

УДК 524.1

ФУНКЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЯХ НА УРОВНЕ МОРЯ

О. Б. Щеголев¹, Ю. В. Стенькин^{1,2}

Рассматриваются пространственные распределения электронов и адронов в широких атмосферных ливнях, полученные в ходе моделирования эксперимента PRISMA-32. Моделирование эксперимента проводилось для первичных протонов и ядер железа с использованием пакетов программ CORSIKA6.9 и GEANT4.10. Проведено сравнение функций пространственного распределения электронов и нейтронов в ШАЛ на высоте Москвы, полученных в моделировании, с опубликованными экспериментальными данными установки PRISMA-32.

Ключевые слова: ШАЛ, нейтроны, ФПР, PRISMA.

Описание эн-детектора. Для исследования адронной компоненты ШАЛ через вторичные тепловые нейтроны совместно с электронной компонентой в ИЯИ РАН были разработаны электронно-нейтронные детекторы (эн-детекторы) [1]. В их основе лежит светосостав, представляющий собой сплав сцинтиллятора ZnS(Ag) и LiF, обогащенного ⁶Li до 90%. При взаимодействии теплового нейтрона с ⁶Li происходит развал составного ядра на тритон и альфа-частицу с выделением энергии 4.8 МэВ: ${}^6\text{Li} + n = {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4.8 \text{ МэВ}$. Эта энергия преобразуется сцинтиллятором в свет и регистрируется фотоэлектронным умножителем ФЭУ-200. Средняя толщина сцинтиллятора составляет около 30 мг/см². Эффективность захвата тепловых нейтронов сцинтиллятором $\approx 20\%$, а с учетом условий отбора нейтронных импульсов эффективность регистрации тепловых нейтронов детектором $\approx 8\text{--}10\%$. Корпус детектора сделан из стандартной бочки, изготовленной из черного 8-ми мм полиэтилена. Внутри корпуса размещен конус из светоотражающего материала. В основании конуса расположен заламинированный с белой

¹ Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), 117312 Россия, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а; e-mail: shchegolev_oleg@mail.ru.

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

подложкой порошок сцинтиллятора. В вершине конуса под крышкой расположен фотумножитель ФЭУ-200 с делителем, а на крышку выведены разъемы для питания ФЭУ и съема сигналов с 7-го и 12-го динодов и анода. Подробнее об устройстве эн-детектора можно прочитать в [2].

Описание установки. Установка нового типа PRISMA-32 [3, 4] расположена в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ в Москве на 4-м этаже экспериментального комплекса НЕВОД. Её высота над уровнем моря составляет около 160 метров. Установка состоит из 32-х эн-детекторов, расположенных вокруг бассейна водного детектора НЕВОД. Площадь, занимаемая установкой, составляет примерно $450 (15 \times 30)$ м². PRISMA-32 разделена на два независимых кластера по 16 детекторов. Каждый кластер вырабатывает собственные триггерные сигналы при одновременном срабатывании двух и более детекторов. Кластеры синхронизированы по времени и их данные объединяются “офф-лайн” в процессе обработки. Установка работает в непрерывном режиме с начала 2012 года.

Сигналы детекторов снимаются с 12-го и 7-го динодов ФЭУ. Сигнал с 12-го динода поступает на дискриминатор, который при превышении порога выдает NIM сигнал на триггерный блок. Далее сигнал с 12-го динода усиливается и интегрируется с $\tau = 1$ мкс и поступает на АЦП для оцифровки. Сигнал с 7-го динода, используемый для расширения динамического диапазона измерений, также усиливается и интегрируется с $\tau = 1$ мкс и поступает на другой АЦП.

