволяет одновременно размещать на специализированной раме до 16 стрипов длиной до 3.5 м (рис. 1б). Для изучения отклика стрипов проводились измерения треков мюонов, выделяемых сцинтилляционным телескопом с размерами пластин 200 мм × 100 мм × 20 мм, а также элект-

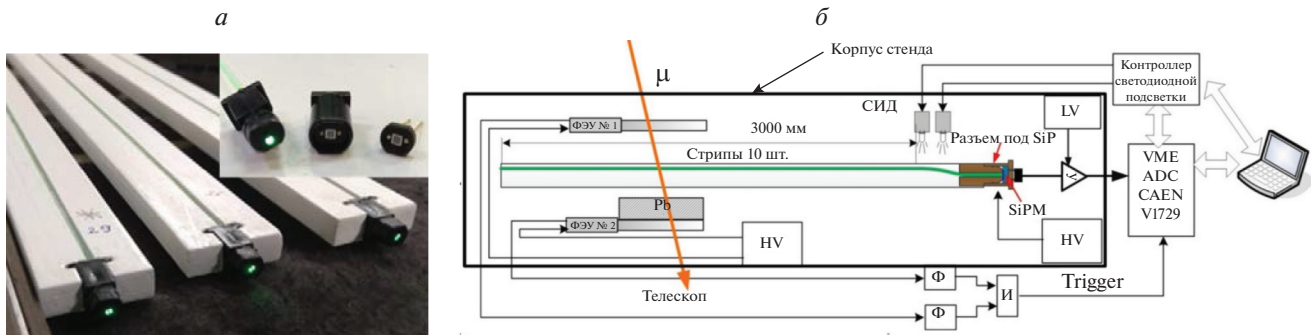


Рис. 1. Тестирование сцинтилляционных стрипов: стрипы и оптические разъемы с SiPM (а); схема стенда для тестирования полноразмерных стрипов с помощью телескопа и бета-спектрометра (б).

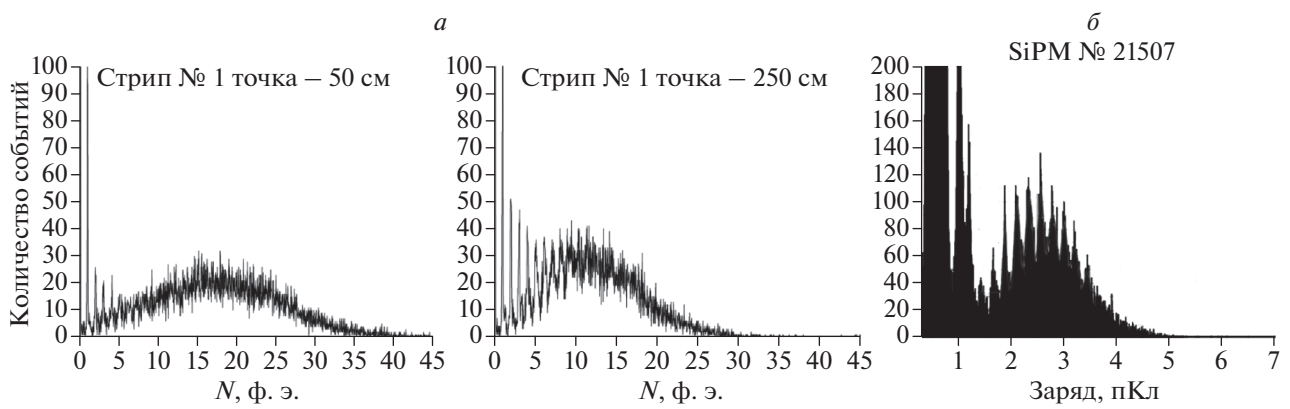


Рис. 2. Результаты тестирования отклика стрипа № 1 при регистрации электронов от бета-спектрометра в двух разных точках, соответственно, 50 и 250 см от SiPM (а); зарядовый спектр откликов SiPM при засветке вспышками светодиода (б).

тронов с энергией >1.8 МэВ от бета-спектрометра на основе источника ^{90}Sr . Измерения с помощью телескопа обеспечивают тестирование стрипов в потоке реальных мюонов. Но скорость счета таких событий достаточно низкая и требует значительного времени для достижения необходимой статистической точности. Кроме того, существует большая погрешность определения точки пересечения стрипа треком мюона (около 20 см). Скорость счета электронов от бета-спектрометра значительно выше – 16–20 соб. $^{-1}$. Но амплитуда отклика от электронов меньше. На рис. 2а приведены спектры откликов стрипа при регистрации электронов на расстояниях соответственно 50 и 250 см. В этих точках была протестирована партия стрипов с помощью телескопа и спектрометра и была проведена оценка зависимости между откликом стрипов при регистрации мюонов и электронов спектрометра: $Q_\mu = A + K_{\mu/e} Q_e$, где калибровочный коэффициент $K_{\mu/e} = 2.04 \pm 0.82$. Коэффициент $K_{\mu/e}$ дает возможность оценить отклик стрипа на мюоны с помощью регистрации релятивистских электронов.

ТЕСТИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Для регистрации сигналов со стрипов используются SiPM Hamamatsu S13360-1350CS с размерами рабочей области 1.3×1.3 мм 2 , которые обладают достаточно низкими шумами и широко применяются для подобных измерений.

Всего в годоскопе будут использоваться 1024 SiPM. Для массового тестирования создан стенд на основе 32-канальной платы считывания сигналов с SiPM на базе ASIC Citiroc CAEN DT5702 [13]. Преимуществом этой платы является возможность одновременного тестирования до 32 фотоумножителей. Стенд состоит из светозащитного бокса с источником наносекундных вспышек на базе двух голубых светодиодов. В каждом измерении тестировались до 10 SiPM, что было вызвано тем, что в боксе используется диффузный переизлучатель вспышек двух голубых светодиодов, способный обеспечить равномерную засветку матрицы с ограниченным количеством SiPM (до 10 шт.). Паспортные рабочие напряжения для фотоумножителей составили величину

55.2 ± 0.15 В. Поэтому измерения проводились в трех точках при разном напряжении питания: 54.7, 55.2, 55.7 В. По этим точкам оценивалась зависимость коэффициента усиления от напряжения питания. Анализ полученных результатов тестирования показал, что для протестированных 100 SiPM полученные характеристики совпадают с паспортными. На рис. 2б приведен спектр откликов фотоумножителя при опорном напряжении 55.2 В и стандартной подсветке светодиода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология поточного тестирования основных детектирующих элементов широкоапертурного мюонного годоскопа — сцинтилляционных стрипов с оптоволоконным светосбором и кремниевых фотоумножителей.

Тестирование партии стрипов и SiPM продемонстрировало соответствие полученных характеристик ожидаемым. Важным результатом является полученный для стрипов толщиной 7 мм отклик с расстояния 2.5 м более 20 фотоэлектронов, что обеспечивает высокую эффективность регистрации треков мюонов при пороге около 5 ф. эл., необходимом для значительного подавления шумов кремниевых фотоумножителей.

Работа выполнена в рамках договора с АО ВНИИАЭС № 00-3-700-0650 от 19.11.2019 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барбашина Н.С., Борог В.В., Кокоулин Р.П. и др. Способ и устройство для получения мюнографий. Пат. РФ № 2406919. 2010.
2. Барбашина Н.С., Борог В.В., Дмитриева А.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 7. С. 1072; *Barbashina N.S., Borog V.V., Dmitrieva A.N. et al.* // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2007. V. 71. No. 7. P. 1041.
3. *Astapov I.I., Barbashina N.S., Dmitrieva A.N. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1390. Art. No. 012067.
4. *Alvarez L.W., Anderson J.A., Bedwei F.E. et al.* // Science. 1970. V. 167. P. 832.
5. *Morishima K., Kuno M., Nishio A. et al.* // Nature. 2017. V. 552. P. 386.
6. *Tanaka H.K.M., Nakano T., Takahashi S. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. Art. No. L22311.
7. *Tanaka H.K.M., Nakano T., Takahashi S. et al.* // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. V. 263. P. 104.
8. *Morishima K. et al.* // Proc. 26th iWoRID in KEK. (Coimdra, 2012). P. 27.
9. *Nagamine K.* // Proc. Japan. Acad. B. 2016. V. 92. No. 8. P. 265.
10. <http://www.uniplast-vladimir.com>.
11. <https://www.kuraray.com>.
12. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/index.html>.
13. <https://www.caen.it/products/dt5702>.

Test of elements of the muon tomograph on scintillation strips with a fiber light collection

I. I. Yashin^{a,*}, V. V. Kindin^a, K. G. Kompaniets^a, N. N. Pasyuk^a, M. Yu. Tselinenko^a

^a*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

^{*}*e-mail: iiyashin@mephi.ru*

Cosmic ray muons are currently used, by analogy with radiography, to study the internal structure of various large-scale objects of natural and artificial origin. The method is called muonography. We discuss the results of tests of various elements of the detecting system of the muon hodoscope being designed at MEPHI for the development of the muonography method.