

## НИЗКОФОНОВЫЙ ЭН-ДЕТЕКТОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ

*Д. М. Громушкин*<sup>1,\*</sup>, *Ф. А. Богданов*<sup>1</sup>, *А. А. Лахонин*<sup>1</sup>,  
*А. А. Петрухин*<sup>1</sup>, *Ю. В. Стенькин*<sup>1,2</sup>, *О. Б. Щеголев*<sup>2</sup>,  
*К. О. Юрин*<sup>1</sup>, *И. И. Яшин*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>2</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва

Тепловые нейтроны в эн-детекторе регистрируются посредством сцинтиллятора на основе светосостава из ZnS(Ag) с примесью B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Низкая чувствительность детектора к одиночным заряженным частицам обусловлена малой толщиной сцинтиллятора (50 мг/см<sup>2</sup>), при которой сигнал от одиночных заряженных частиц находится на уровне шумов, что и определяет низкофоновость с точки зрения использования его для экспериментов в космических лучах. Детектор данного типа предполагается использовать в установках для регистрации нейтронов широких атмосферных ливней (ШАЛ).

Thermal neutrons are recorded by a detector based on a scintillator compound made of ZnS(Ag) with an admixture of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Low sensitivity of the detector to charged single particles is caused by a small scintillator thickness (50 mg/cm<sup>2</sup>). The latter determines that a single charged particle produces a pulse on a noise level, making the detector a low background one, in terms of the usage in cosmic-ray experiments. The detector is to be used for neutron detection in extensive air showers (EAS).

PACS: 96.50.sd

Регистрация нейтронной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ) представляет большой интерес, так как позволяет исследовать адронную компоненту ШАЛ по всей площади установки. Для проверки данного метода исследований, разработанного в ИЯИ РАН (проект PRISMA), были созданы прототипы PRISMA-32 [1] и PRISMA-YBJ [2], в которых использовался тонкий сцинтиллятор ZnS + LiF. Детекторы с таким сцинтиллятором позволяют одновременно регистрировать две основные компоненты ШАЛ:

---

\*E-mail: DMGromushkin@MEPhI.ru

электронную, при групповом прохождении заряженных частиц, и адронную, посредством регистрации нейтронов, рожденных в результате взаимодействия адронов с ядрами атмосферы и вещества (эн-детектор). В настоящее время в НИЯУ МИФИ ведется создание установки для регистрации атмосферных нейтронов ШАЛ (УРАН) [3]. Для исследования нейтронов в ШАЛ на установке УРАН используется более дешевый сцинтиллятор на основе естественного бора (производители ранее использовавшегося сцинтиллятора, на основе  ${}^6\text{Li}$ , не имеют возможности производить большие партии, требуемые для создания крупномасштабных установок).

### ОПИСАНИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА И КОНСТРУКЦИИ ЭН-ДЕТЕКТОРА

Новый тип компаунд-сцинтиллятора  $\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{B}_2\text{O}_3$  представляет собой гранулы сплава смеси сцинтиллятора  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  и  $\text{B}_2\text{O}_3$  (с необогащенным бором) в виде порошка (композиция ЛРБ-1, изготавливаемая ЗАО НПФ «Люминофор», г. Ставрополь, Россия). Содержание изотопа  ${}^{10}\text{B}$  в натуральном боре составляет около 20 %, а сечение реакции на  ${}^{10}\text{B}$  в  $\sim 4$  раза больше, чем на  ${}^6\text{Li}$ . В результате эффективность борного светосостава без обогащения изотопом  ${}^{10}\text{B}$  примерно равна эффективности светосостава с обогащенным литием. Регистрация нейтронов сцинтиллятором  $\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{B}_2\text{O}_3$  происходит

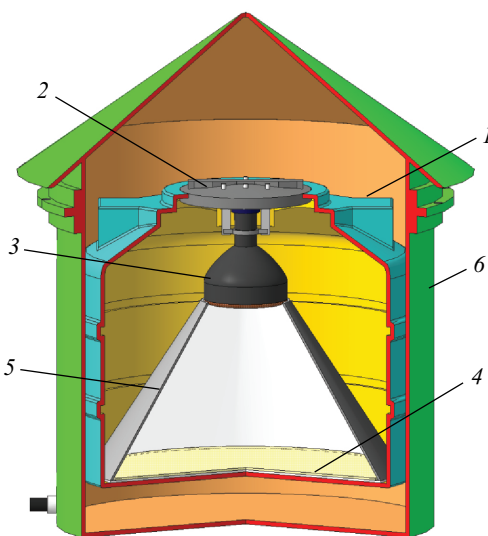
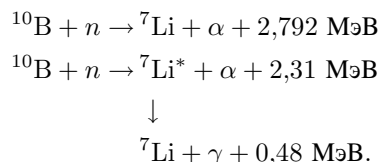