При поступлении NIM сигналов с дискриминаторов как минимум двух любых детекторов триггерный блок выдает управляющие TTL сигналы на все АЦП. Сигналы с 12-х динодов оцифровываются с шагом 1 мкс в течение 20 мс, а с 7-х динодов оцифровываются только первые 5 мкс сигнала с шагом 50 нс. В каждом из двух кластеров установки работают 2 компьютера, в каждом из которых установлены по четыре 4-канальных 10-разрядных АЦП, то есть по 16 каналов. Первый компьютер записывает показания 12-х динодов, а второй – 7-х.

В ходе разработки проекта PRISMA-32 проводилась калибровка эн-детекторов по электромагнитной компоненте с помощью небольших сцинтилляционных счетчиков установки СКТ [5]. По результатам калибровки была установлена цена канала АЦП в единицах энерговыделения от минимально ионизирующей частицы (minimum ionizing particle, MIP), она составила ≈ 5 MIP. Под минимально ионизирующей частицей понимается энерговыделение мюона с энергией в районе 10 ГэВ. Кроме того, была проведена абсолютная калибровка эн-детекторов с помощью итальянско-китайской установки

ARGO-YBJ в Тибете [6], которая подтвердила правильность полученной ранее чувствительности канала АЦП по электромагнитной компоненте ШАЛ [7].

Моделирование в CORSIKA и GEANT. Для моделирования данного эксперимента использовались пакеты программ CORSIKA 6.9 и GEANT4.10. При помощи CORSIKA рассчитывались искусственные ливни для высоты 160 м над уровнем моря, со стандартной моделью атмосферы (атмосфера Карлсруэ), брошенные под углами от 0 до 45 градусов к вертикали и энергиями от 10^{14} до 10^{18} эВ с показателем дифференциального спектра -2.7 на всем указанном интервале. Моделирование проводилось для протонов и железа с использованием моделей QGSJET-II (для энергий выше 80 ГэВ/нуклон) и GHEISHA-2002 (для энергий ниже 80 ГэВ/нуклон). На выходе CORSIKA выдает полное количество частиц на данной высоте с указанием типа, энергии и положения относительно оси каждой частицы. В данной работе при моделировании использовались минимальные пороги CORSIKA по энергиям частиц: 60 КэВ для гамма-квантов, электронов, позитронов, 50 МэВ для адронов и 0.5 ГэВ для мюонов.

Для расчетов с тепловыми нейтронами очень важен химический состав поглотителей, находящихся вблизи установки. В среде GEANT4 была создана программа, содержащая достаточно детальное описание установки и окружающего пространства. В программе были описаны (геометрия и примерный химсостав): здание экспериментального комплекса НЕВОД (стены, крыша, перекрытия, шахты), бассейн водного детектора, стальная крышка бассейна, фальшпол, воздух внутри и снаружи здания, слой грунта толщиной 6 м под зданием, а также подробно были описаны детекторы установки в соответствии с их устройством и схемой расположения. Полные размеры области моделирования $100 \times 100 \times 50$ м³. Использовался набор стандартных моделей взаимодействий: QGSP (адроны с энергиями в диапазоне от 10 ГэВ до 100 ТэВ), VIS (адроны с энергиями ниже 10 ГэВ) и NP (нейтроны с энергиями ниже 20 МэВ, включая тепловые). В процессе моделирования частицы (адроны, электроны, мюоны и гамма-кванты) бросались непосредственно на крышу здания.

Таким образом, с помощью данной программы были получены зависимости энерговыделения в детекторе для заряженных частиц, гамма-квантов и адронов в зависимости от их энергии. Результаты показаны на рис. 1((а), (б)). Энерговыделение выражено в числе МIP. Из графиков видно, что на энергиях < 100 МэВ энерговыделение в детекторе резко обрывается для всех частиц кроме гамма-квантов. Причиной этого является поглощение в относительно толстой крыше (~ 10 см бетона +25 см керамзита).

