

УДК 524.1

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА УСТАНОВКЕ ИЗ 16 ЭЛЕКТРОННО-НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ИЯИ РАН

© 2021 г. О. Б. Щеголев¹, *, **В. В. Алексеенко¹**, Д. А. Кулешов¹,
К. Р. Лёвочкин¹, Ю. В. Стенькин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: shchegolev@inr.ac.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

В рамках проекта LHAASO (large high altitude air shower observatory) в Тибете создается установка ENDA (electron neutron detector array). На территории ИЯИ РАН в Москве создан прототип кластера установки ENDA из 16 электронно-нейтронных детекторов для изучения широких атмосферных ливней с энергиями выше 1 ПэВ. В установке был применен новый метод сбора данных с использованием 32-канального АЦП. Метод отбора нейтронных импульсов проверен с использованием радиоактивных источников. В проекте полноценно реализован метод одновременной регистрации широких атмосферных ливней и вариаций фона тепловых нейтронов.

DOI: 10.31857/S0367676521040347

ВВЕДЕНИЕ

Более 10 лет назад в ИЯИ РАН была разработана концепция установки, способной одновременно регистрировать электромагнитную и адронную компоненты широкого атмосферного ливня (ШАЛ) под названием PRISMA (primary spectrum measurement array) [1]. В основе этой концепции лежит использование электронно-нейтронного детектора (эн-детектора, также разработанного в ИЯИ РАН) на основе неорганического сцинтилляционного компаунда $ZnS(Ag) + V_2O_5$ с небогащенным бором. Регистрация тепловых нейтронов происходит благодаря большому сечению (n, α)-реакции тепловых нейтронов на ядре ^{10}B , содержание которого в природном боре $\sim 19\%$. В результате реакции ядро бора распадается на альфа-частицу и ядро 7Li с суммарной энергией 2.3 МэВ (либо 2.7 МэВ в 7% случаев). С другой стороны, благодаря малой толщине сцинтиллятора (50 мг/см^2) и высокому α/e соотношению сигнал от одной релятивистской заряженной частицы на порядок меньше, чем от нейтрона и находится ниже порога регистрации детектора. Подробно о сцинтилляторе и конструкции детектора можно прочитать в работах [2–4].

К настоящему времени было создано несколько прототипов детекторов проекта PRISMA, в частности PRISMA-32 в Москве и PRISMA-YBJ в Тибете [2–4]. Реализация полномасштабной уста-

новки планируется в рамках международного проекта LHAASO (large high altitude air shower observatory) в Китае в Тибете на высоте 4410 м над уровнем моря [5]. Планируемая установка под названием ENDA (electron neutron detector array) будет иметь площадь $\sim 10000 \text{ м}^2$ и состоять из 400 эн-детекторов, установленных с шагом 5 м. Для тестирования стабильности работы детекторов и электроники вне помещения, а также отладки методики регистрации и обработки сигналов был создан еще один прототип из 16 эн-детекторов на территории ИЯИ РАН в Москве под названием ENDA-INR. На данном прототипе планировалось протестировать методику одновременной регистрации ШАЛ и вариаций фонового потока тепловых нейтронов. Кроме того, представляет интерес сравнение данных, полученных одинаковым образом на установках в горах и на уровне моря.

УСТАНОВКА

Установка ENDA-INR состоит из 16 эн-детекторов, расположенных в форме квадрата 4×4 с шагом 5 м. В центре установки расположен металлический теплоизолированный шкаф с функциями подогрева и вентиляции для электроники. Внутри шкафа находятся: источник высоковольтного питания, источник низковольтного питания, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и компьютер. От шкафа к каждому детектору проложен

металлический рукав с кабелями. К компьютеру внутри шкафа организован удаленный доступ через интернет. Сигналы с детекторов снимаются с двух динодов фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) для увеличения динамического диапазона. Сигнал с каждого динода поступает на предусилитель и интегрируется с постоянной времени 1 мкс. Далее сигнал с каждого динода поступает на отдельный вход 32-канального АЦП и оцифровывается в течение 1.8 мкс с шагом 16 нс. АЦП обрабатывает сигналы со всех 16 детекторов и присваивает каждому сигналу временную метку с точностью 8 нс.

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ

Каждый сигнал независимо поступает на компьютер и совпадение определяется путем сравнения временных меток сигналов с разных каналов в онлайн программе. Такой подход позволяет решить сразу 2 задачи: обрабатывать как одновременные срабатывания (ШАЛ), так и одиночные (фоновые). При этом отпадает надобность использования триггерного блока для отбора событий. Задержанные импульсы от захватов тепловых нейтронов регистрируются во временном окне от 100 мкс до 20 мс после совпадения сигналов с более чем 2 детекторов. Попадание сигнала во временное окно также определяется временной меткой сигнала.

