

## МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 539.1.074

ДИСПЕРСНЫЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ  
ОПТИЧЕСКОГО СИЛИКОНА

Д. А. Кулешов, К. О. Куринов, И. О. Малий, Ю. В. Стенькин

*В работе представлены результаты исследования сцинтилляционных свойств нового типа детекторов – дисперсных сцинтилляторов, использующих силиконовый компаунд с высокой оптической прозрачностью в качестве связующего компонента. В качестве дисперсной фазы предложены различные сцинтилляционные добавки, как органические, так и неорганические. Проведен сравнительный анализ отклика образцов дисперсных сцинтилляторов с органическими добавками и стандартного пластикового сцинтиллятора при регистрации потока атмосферных мюонов.*

**Ключевые слова:** сцинтиллятор, силикон, люминофор, детектор, мюон.

*Введение.* Сцинтилляционные детекторы играют ключевую роль для широкого класса ядерно-физических экспериментов, обеспечивая регистрацию гамма-квантов, электронов, мюонов, альфа-частиц и других ионизирующих частиц. Все применяемые на сегодняшний день сцинтилляторы можно разделить на два основных типа: органические и неорганические. Органические сцинтилляторы характеризуются быстрыми временами высвечивания, однако их световыход существенно уступает показателям неорганических соединений, таких как NaI(Tl), BGO, ZnS(Ag) и др. [1].

В прошлом, одним из авторов данной работы была успешно разработана и применена концепция неорганического сцинтиллятора с дисперсной структурой (ЛРБ-2), в составе которого спеченные гранулы оксида природного бора  $B_2O_3$  и сульфида цинка, активированного серебром – ZnS(Ag), заливаются специализированным высокопрозрачным силиконовым компаундом [2]. Данный тип сцинтилляторов уже довольно давно

успешно применяется в составе электронно-нейтронных детекторов, которые одновременно регистрируют адронную, за счет вторичных тепловых нейтронов, и электронно-фотонную компоненту широких атмосферных ливней (ШАЛ). Разделение по типу частиц происходит за счет наличия у сульфида цинка в ЛРБ-2 (используется люминофор РС-450 производства ЗАО “НПФ “Люминофор”) нескольких временных компонент высвечивания, позволяющих отделять сигналы от легких и от тяжелых заряженных частиц по форме импульса [3]. В настоящее время мы работаем над созданием специализированных дисперсных силиконовых сцинтилляторов для регистрации и других частиц.

*Структура дисперсных сцинтилляторов.* Базовый элемент дисперсных силиконовых сцинтилляторов – оптически прозрачный силикон  $[(\text{CH}_3)_2\text{SiO}]_n$ , используемый в качестве связующего компонента. Он выполняет функцию эффективной передачи светового сигнала от сцинтиллирующих центров – гранул люминофора, к фотоприемнику, и кроме того, может служить рабочей средой для регистрации быстрых нейтронов. Благодаря высокому содержанию атомов водорода, силикон обеспечивает образование протонов отдачи при упругом рассеянии нейтронов, что позволяет фиксировать их сигнал с помощью дисперсной добавки. В данном случае на роль дисперсной добавки хорошо подходит люминофор на основе ZnS, например РС-450, в котором возможно эффективное разделение сигналов по форме импульса. Было показано, что дисперсный силиконовый сцинтиллятор на основе люминофора РС-450 толщиной 66 мг/см<sup>2</sup> продемонстрировал эффективность регистрации потока быстрых нейтронов от источника <sup>252</sup>Cf на уровне 1% [4].

Помимо люминофора РС-450, ЗАО “НПФ “Люминофор” производит и другие варианты люминофоров с различными активаторами, которые изменяют временные и частотные характеристики сцинтилляции, а также её световыход. В качестве перспективной дисперсной добавки для регистрации силиконовыми сцинтилляторами лёгких заряженных частиц и мюонов нами рассматривался люминофор РС-424, демонстрирующий повышенный световыход с наличием нескольких “быстрых” временных компонент в интервале до 1 мкс и не имеющий более длинных “медленных” компонент, характерных для стандартного сульфида цинка, активированного серебром. Однако, как выяснилось в ходе дополнительных измерений, люминофор РС-424 имеет высокий собственный  $\alpha$ -радиоактивный фон (вследствие использования в качестве активаторов Sr и Eu), превышающий в несколько раз регистрируемый поток атмосферных мюонов, что делает его малоприменимым для измерений абсолютных природных потоков частиц

низкой интенсивности. К тому же проблема усугубляется невозможностью применения к нему метода разделения сигналов по форме импульса, о чем было сказано в наших предыдущих работах [5]. В результате, от него нам пришлось отказаться, хотя он все еще может использоваться в совпадательных (антисовпадательных) системах.