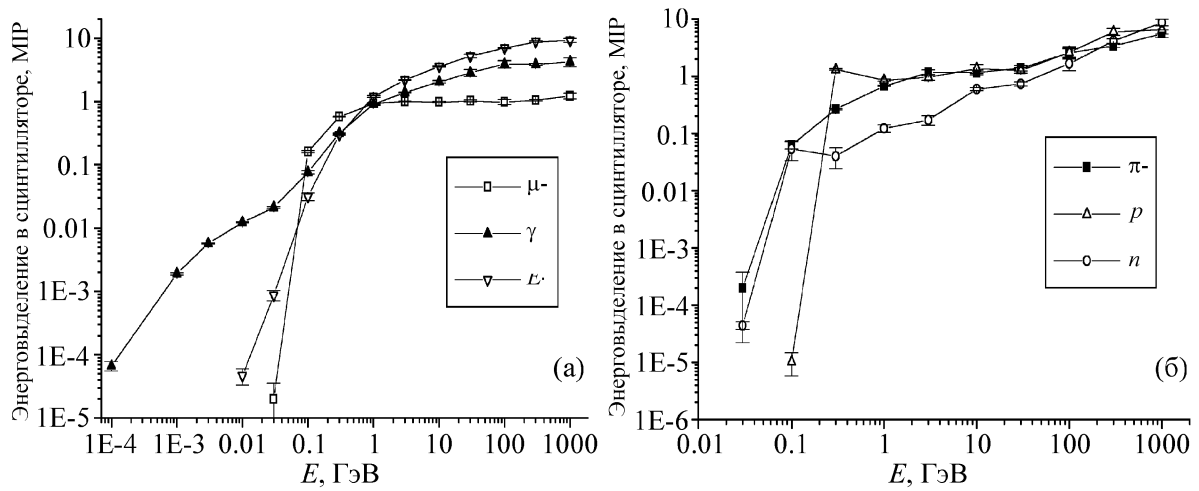


Рис. 1: Зависимость энергосодержания в эн-детекторе от энергии падающей частицы (а) для электромагнитной и мюонной компонент ШАЛ; (б) для адронов.

При помощи GEANT была получена зависимость числа нейтронов, вышедших в экспериментальный зал после прохождения одного адрона через площадь установки (график для протона), от энергии этого адрона. Эта зависимость представлена на рис. 2. Расчетные точки хорошо аппроксимируются степенной функцией с показателем 0.36, что согласуется с зависимостью роста множественности вторичных частиц в адронных взаимодействиях. Также на рисунке показаны нормированные экспериментальные данные рождения нейтронов в свинце протонами космических лучей, полученные на нейтронном мониторе в работе [8].

Основная часть нейтронов рождается при взаимодействии адронов с плотными веществами, в данном случае с бетоном в полу, крыше и стенах. Термализация нейтронов также происходит в бетоне и, кроме того, в пластике корпуса детектора. Таким образом, нейтрон проходит какое-то расстояние и детектируется на некотором удалении от траектории родительского адрона. Чтобы при моделировании работы установки учесть этот аспект, в GEANT было проведено моделирование функции пространственного распределения (ФПР) нейтронов относительно траектории родительских адронов. Результаты показаны на рис. 3. Расчетные точки фитированы двойной экспоненциальной функцией с параметрами 0.48 м и 6 м (1):

$$F(R) = 0.015 \cdot (e^{-R/0.48} + 0.05 \cdot e^{-R/6}). \tag{1}$$

Две экспоненты связаны соответственно с выходом нейтронов из пола и из крыши (стен). Таким образом, наличие крыши увеличивает среднее расстояние, на которое

