

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ НА УСТАНОВКЕ PRISMA-32

Д. М. Громушкин^{1,*}, *Ф. А. Богданов*¹, *Ю. В. Стенькин*^{1,2},
*О. Б. Щеголев*², *К. О. Юрин*¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

² Институт ядерных исследований РАН, Москва

Приводятся данные по исследованию нейтронной компоненты ШАЛ, полученные на установке PRISMA-32. Вторичные нейтроны сначала замедляются и только потом регистрируются специализированными сцинтилляционными электронно-нейтронными детекторами (эн-детекторами) в интервале 20 мс, после прихода фронта ливня. Установка PRISMA-32 состоит из 32 эн-детекторов и работает в непрерывном режиме набора информации более пяти лет.

Data on the investigation of the neutron component of the EAS obtained with the PRISMA-32 array are presented. Secondary neutrons are first slowed down, and then are registered by means of specialized scintillation electron–neutron detectors (en-detectors) within 20 ms interval after the arrival of the shower front. The PRISMA-32 array consists of 32 en-detectors and operates in a continuous mode of collecting information for about five years.

PACS: 96.50.S-; 96.50.sd

ВВЕДЕНИЕ

Существующие сегодня методы исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ) основаны на регистрации электромагнитной и мюонной компонент с использованием сцинтилляционных, черенковских и флуоресцентных детекторов, а в некоторых редких случаях — и на изучении адронов ШАЛ с помощью калориметров. Однако калориметры не получили широкого распространения и чаще всего имеют весьма ограниченную площадь (как по техническим, так и по экономическим причинам).

Нейтронная компонента ШАЛ, являющаяся неотъемлемой частью адронной компоненты, образуется при взаимодействии адронов ливня с ядрами атомов атмосферы и поверхности Земли (в так называемых ядерных расщеплениях) и несет важную информацию о развитии ШАЛ. Преимуществом

*E-mail: dmgramushkin@mephi.ru

изучения нейтронной компоненты является то, что она измеряется по всей площади установки, временной профиль ШАЛ в нейтронах составляет порядка 20 мс (почти в 10^6 раз больше профиля в заряженных частицах вблизи ствола), что облегчает их подсчет; количество вторичных нейтронов на уровне наблюдения много больше числа родительских адронов и заметно больше полного числа мюонов в ливне.

В ИЯИ РАН был предложен проект PRISMA (PRImary Spectrum Measurement Array), основанный на идее регистрации запаздывающих тепловых нейтронов, сопровождающих ШАЛ [1]. В этом проекте в качестве регистрирующего элемента используются эн-детекторы, которые способны регистрировать сразу две компоненты ливней: электронно-фотонную при групповом прохождении заряженных частиц, в основном электронов (э), и адронную через тепловые нейтроны (н).

В 2006 г. в рамках совместного проекта НИЯУ МИФИ и ИЯИ РАН начали разработку и создание установки PRISMA-32 для изучения адронной компоненты ШАЛ посредством регистрации тепловых нейтронов на поверхности Земли, в основе которой находятся 32 эн-детектора. Начиная с 2012 г. установка PRISMA-32 работает в режиме непрерывного набора информации.

1. УСТАНОВКА PRISMA-32

Установка PRISMA-32 состоит из двух независимо работающих кластеров по 16 эн-детекторов и размещена на четвертом этаже здания экспериментального комплекса НЕВОД в НИЯУ МИФИ, над черенковским водным бассейном (рис. 1) [2, 3]. Расстояния между детекторами — 2,5 и 5 м. Общая площадь установки ~ 500 м². Диапазон измерений по числу заряженных частиц составляет от 20 до 75 000 частиц на детектор, диапазон по числу нейтронов — от 1 до 1000 нейтронов на один детектор.