Кроме неорганических люминофоров, в качестве дисперсной фазы силиконовых сцинтилляторов могут быть рассмотрены и различные органические сцинтилляционные добавки (например, измельченные стильбен, антрацен, РРО и др.). Интеграция преимуществ различных люминофоров – мелкодисперсных добавок как неорганических, так и органических сцинтилляторов, с технологичностью заливки прозрачным силиконовым компаундом, открывает возможность для изготовления специализированных детекторов под конкретную ядерно-физическую задачу. Возможность придания таким детекторам нужной геометрической формы, толщины и плотности введенных порошков люминофоров, подбор размера гранул и вещества активатора, позволяет оптимизировать энерговыделение и световыход дисперсных сцинтилляторов при регистрации частиц разных типов и энергий.

*Натурные испытания с различными люминофорами.* Лабораторный стенд, предназначенный для исследования дисперсных силиконовых сцинтилляторов, состоит из светонепроницаемого металлического шкафа, в котором размещен фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-49) и исследуемые образцы сцинтилляторов в форме плоских дисков различной толщины (рис. 1). Все исследуемые сцинтилляторы располагаются непосредственно на стекле ФЭУ, что позволяет нам собирать максимум сцинтилляционного света от пролетающего мюона. Дополнительно, для улучшения светосбора, боковая и задняя поверхность исследуемых сцинтилляторов покрыты светоотражающим материалом с коэффициентом отражения не менее 80%. Электрические сигналы, поступающие с ФЭУ, направляются на интегральный дискриминатор-усилитель (ДИУ) с временем интегрирования 1 мкс, а далее – на канал аналого-цифрового преобразователя (АЦП) Adlink PCI-9812, где осуществляется оцифровка и классификация сигналов по форме импульса. В результате, мы получаем хороший светосбор и, соответственно, статистически обеспеченные сигналы собираемых зарядов с анода ФЭУ. Оцифровываются как амплитудные, так и временные спектры с дискретностью 1 бин = 50 нс (20 MS/s). Для исключения импульсов шумов электроники и выделения полезного сигнала выбираются оптимальные временные ворота, индивидуально исходя из временного спектра сигналов для каждого сцинтиллятора.

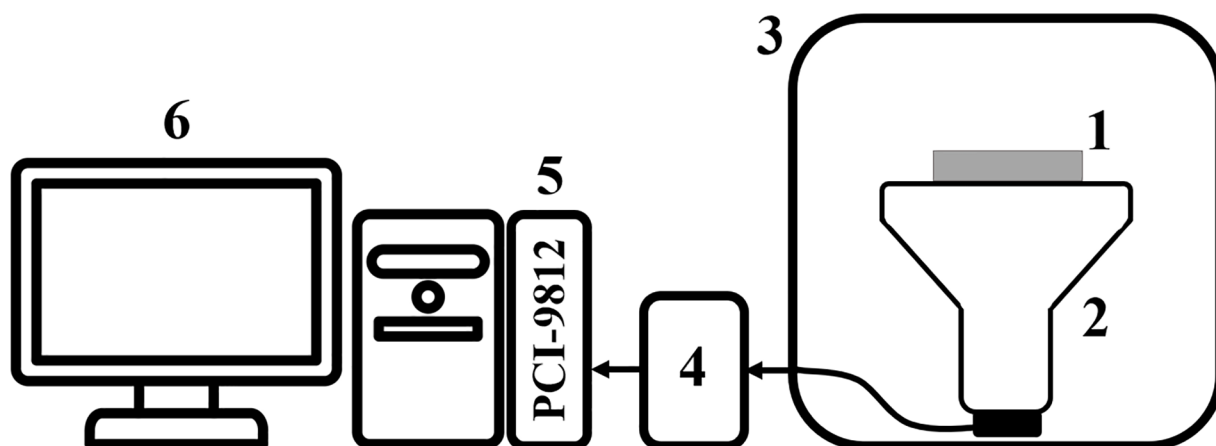


Рис. 1: Схема экспериментального стенда: 1 – исследуемый образец сцинтиллятора, 2 – ФЭУ-49, 3 – светонепроницаемый металлический шкаф, 4 – блок ДИУ, 5 – плата АЦП, 6 – персональный компьютер.