Рис. 1. Конструкция эн-детектора: 1 — светозащитный корпус детектора; 2 — крышка с подвеской; 3 — ФЭУ-200; 4 — сцинтиллятор  $\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{B}_2\text{O}_3$ ; 5 — светоотражающий конус; 6 — внешний корпус (оцинкованная сталь)

по следующим реакциям захвата ( $\sigma = 3838$  б):



Сцинтилляционный импульс создается сильно ионизирующими тяжелыми частицами ( $\alpha$ -частицей и  ${}^7\text{Li}$ ), выделяющими всю энергию внутри одной грани.  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  является наиболее эффективным сцинтиллятором для регистрации тяжелых частиц с рекордным  $\alpha/e$ -соотношением [4, 5]. Сцинтиллятор изготавливается в виде силиконовой пластины площадью  $0,36 \text{ м}^2$  и толщиной  $5 \text{ мм}$ , при этом толщина сцинтилляционной композиции составляет  $50 \text{ мг/см}^2$ , что обеспечивает эффективность регистрации тепловых нейтронов на уровне  $\sim 20 \%$ .

Сцинтиллятор располагается на дне светонепроницаемого пластикового бака объемом  $200 \text{ л}$ . Для улучшения светосбора используется светособирающий конус с диффузной поверхностью. В вершине конуса расположен ФЭУ (ФЭУ-200, г. Новосибирск, Россия), который закреплен на крышке бака. Схема эн-детектора для установки УРАН представлена на рис. 1.

### ОТКЛИК ЭН-ДЕТЕКТОРА НА ПРОХОЖДЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Основное назначение эн-детектора — регистрация тепловых нейтронов. Однако постоянно присутствующий поток заряженных частиц может искажать данные о нейтронах, поэтому для оценки отклика на заряженные частицы было проведено тестирование при помощи супермодуля (СМ) установки УРАГАН [6]. СМ является координатно-трековым детектором, состоящим из восьми плоскостей. Хорошие пространственное и угловое разрешения СМ ( $1 \text{ см}$  и  $\sim 1^\circ$ ) позволяют детально изучать структуру сцинтилляционных детекторов, расположенных на его поверхности. В ходе такого исследования получены детальные матрицы амплитуды отклика счетчика и эффективности регистрации при прохождении около вертикального мюона через разные участки рабочего объема сцинтиллятора. Пример матриц при отборе сигналов с порогом  $10 \text{ мВ}$  показан на рис. 2. Для усиления сигналов использовался интегрирующий предусилитель, который будет использоваться при регистрации нейтронов ШАЛ в установке УРАН.

На рис. 2 можно видеть очертание сцинтиллятора, в котором значения амплитуд близки к уровню шумовой линии. Характерная амплитуда сигналов при регистрации тепловых нейтронов в такой конфигурации детектора