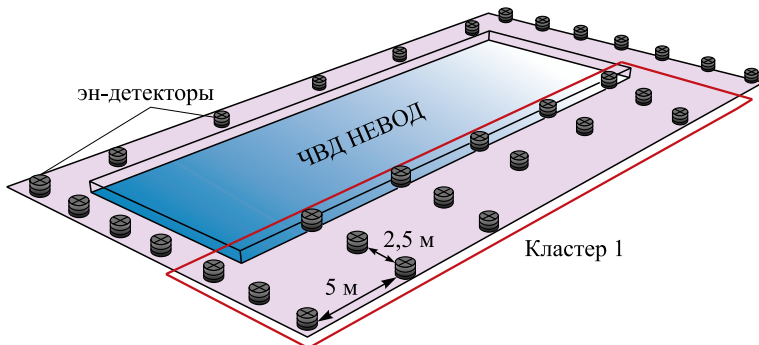


Рис. 1. Схема установки PRISMA-32

Для регистрации нейтронов в ШАЛ используется эн-детектор с тонким неорганическим сцинтилятором $\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{LiF}$, где Li обогащен до 90 % изотопом ${}^6\text{Li}$ [2]. Конструкция детектора является стандартной для сцинтиляционных детекторов ШАЛ с той лишь разницей, что вместо обычного толстого пластического сцинтилятора используется специализированный тонкий сцинтилятор. В основании светонепроницаемого корпуса (промышленной полиэтиленовой бочки объемом 200 л, высотой 570 мм и диаметром 740 мм) расположен неорганический сцинтилятор $\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$ в виде тонкого слоя ($\sim 30 \text{ мг/см}^2$), который просматривается одним фотоумножителем (ФЭУ-200) с диаметром фото катода 15 см. Для улучшения светосбора используется светоотражающий конус из фольгированного вспененного полиэтилена толщиной 5 мм. В результате собирается $\sim 50\text{--}100$ фотоэлектронов от захвата одного нейтрона. Площадь каждого эн-детектора составляет $0,36 \text{ м}^2$.

2. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Схема подключения одного кластера из 16 эн-детекторов показана на рис. 2. Питание ФЭУ осуществляется от одного высоковольтного источника через распределительный блок с потенциометрами. Напряжение пита-

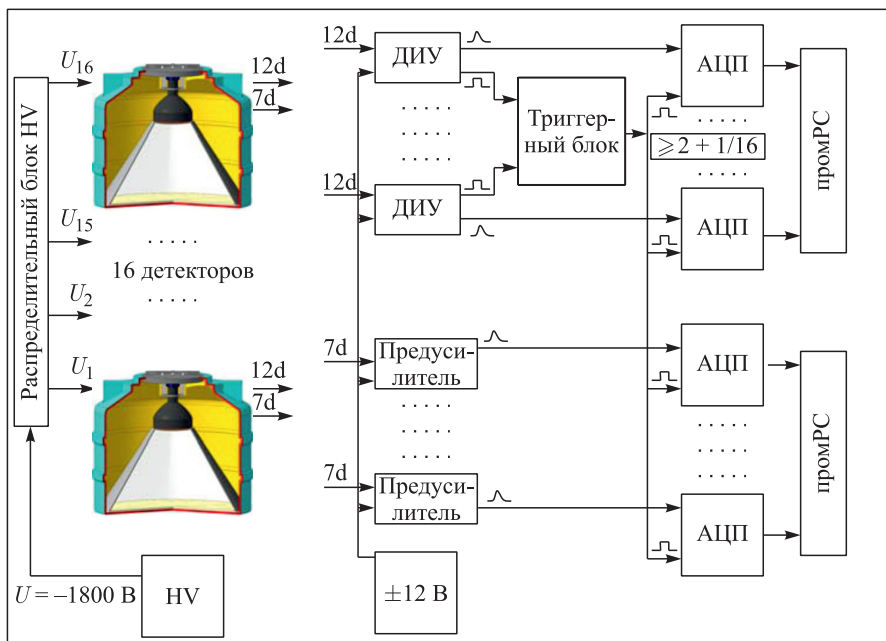


Рис. 2. Схема подключения детекторов

ния каждого ФЭУ подобрано таким образом, чтобы отклик на регистрацию нейтрона был одинаков. Набор информации осуществляется с двух динодов делителя ФЭУ (12-го и 7-го), это связано с тем, что когда сигнал на 12-м диноде при регистрации мощного ливня достигает насыщения, то сигнал на 7-м диноде, имеющем коэффициент усиления в 60–80 раз меньше, сохраняет линейность и позволяет значительно увеличить диапазон энергии регистрируемых ШАЛ от заряженной компоненты. Аналоговый сигнал с 12-го динода поступает на дискриминатор-интегратор-усилитель (ДИУ), а с 7-го динода — на предусилитель. Все импульсы интегрированы с по-