В случае если сигнал не попадает во временное окно и нет совпадения сигналов с нескольких детекторов, импульс считается фоновым. Фоновые импульсы накапливаются в течение минутных интервалов и записываются в вариационный файл. Вариации фона важны для решения задачи регистрации широких атмосферных ливней, поскольку позволяют контролировать стабильность работы установки и настройку детекторов. При этом вариации фона сами по себе представляют для нас большой интерес, так как они чувствительны к процессам геофизического происхождения, таким как землетрясения, приливные волны и собственные колебания Земли [6–8].

При решении данных задач для нас важно разделить импульсы от нейтронов и импульсы от одновременного прохождения нескольких заряженных частиц через сцинтиллятор. Это позволит нам снизить фон при регистрации задержанных нейтронов от ШАЛ, а также получить два вариационных канала различной природы и исследовать их отдельно друг от друга. Разделение сигналов возможно благодаря различной форме импульса от нейтрона и от релятивистских заряженных частиц. Продукты распада ядра бора после захвата нейтрона – это тяжелые и медленно движущиеся частицы. Они возбуждают “медленные” компо-

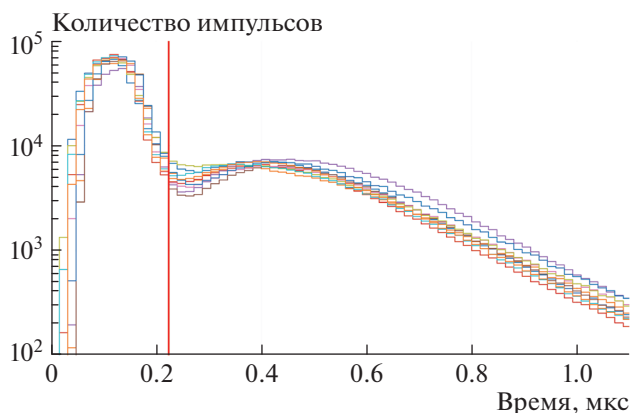


Рис. 1. Распределение импульсов по времени нарастания фронта с детекторов установки ENDA-INR. Красной линией отмечена граница разделения сигналов на нейтроны и “короткие”. Нейтроны справа от линии.

ненты сцинтиллятора ZnS(Ag), что приводит к более долгому собиранию заряда и, следовательно, к длительному нарастанию фронта интегрированного импульса. Напротив, релятивистские частицы возбуждают главным образом “быстрые” временные компоненты, и фронт импульса в этом случае очень крутой. Используя длительность переднего фронта, мы с высокой эффективностью разделяем эти два вида сигналов. На рис. 1 показано распределение сигналов по длительности переднего фронта. Красной линией отмечено пороговое значение, по которому происходит разделение. На рис. 2 показано временное распределение задержанных импульсов в ливне, слева временное распределение нейтронов, справа – коротких импульсов, которые мы называем “заряженные”. Из рисунка видно, что только нейтроны имеют экспоненциальное распределение с временной константой 0.6 мс, тогда как “короткие” импульсы дают равномерный фон, при этом выше в ~2 раза чем фон в нейтронах. Таким способом нам удалось значительно снизить фон задержанных импульсов при регистрации ШАЛ.

ТЕСТИРОВАНИЕ С ИСТОЧНИКАМИ

Для того чтобы протестировать эффективность разделения сигналов по форме были использованы два радиоактивных источника. Первый – источник нейтронов ^{252}Cf – помещался под центр детектора, между источником и детектором располагался слой парафина толщиной 5 см для замедления нейтронов. Суммарная скорость счета нейтронов и “коротких” импульсов выросла в среднем на 212 импульсов в минуту. Из них в среднем 6 импульсов были определены как “ко-