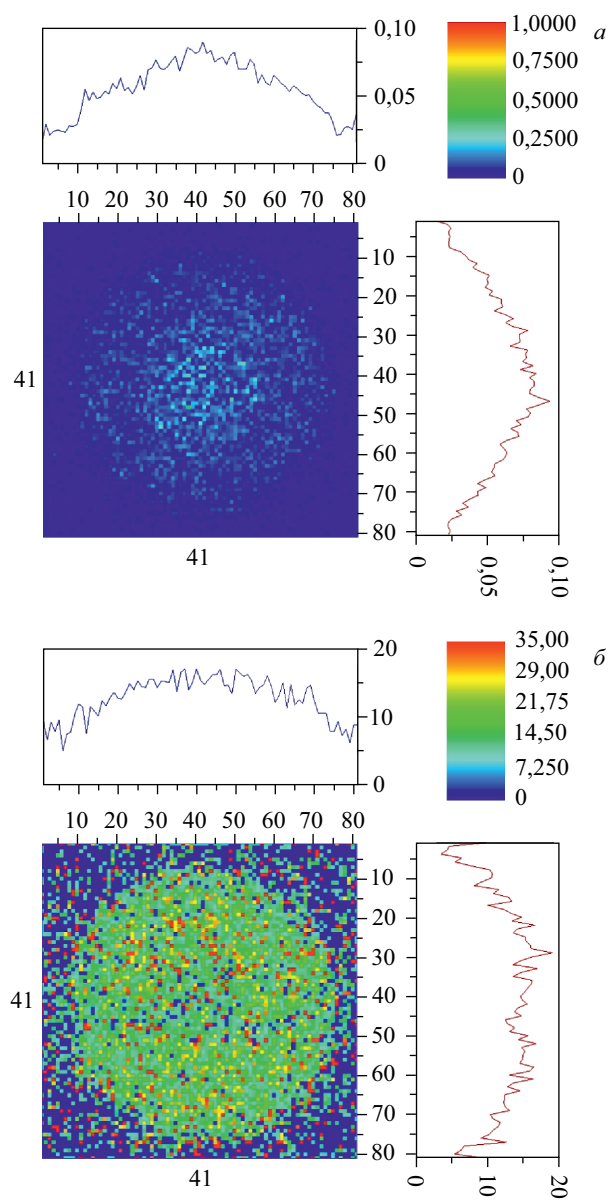


Рис. 2. Матрицы по эффективности (а) и средней амплитуде отклика (б) на уровне сцинтиллятора для треков, не прошедших через ФЭУ (порог 10 мВ)

составляет 20–50 мВ. Оценка эффективности срабатывания детектора при пороге 10 мВ на заряженную частицу составила 14%. Однако при множественном прохождении заряженных частиц (события от прохождения ШАЛ) эн-детектор показывает хороший отклик и, соответственно, позволяет производить оценку их числа.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Второй важной характеристикой эн-детектора является эффективность регистрации тепловых нейтронов. Для увеличения статистики и минимизации влияния факторов окружающей среды при измерениях использовался источник нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  с потоком нейтронов  $\sim 1000 \text{ с}^{-1}$ . Источник помещался под эн-детектором в боксе-замедлителе, состоящем из водородосодержащего вещества (полиэтилена толщиной 100 мм). Оцифровка сигналов происходила с помощью двухканального цифрового осциллографа Velleman PCSU1000. Отбор нейтронов основывался на методике разделения сигналов по форме импульса, для лучшего разделения сигналы интегрировались со временем 10 мкс. Все измерения проводились на одном ФЭУ (ФЭУ-200) при одном коэффициенте усиления.

На рис. 3 представлены спектры нейтронов, набранные от естественного фона и от источника нейтронов. Использование источника нейтронов увеличивает темп счета тепловых нейтронов почти в 10 раз.

Сравнение эн-детекторов со сцинтиллятором на естественном боре с детекторами, в которых использовался сцинтиллятор на основе  $^6\text{Li}$  ( $30 \text{ мг/см}^2$ ),

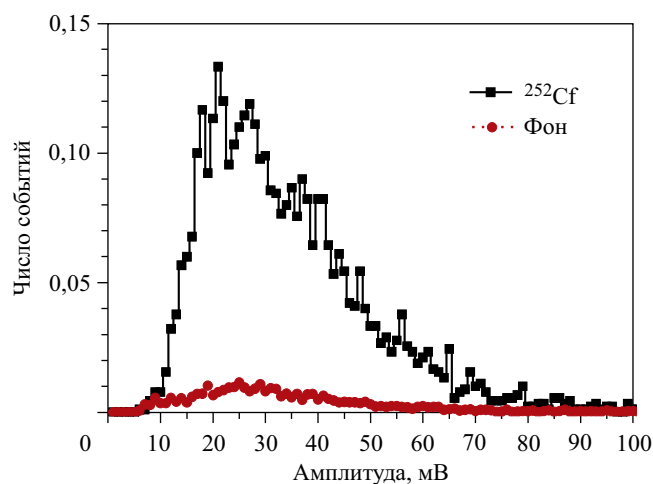


Рис. 3. Спектр амплитуд сигналов от зарегистрированных тепловых нейтронов с использованием источника нейтронов (■) и без использования источника — от фона (●)

показало (рис.4), что разность темпа счета тепловых нейтронов для этих сцинтилляторов составляет не более 10% ( ${}^6\text{Li}$  —  $4 \text{ с}^{-1}$ ,  ${}^{10}\text{B}$  —  $3,7 \text{ с}^{-1}$ ), а положение максимума спектра для  ${}^6\text{Li}$  в полтора раза больше, чем для  ${}^{10}\text{B}$  (энергия  $\alpha$ -частиц от захвата нейтронов  ${}^6\text{Li}$  — 4,5 МэВ, а  ${}^{10}\text{B}$  — 2,3 МэВ).