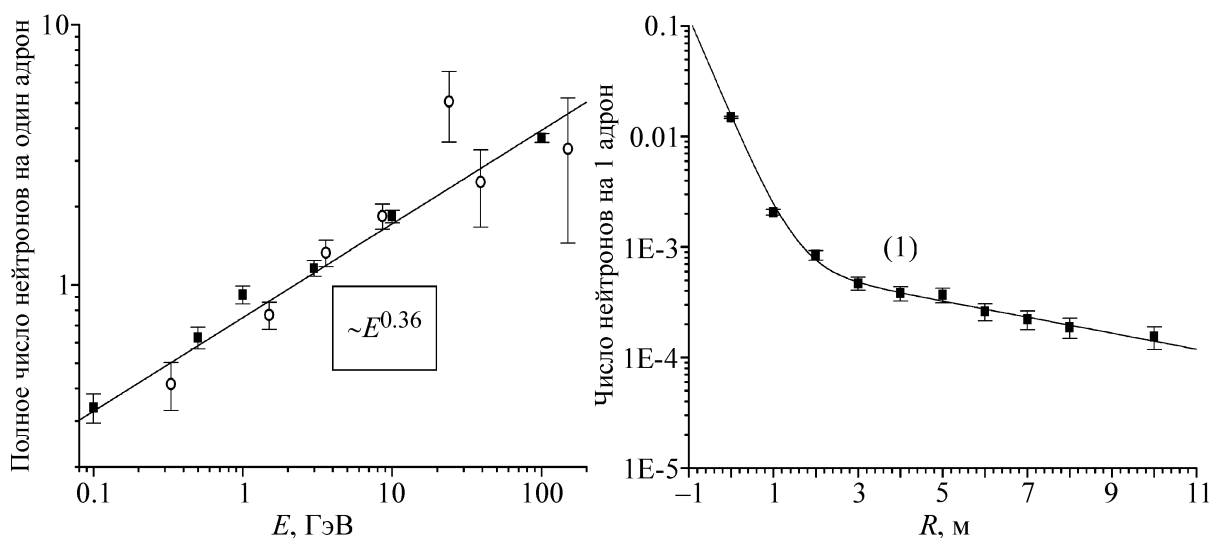


Рис. 2: Зависимость выхода нейтронов из грунта на один падающий адрон (протон) от его энергии. Закрашенные точки – моделирование в *GEANT4* в условиях эксперимента *PRISMA-32*, открытые точки – нормированные данные множественности нейтронов при взаимодействии протонов со свинцом, полученные на нейтронном мониторе [8].

Рис. 3: Зависимость числа зарегистрированных нейтронов от расстояния от центра π -детектора до траектории падающего адрона. Точки – зависимость для протонов с энергией 10 ГэВ, кривая – фитирование точек функцией (1).

регистрируемые нейтроны уходят от родительского адрона. Это означает, что если расположить детекторы на открытом грунте или на крыше, то ФПР нейтронов относительно траектории родительских адронов будет описываться преимущественно одной экспонентой с параметром ~ 0.5 метра (пренебрегая небольшой примесью нейтронов, рожденных в воздухе – атмосферных нейтронов, имеющих очень широкое распределение). То есть в основном будут регистрироваться нейтроны, рожденные в непосредственной близости от детектора, а их ФПР будет очень близка к ФПР родительских адронов.

Далее отдельная программа, написанная на языке Fortran, случайным образом “бросает” полученные в *CORSIKA* ливни равномерно по кругу радиусом 30 м, в центре которого находится центр установки. Отклики детекторов на каждую прошедшую через них частицу (энерговыведение) и число “зарегистрированных” вторичных нейтронов от адронов рассчитываются исходя из полученных в *GEANT* зависимостей. Далее прове-

руется выполнение триггерных условий, точно так же, как и в эксперименте. Запись событий в файл производится в таком же формате, как и в эксперименте.

Дальнейшая обработка файлов, полученных в моделировании и в эксперименте, полностью идентична и осуществляется одной и той же программой обработки.