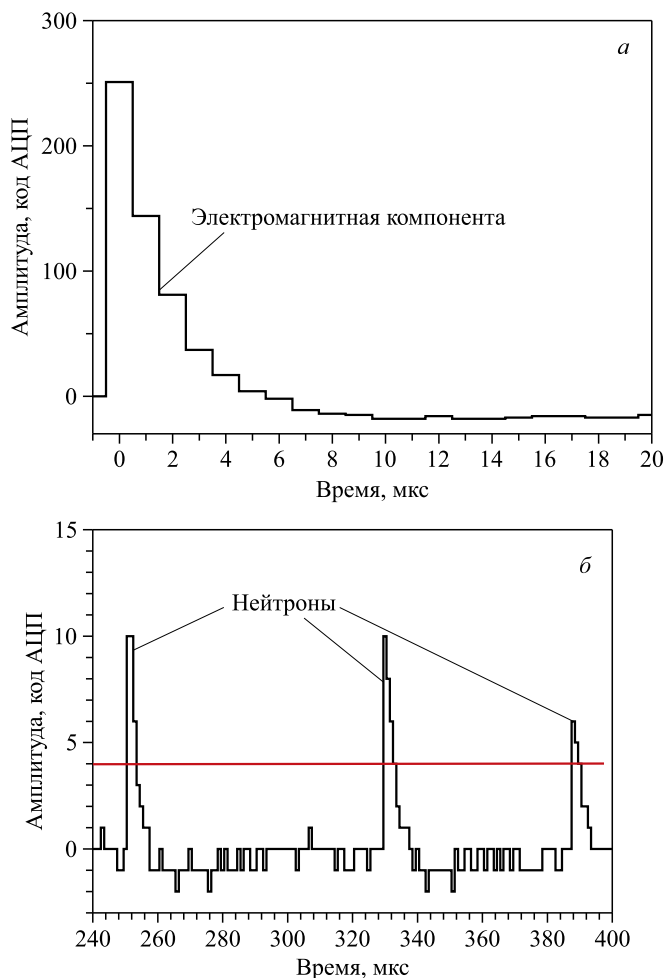


Рис. 3. Осциллограмма зарегистрированного ШАЛ: а) отклик на электромагнитную компоненту; б) отклик при регистрации нейтронов

стоянной времени, равной 1 мкс. ДИУ при превышении порога (4 мВ) вырабатывает триггерный импульс Т1, который поступает на триггерный блок. За счет низкого темпа счета детекторов ($\sim 1 \text{ с}^{-1}$ на уровне моря) и небольшого количества детекторов в кластере триггерный блок выдает сигнал Т2 при каждом 16-м срабатывании триггера Т1 или при одновременном срабатывании более двух детекторов. При выработке триггера Т2 производится оцифровка сигналов с 32 каналов АЦП (по 16 на 12-й и 7-й диоды).

Обработка оцифрованных сигналов с каждого из каналов АЦП осуществляется в он-лайн режиме с использованием специализированной программы. Информация о нейтронах ШАЛ собирается во временных воротах 20 мс после выработки триггерного импульса с шагом оцифровки 1 мкс (20 000 точек). Первый импульс, образуемый ионизирующими частицами (в основном электронами), используется для измерения энерговыделения (рис. 3, а), а задержанные импульсы от захвата нейтронов, регистрируемые в течение 20 мс после срабатывания триггера, — для подсчета количества зарегистрированных нейтронов в каждом детекторе (рис. 3, б).

При он-лайн обработке осциллограмм на диске сохраняется основная информация о зарегистрированном ШАЛ: энерговыделение от электронно-фотонной компоненты в каждом детекторе и число зарегистрированных нейтронов с временем их регистрации после фронта ШАЛ (с шагом 100 мкс). В случае регистрации ШАЛ с большим энерговыделением или большим числом нейтронов сохраняется полная осциллограмма (20 000 точек) для каждого из детекторов кластера.