Для оценки эффективности регистрации тепловых нейтронов сцинтиллятором  $\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{B}_2\text{O}_3$  были проведены измерения потока тепловых нейтронов с одним слоем сцинтиллятора и с двумя слоями. Второй слой сцинтиллятора (со светоизоляцией из черной бумаги) использовался в качестве поглощающего экрана (рис.5). Проведено несколько наборов измерений, время каждого набора составляло 60 мин. В результате получено, что темп

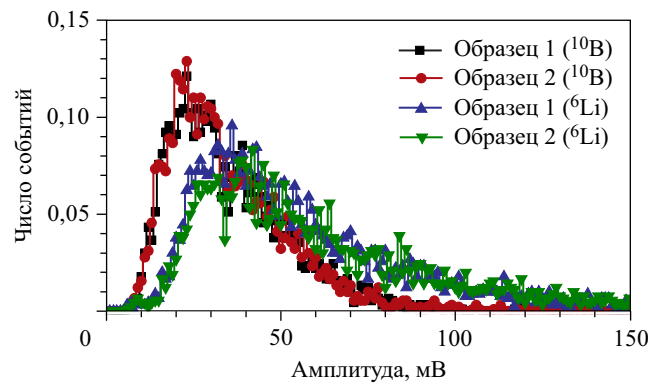


Рис. 4. Сравнение литиевого и борного сцинтилляторов

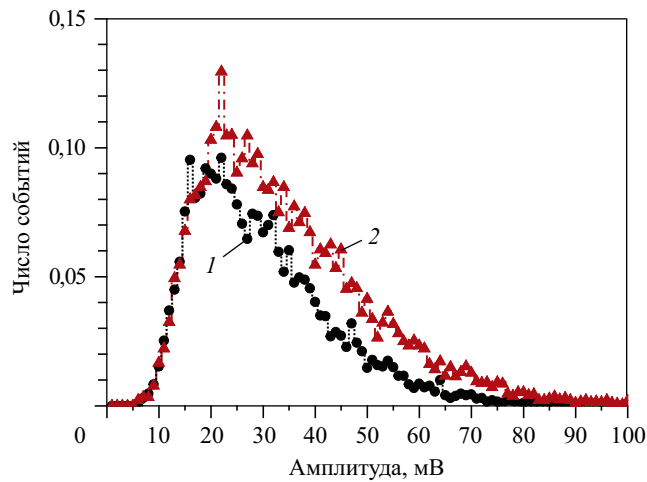


Рис. 5. Спектры зарегистрированных тепловых нейтронов при экранировке вторым листом сцинтиллятора (1) и без экранировки (2)

счета с экранировкой составил  $(2,7 \pm 0,2) \text{ с}^{-1}$ , а для того же сцинтиллятора без экранировки —  $(3,5 \pm 0,2) \text{ с}^{-1}$ . Соответственно, оценка эффективности захвата тепловых нейтронов (эффективность регистрации) составляет  $(3,5 - 2,7) / 3,5 = 0,23$  или 23 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено тестирование эн-детектора для создаваемой установки УРАН. Детектор со сцинтиллятором на естественном боре не уступает по своим характеристикам использовавшемуся ранее сцинтиллятору на  ${}^6\text{Li}$ . Показано, что детектор обладает слабой чувствительностью к одиночным заряженным частицам и в то же время может регистрировать групповое прохождение частиц. Полученная оценка эффективности регистрации тепловых нейтронов таким детектором составляет около 23 %.

Работа выполнена на уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках сотрудничества Научно-образовательного центра НЕВОД (НИЯУ МИФИ) и Института ядерных исследований РАН, а также грантов РФФИ (№ 14-02-00996 и № 16-32-00054).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gromushkin D., Alekseenko V., Petrukhin A., Shchegolev O., Stenkin Yu., Stepanov V., Yashin I., Zadeba E. The Array for EAS Neutron Component Detection // JINST. 2014. V. 9. P. C08028.
2. ARGO-YBJ and PRISMA Collabs. Detection of Thermal Neutrons with the PRISMA-YBJ Array in Extensive Air Showers Selected by the ARGO-YBJ Experiment // Astropart. Phys. 2016. V. 81. P. 49–60; astro-ph.IM. arXiv:1512.01326v2. 2016.
3. Gromushkin D. M., Barbashina N. S., Bogdanov F. A., Kokoulin R. P., Ovchinnikov V. V., Petrukhin A. A., Stenkin Yu. V., Khokhlov S. S., Shulzhenko I. A., Yashin I. I. Project of the URAN Array for Registration of Atmospheric Neutrons // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 675. P. 032043.
4. Медведев М. Н. Сцинтилляционные детекторы. М.: Атомиздат, 1977.
5. Allen W. D. Neutron Detection. Harwell, 1960.
6. Барбашина Н. С., Кокоулин Р. П., Компаниец К. Г., Маннокки Дж., Петрухин А. А., Сааведра О., Тимашков Д. А., Тринкери Дж., Чернов Д. В., Шутенко В. В., Яшин И. И. Широкоапертурный мюонный годоскоп большой площади УРАГАН // ПТЭ. 2008. № 2. С. 26–32.