В рамках исследования отклика дисперсных силиконовых сцинтилляторов на поток атмосферных мюонов были изготовлены образцы с различными вариантами дисперсных добавок: смесь мелкодисперсных порошков РРО (2,5-дифенилоксазол) и РОРОР (1,4-бис(5-фенил-2-оксазолил)бензол), традиционно используемых для изготовления пластиковых сцинтилляторов, поликристаллический порошок стильбена. Кроме того, для сравнения был использован небольшой стандартный пластиковый сцинтиллятор промышленного изготовления с примерно схожими геометрическими размерами. Параметры сравниваемых образцов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Параметры исследуемых образцов сцинтилляторов

№	Тип сцинтиллятора	Масса добавки, г	Толщина, мм	Площадь, см <sup>2</sup>	Счет, час <sup>-1</sup> ·см <sup>-2</sup>
1	Стильбен	22	13	45	79.1
2	РРО + РОРОР	11 + 0.3	15	45	22.9
3	Пластиковый	стандартный	14	20	76.9

На рис. 2 представлены амплитудные спектры от образцов дисперсных силиконовых сцинтилляторов и пластикового сцинтиллятора в потоке атмосферных мюонов, приведенные к одной площади. У всех трех спектров наблюдается характерный выраженный

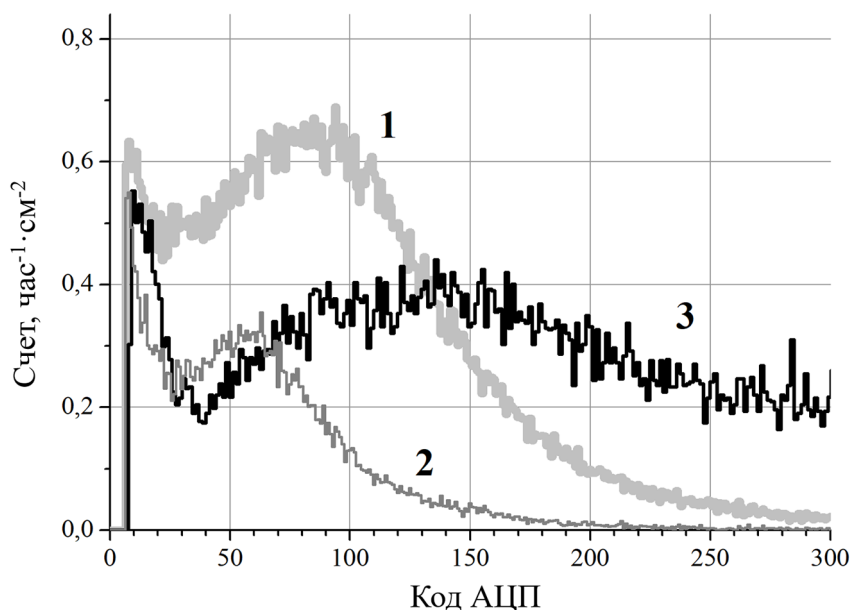


Рис. 2: Амплитудные спектры сигналов от образцов сцинтилляторов из табл. 1 в потоке атмосферных мюонов.

максимум от мюонов, а значение “пик-долина” для пластикового сцинтиллятора порядка 2:1, что достаточно невелико и обусловлено его небольшой толщиной. Для образца дисперсного силиконового сцинтиллятора с порошком поликристаллического стибьбена (кристаллы 0.5–1.5 мм) значение “пик-долина” составляет порядка 1.4:1, при этом максимум от мюонов расположен правее максимума сцинтиллятора с мелкодисперсным порошком PPO и PPOP (фракция <math><0.1</math> мм). Это связано как с большим по массе количеством стибьбена в образце, так и с лучшим световыходом дисперсного сцинтиллятора со стибьбеном: благодаря близкому значению показателей преломления силиконового компаунда ( $n = 1.41$ ) и стибьбена ( $n = 1.62$ ), и достаточно крупным кристаллам последнего, не происходит сильных френелевских потерь сцинтилляционного света на границе разделов фаз. При этом, все неудобства в работе со стибьбеном монокристаллическим, в частности его хрупкость и анизотропия светового выхода, компенсируются при использовании стибьбена в виде поликристаллического порошка в составе дисперсного силиконового сцинтиллятора. Образец № 2 демонстрирует самую маленькую амплитуду мюонного пика, что связано с потерями света в сильно мелкодисперсной структуре использованных порошков PPO и PPOP.