Часы обоих кластеров синхронизированы, и данные объединяются оффлайн при совпадении по времени с точностью до ± 10 мс. При объединении данных двух кластеров в одно событие накладываются дополнительные требования: исключение помех по форме импульса, кратность сработавших детекторов не менее четырех во всей установке, исключение случайных наложений разных ШАЛ в пределах 20 мс.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В обработке данных использовалась информация за пять лет работы установки PRISMA-32. Время работы установки составляет около 95 % календарного времени. Получены данные о временном распределении тепловых нейтронов ШАЛ, а также функция пространственного распределения (ФПР) нейтронов и спектр ШАЛ по числу нейтронов.

Временное распределение регистрируемых тепловых нейтронов, т. е. задержки времени их регистрации относительно момента прихода фронта ШАЛ, показано на рис. 4. Данные приводятся для двух кластеров отдельно и для совместных событий. Использовались события, в которых сработало более

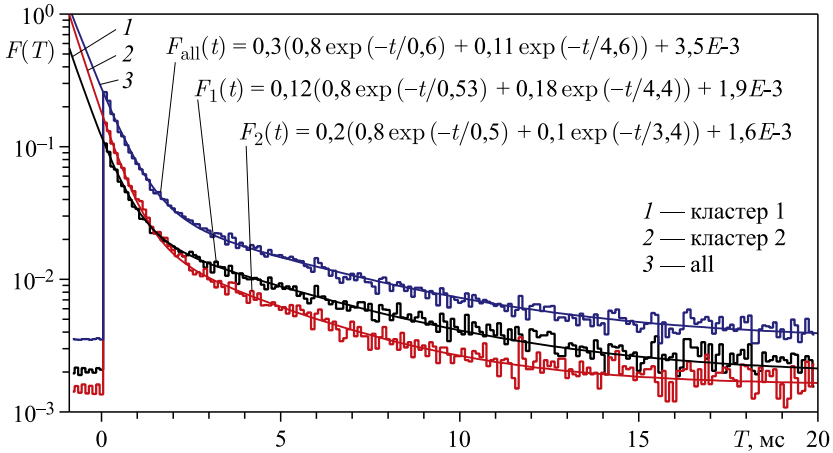


Рис. 4. Временное распределение нейтронов, измеренное на двух кластерах установки PRISMA-32

двух детекторов и амплитуда сигнала по суммарному энерговыделению от электронно-фотонной компоненты превысила 300 мВ.

Полученные временные распределения можно фитировать двойной экспоненциальной функцией вида

$$F(t) = A_1 \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{t_2}\right) + y_0.$$

Параметры функции для каждого из кластеров немного отличаются. Это объясняется тем, что кластеры имеют разные схемы размещения детекторов. Первый кластер представляет собой прямоугольник с расставленными в нем детекторами с шагом 2,5 на 5 м, второй кластер расположен вокруг бассейна вдоль стен здания экспериментального комплекса (см. рис. 1). Поэтому у второго кластера первый параметр несколько меньше из-за влияния близко расположенного водного бассейна, а второй параметр немного меньше из-за влияния стен здания (расстояние до стен меньше, чем до потолка). Первый параметр (t_1) связан со средним временем жизни нейтронов в бетоне, т. е. выходящих из-под детектора (локально рожденных). Второй параметр (t_2) может быть связан с нейтронами, рожденными в потолке и стенах здания.

Для определения ФПР и спектра ШАЛ по числу нейтронов использовались события с осью в пределах установки. Ось ШАЛ определялась с использованием локации оси посредством наложения функции Нишимуры–Каматы–Грейзена на данные детекторов по заряженной компоненте и подбором наиболее подходящих положений осей ШАЛ методом максимума правдоподобия.