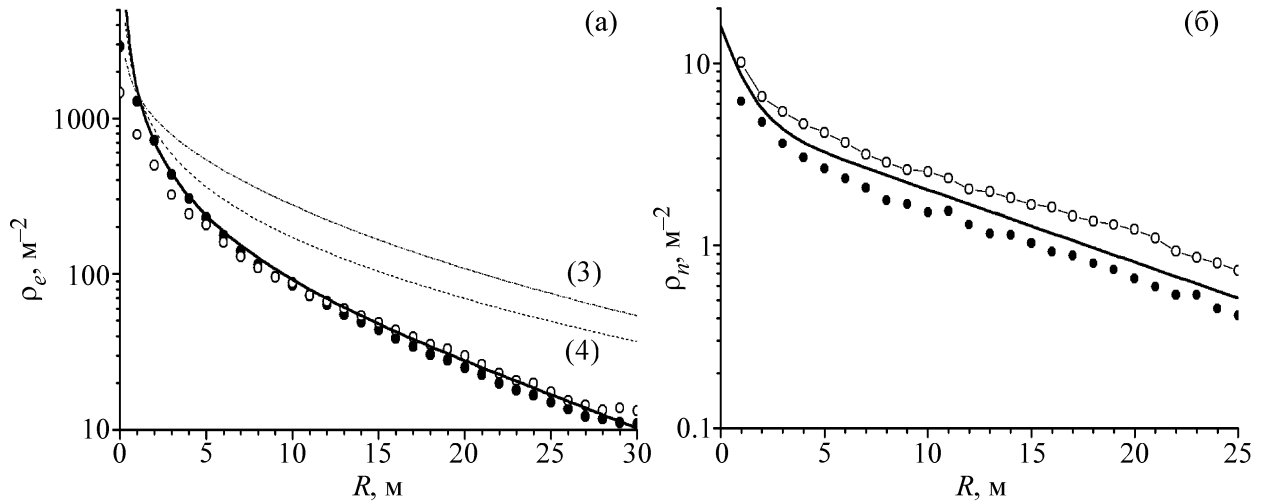


Рис. 4: Функции пространственного распределения электронов (а) и тепловых нейтронов (б) в ШАЛ. (а) Сплошная кривая – результат эксперимента PRISMA-32 из работы [9], темные точки – результат моделирования для протонов, светлые точки – результат моделирования для железа. Кривые (3) и (4) соответствуют фитирующим функциям из работы [10] (по формулам (3), (4)). (б) Кривая – результат эксперимента PRISMA-32 из работы [9], темные точки – моделирование для протонов, светлые точки – моделирование для железа.

На рис. 4(а) показаны функции пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ, полученные в моделировании эксперимента PRISMA-32 для ШАЛ от первичных протонов и ядер железа с отбором событий, в которых сработали не менее 8 детекторов с энерговыделением не меньше 3 каналов АЦП (~ 15 частиц). Совпадение по абсолютной величине кривой для протонов и железа объясняется выполнением условий отбора событий и, вообще говоря, соответствует различным первичным энергиям этих частиц. Данные были фитированы НКГ-функцией (2) с радиусом Мольера $R_M = 90$ м (для уровня моря) и возрастом $s = 0.95$, что соответствует экспериментальным данным с установки PRISMA-32, опубликованным в работе [9], с учетом

вычитания фона ≈ 0.5 канала АЦП (6 частиц на m^2):

$$f_1(r) = 1600 \cdot r^{(0.95-2)} \cdot \left(1 + \frac{r}{90}\right)^{(0.95-4.5)} - 6. \quad (2)$$

Данный фон, предположительно, связан с шумами ФЭУ, а также с флуктуациями отсчетов АЦП. Видно, что обе функции хорошо согласуются с экспериментальной кривой, причем все они приведены без нормировки. Для сравнения приведена функция пространственного распределения (3), полученная на установке KASCADE [10] и близкая к НКГ-функции для уровня моря (4) с параметрами $R_M = 80$ м и $s = 1.2$ [10]:

$$f_2(r) = 1600 \cdot r^{(1.62-2)} \cdot \left(1 + \frac{r}{28}\right)^{(1.62-4.5)}, \quad (3)$$

$$f_3(r) = 1600 \cdot r^{(1.2-2)} \cdot \left(1 + \frac{r}{80}\right)^{(1.2-4.5)}. \quad (4)$$

Значительное различие между результатами, полученными в данной работе и в работе [10], объясняется наличием бетонной крыши в нашем эксперименте и её влиянием на регистрацию электромагнитной компоненты (“омоложение” ливней) (см. рис. 1).