В последнем столбце табл. 1 представлены значения темпа счета сигналов от образцов сцинтилляторов в час на  $\text{см}^2$ , посчитанные как площадь под соответствующими

кривыми (рис. 2). При этом левая граница для подсчета площади бралась по координате локального минимума “долины” амплитудного распределения каждого образца, а правая – до конца спектра. Отчетливо видно, что темп счета у образца № 2 с РРО и РОРОР в три раза меньше темпа счета пластикового сцинтиллятора. Мы связываем это с неоднородностями заполнения дисперсного сцинтиллятора порошками РРО и РОРОР и потерями света на переотражениях в их мелкодисперсной структуре, о чем уже было сказано выше. В то же время образец № 1 с поликристаллическим стильбеном демонстрирует эффективность не хуже пластикового сцинтиллятора и вполне может применяться как его аналог и замена. Отметим, что такой дисперсный сцинтиллятор может быть предпочтительней во многих экспериментах, где требуется создание детектора нестандартной формы и состава в лабораторных условиях, например, детектора схемы антисовпадений для низкофоновых лабораторий.

*Заключение.* Предложенные в работе сцинтилляторы на основе оптического силикона и различных дисперсных добавок как неорганических, так и органических, представляются перспективными для создания детекторов, чувствительных к широкому классу частиц: гамма-квантам, мюонам, легким и тяжелым заряженным частицам, быстрым нейтронам, с возможностью оптимизации оптических свойств за счет подбора размера гранул, толщины сцинтиллятора и типа люминофора. Натурные испытания дисперсных силиконовых сцинтилляторов с органическими добавками, в частности поликристаллического стильбена, продемонстрировали их достаточную эффективность при регистрации атмосферных мюонов: четко выраженный максимум в спектре и рабочее соотношение “пик-долина”, при этом полученный темп счета сопоставим со значениями пластикового сцинтиллятора схожей толщины. Это делает их пригодными, например, для ШАЛовских детекторов, работающих в режиме совпадений, взамен широко используемых пластиковых сцинтилляторов, а также в лабораторных исследованиях, требующих создания сцинтилляторов с заданными свойствами и любой формы (например, в системах антисовпадений). При этом надо иметь в виду, что при создании детекторов большой площади необходимо обеспечить хороший светосбор и, соответственно, достаточно статистически обеспеченный сигнал в фотоэлектронах. Предложенный метод изготовления дисперсных сцинтилляторов путем заливки силиконового компаунда снимает ограничения по форме и размеру детекторов, типичные для монокристаллических или литых полимерных сцинтилляторов. Кроме того, нами рассматривается возможность использования люминофора РС-450 в дисперсных сцинтилляторах и для регистрации мюонов, но при условии разделения сигналов по форме импульса.

В заключение отметим, что в данной работе не исследовались детекторы большой площади, для которых вопрос светосбора, например, с помощью спектросмещающих волокон, может существенно снизить собираемый заряд и повысить неоднородность светосбора по площади сцинтиллятора, что будет влиять на рабочие характеристики детектора.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 24-22-00339.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*. 3rd ed. (John Wiley and Sons, New York, 2000).
- [2] Yuri V. Sten'kin, *Large scintillator detector for thermal neutron recording*. In: *Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications*. Eds.: Sidorov M., Ivanov O. (Nova Sci. Publish., 2010). Ch. 10. P. 253.
- [3] Yuri V. Stenkin, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* **196**, 293 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2009.09.056>.
- [4] D. A. Kuleshov, K. O. Kurinov, I. O. Malii, Yu. V. Stenkin, *Phys. Atom. Nuclei* **88**, 1978 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1063778825090315>.
- [5] D. A. Kuleshov, Yu. V. Stenkin, K. O. Kurinov, I. O. Malii, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **89**, 1030 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1062873825711626>.

Поступила в редакцию 30 ноября 2025 г.

После доработки 14 мая 2026 г.

Принята к публикации 31 мая 2026 г.