Из рис. 5 видно, что данные можно фитировать двойной экспоненциальной функцией

$$F(R) = A_1 \exp\left(-\frac{R}{r_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{R}{r_2}\right) + y_0$$

с параметрами экспонент $r_1 = 1$ м и $r_2 = 10,5$ м. При этом первый параметр может быть связан с характерным расстоянием родительских адронов

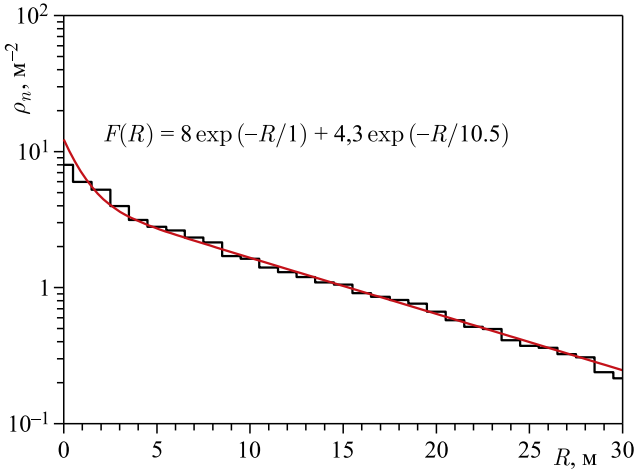


Рис. 5. Пространственное распределение тепловых нейтронов в зависимости от расстояния до оси ШАЛ

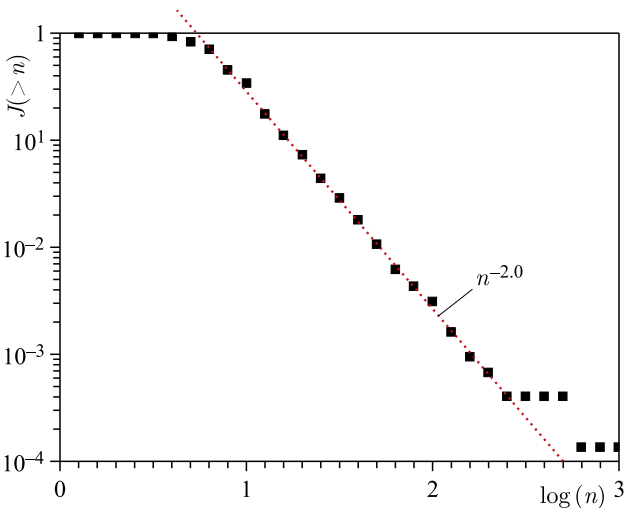


Рис. 6. Интегральный спектр ШАЛ по числу зарегистрированных нейтронов

относительно оси ливня. Вторым параметр (r_2) представляет собой среднее расстояние вторичных нейтронов относительно родительского адрона.

На рис. 6 приведен полученный интегральный спектр ШАЛ по числу зарегистрированных нейтронов, при этом «излом» в спектре космических лучей лежит в районе 10 нейтронов. Как можно видеть, измеренный спектр подчиняется степенному закону с показателем наклона $\beta = -2,0$. В работе [4] проведены расчеты, которые показывают, что число нейтронов в ШАЛ должно быть пропорционально числу адронов. Полученный результат может быть сопоставлен с данными адронного калориметра KASCADE, в котором показатель наклона спектра по числу адронов варьируется от 1,9 до 2,0 в зависимости от пороговой энергии [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ данных по нейтронной компоненте ШАЛ за более чем пять лет работы установки PRISMA-32. Временное распределение и функция пространственного распределения нейтронов в ШАЛ описываются двойными экспоненциальными функциями, параметры которых связаны с конструкцией здания, в котором располагаются детекторы установки PRISMA-32. Интегральный спектр ШАЛ по числу нейтронов в ПэВ-ной области энергии имеет степенной вид с интегральным показателем $-2,0$, что согласуется с экспериментальными данными по исследованию адронов ШАЛ, полученными на калориметре KASCADE.

Благодарности. Работа выполнена на уникальной экспериментальной установке НЕВОД в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-7597.2016.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stenkin Yu. V., Valdes-Galicia J. F.* // Proc. of the 27th ICRC. Hamburg, 2001. V. 4. P. 1453.
2. *Gromushkin D. M. et al.* // J. Instr. 2014. V. 9, No. 8. P. C08028.
3. *Петрухин А. А.* // УФН. 2015. Т. 185, № 5. С. 521.
4. *Stenkin Yu. V. et al.* // Chin. Phys. C. 2013. V. 37, No. 1. P. 015001.
5. *Hörandel J. R. et al.* // Proc. of the 27th ICRC. Hamburg, 2001. V. 1. P. 137.