На рис. 4(б) показаны функции пространственного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ, полученные в моделировании для протонов и ядер железа, в сравнении с опубликованной в работе [9] экспериментальной ФПП (5):

$$f_n(r) = 11 \cdot e^{-r/1m} + 5 \cdot e^{-r/11m}. \quad (5)$$

Из рисунка видно, что расчетные данные и результаты эксперимента хорошо согласуются друг с другом как по форме, так и по абсолютной величине.

Заключение. К настоящему моменту можно с уверенностью заявить, что электронно-нейтронные детекторы показали свою эффективность и стабильность при использовании в установках по регистрации ШАЛ. Их неоспоримым преимуществом является возможность регистрации одновременно электронной и адронной компонент атмосферного ливня по всей большой площади установки. В ходе моделирования в среде GEANT4 установки PRISMA-32 были получены: зависимость числа тепловых нейтронов, регистрируемых установкой, от энергии “родительского” адрона, функция пространственного распределения вторичных тепловых нейтронов относительно траектории “родительского” адрона. Показано влияние бетонной крыши на регистрацию электромагнитной компоненты ШАЛ и вторичных тепловых нейтронов. С использованием этих зависимостей и пакета CORSIKA6.9 было проведено моделирование ШАЛ для первичных протонов и ядер железа и получены ФПП электромагнитной компоненты и вторичных

тепловых нейтронов. Результаты моделирования прекрасно согласуются с опубликованными ранее результатами эксперимента. Это означает, что созданные программы моделирования адекватно описывают эксперимент и могут применяться в дальнейшем для сравнения с экспериментом по многим другим параметрам и, что очень важно, для пересчета от измеренных параметров к первичному спектру космических лучей и их химическому составу.

Работа проводилась при поддержке РФФИ, гранты № 14-02-00996 и № 16-32-00054, а также Программы Президиума РАН “Физика высоких энергий и астрофизика”. Для проведенных в работе расчетов использовался вычислительный кластер Отдела теоретической физики ИЯИ РАН. Авторы благодарны коллективу НОЦ НЕВОД (МИФИ) за сотрудничество.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Yu. V. Stenkin, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl) **175-176**, 326 (2008).
- [2] Yu. V. Stenkin, “Large scintillator detector for thermal neutron recording”. Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications, Chapter 10, Edited by Maksim Sidorov and Oleg Ivanov (Nova Science Publishers, New York, 2010), p. 253.
- [3] Д. М. Громушкин, В. И. Волченко, А. А. Петрухин и др., ЯФ **78**, 379 (2015).
- [4] D. Gromushkin, V. Alekseenko, A. Petrukhin, et al., JINST **9**, C08028 (2014).
- [5] М. Б. Амельчаков и др., Известия РАН. Серия физическая **79**, № 3, 401 (2015).
- [6] G Marsella on behalf of the ARGO-YBJ coll. Journal of Physics: Conference Series **39**, 475 (2006).
- [7] B. Bartoli et al., Astropart. Phys. **81**, 49 (2016).
- [8] E. B. Hughes, P. L. Marsden, G. Brooke, et al., Proceedings of the Physical Society, **83**(2), 239 (1964).
- [9] Y. V. Stenkin et al., EAS thermal neutron lateral and temporal distributions //arXiv preprint arXiv:1512.02042. – 2015.
- [10] T. Antoni et al., (KASCADE collaboration). Astroparticle Physics **14**(4), 245 (2001).

Поступила в редакцию 2 марта 2016 г.