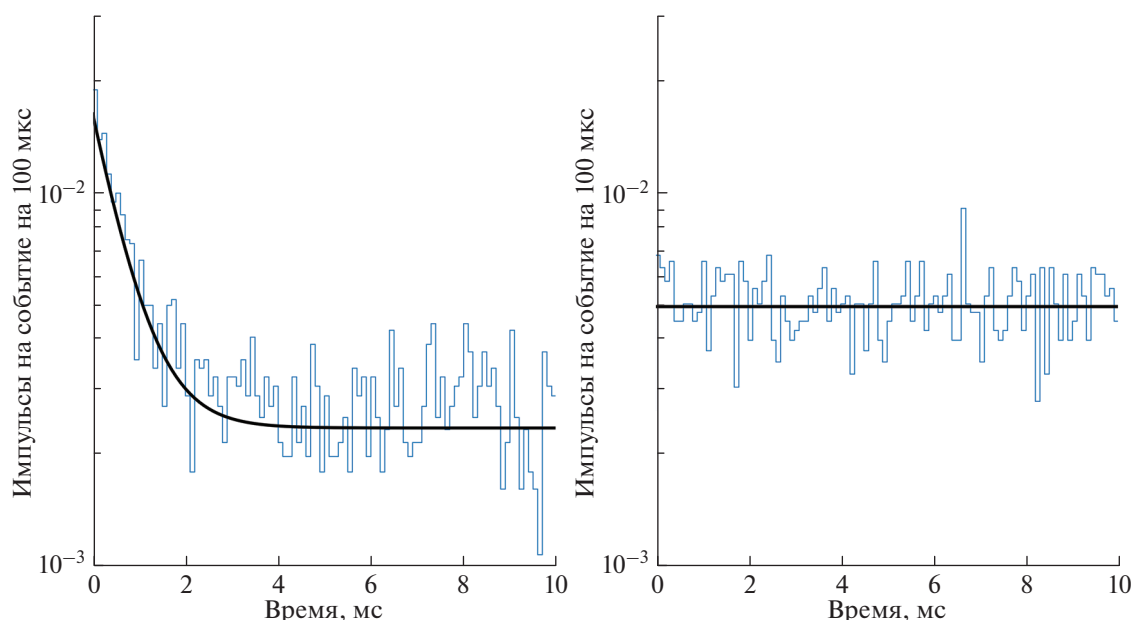


Рис. 2. Временное распределение задержанных импульсов в ШАЛ по данным установки ENDA-INR. Слева распределение для нейтронов, справа – для “коротких” импульсов. Синяя линия – усреднение по нескольким соседним бинам, черная линия – аппроксимация (экспонента + постоянный фон).

роткие”, а 206 были определены как нейтроны. Таким образом, считая, что весь прирост импульсов обусловлен нейтронами, можно заключить, что вероятность определить нейтронный импульс правильно составляет более 97%. Второй тест – с источником ^{232}Th , продукты распада которого могут при бета-распадах помимо электрона излучать одновременно несколько гамма-квантов, которые с некоторой вероятностью могут конвертироваться в электроны, или родить электрон-позитронную пару и, в результате, обеспечить одновременное прохождение нескольких заряженных частиц через сцинтиллятор [8] и превышение суммарного сигнала над порогом.

Поскольку это происходит очень быстро, то импульс оказывается коротким и попадает в категорию “заряженные”. Источник также помещался под центр детектора, но уже без парафина. Суммарный прирост скорости счета в среднем составил 46 импульсов в минуту, из них прирост нейтронов – 0, прирост “коротких” импульсов – 46. Таким образом, вероятность правильно определить короткий импульс в данном случае тоже близка к 100%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯИ РАН создан прототип установки ENDA из 16 эн-детекторов вне помещения. В системе регистрации была реализована новая методика одновременной регистрации ШАЛ и вариаций фона тепловых нейтронов. Реализована и протестирована

на методика отбора нейтронных сигналов по форме импульса. Эффективность разделения продемонстрирована на примере временных распределений задержанных импульсов в ШАЛ.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-02-00339а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stenkin Yu.V.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2009. V. 196. P. 293.
2. *Gromushkin D.M., Alekseenko V.V., Petrukhin A.A. et al.* // J. Instrum. 2014. V. 9. No. 8. Art. No. C08028.
3. *Bartoli B., Bernardini P., Bi X. et al.* // Astropart. Phys. 2016. V. 81. P. 49.
4. *Громушкин Д.М., Волченко В.И., Петрухин А.А. и др.* // Яд. физ. 2015. Т. 18. № 5. С. 379; *Gromushkin D., Volchenko V., Petrukhin A. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. No. 5. P. 349
5. *Bai X., Bi B.Y., Bi X.J. et al.* // arXiv: 1905.02773. 2019.
6. *Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Cai Z. et al.* // Pure Appl. Geophys. 2017. V. 174. P. 2763.
7. *Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Громушкин Д.М. и др.* // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. № 5. С. 845; *Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Gromushkin D.M. et al.* // JETP. 2017. V. 124. No. 5. P. 718.
8. *Stenkin Yu.V., Alekseenko A.A., Cai Z. et al.* // J. Environ. Radioact. 2019. V. 208. Art. No. 10598.
9. *Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Dzhappuev D.D. et al.* // J. Environ. Radioact. 2020. V. 222. Art. No. 106335.

First results from array of 16 electron-neutron detectors in INR RAS**O. B. Shchegolev^{a, *}, V. V. Alekseenko^a, D. A. Kuleshov^a, K. R. Levochkin^a, Yu. V. Stenkin^a**^a*Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*^{*}*e-mail: shchegolev@inr.ac.ru*

ENDA (Electron Neutron Detector Array) project is developed in frames of LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) located in Tibet, China. The prototype of single cluster of ENDA consisting of 16 electron-neutron detectors was installed in INR RAS in Moscow for study of extensive air showers with energies above 1 PeV. The novel technique of data acquisition is used with 32-channel FADC produced by CAEN. The neutron pulse selection technique was tested using radioactive sources. Method of simultaneous recording of extensive air showers and background variations is fully realized.