УДК 524.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ УРАН

© 2021 г. Ф. А. Богданов^{1,} *, Д. М. Громушкин¹, З. Т. Ижбулякова¹, А. Д. Почестнев¹, И. А. Шульженко¹, К. О. Юрин¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия *E-mail: acoustic925@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2020 г. После доработки 19.11.2020 г. Принята к публикации 28.12.2020 г.

В составе экспериментального комплекса НЕВОД функционирует установка УРАН, предназначенная для исследования адронной компоненты широких атмосферных ливней, путем регистрации нейтронов, сопровождающих ливень. В статье приводятся первые результаты исследования характеристик нейтронной компоненты широкого атмосферного ливня, зарегистрированных установкой УРАН в 2019 г.: пространственное распределение и зависимость числа нейтронов от мощности ливня.

DOI: 10.31857/S0367676521040074

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов изучения адронной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ) является регистрация нейтронов, которые рождаются в результате расщепления ядер среды при прохождении адронов через атмосферу и другие вещества вблизи детектора [1]. Большая часть нейтронов замедляется в результате последовательных соударений с веществом вокруг детектора. Это обстоятельство позволяет использовать данные о тепловых нейтронах для изучения параметров ШАЛ, энергии и типа первичной частицы космических лучей. В составе Экспериментального комплекса (ЭК) НЕВОД в НИЯУ МИФИ функционирует установка, предназначенная для изучения адронной компоненты ШАЛ на поверхности Земли в области ПэВ-ных энергий КЛ посредством регистрации тепловых нейтронов — УРАН [2]. Целью работы является получение характеристик нейтронной компоненты ШАЛ в зависимости от параметров зарегистрированных ливней на установке УРАН за 2019 г.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ "УРАН"

Установка УРАН включает в себя 72 электронно-нейтронных детектора (эн-детекторы) [3], которые позволяют регистрировать две основные компоненты ШАЛ (заряженную и нейтронную). Детекторы размещены на крышах двух лабораторных корпусов по 36 детекторов на каждой, расстояние между детекторами ~5 м, общая площадь установки ~ 10^3 м². Детекторы объединены в независимо работающие кластеры, по 12 детекторов в каждом. Синхронизация кластеров осуществляется с использованием временной привязки с точностью 10 нс.

Корпус нейтронного детектора установки УРАН представляет собой светоизолированный цилиндрический полиэтиленовый бак черного цвета, на дно бака укладывается сцинтиллятор $ZnS(Ag) + B_2O_3$. Сверху сцинтиллятор накрывается светособирающим конусом (диффузное отражение 97% для видимого света), который вплотную прилегает к ФЭУ-200, закрепленному в верхней части детектора. Эффективная площадь сцинтиллятора составляет ~0.36 м². Регистрация тепловых нейтронов сцинтиллятором ZnS(Ag) + + В₂О₃ происходит за счет захвата тепловых нейтронов изотопом ¹⁰В. Для защиты детекторов от воздействия окружающей среды используется внешний корпус цилиндрический формы с конической крышкой (оцинкованная сталь толщиной 0.9 мм).

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Зарегистрированные детекторами события представляют собой две осциллограммы: первая осциллограмма содержит информацию о энер-



Рис. 1. Функции пространственного распределения нейтронов ШАЛ для трех интервалов мощностей ливней (круги – $N_e = 3 \cdot 10^{15} - 10^{16}$; квадраты – $N_e = 10^{16} - 3 \cdot 10^{16}$; треугольники – $N_e = 3 \cdot 10^{16} - 10^{17}$).

говыделении заряженной компоненты ШАЛ (5120 нс с шагом 5 нс), вторая осциллограмма содержит информацию о нейтронах ШАЛ (20000 мкс с шагом 1 мкс). В первой части осциллограммы в диапазоне от 250 до 1000 нс определяется значение пьедестала, а от 1250 до 3500 нс энерговыделение от прохождения фронта ШАЛ. Во второй части осциллограммы определяется число тепловых нейтронов, зарегистрированных детектором; нейтроном считается сигнал с амплитудой более 10 мВ.

Триггером в кластере является срабатывание как минимум двух детекторов с энерговыделением по заряженной компоненте ШАЛ не менее 17 заряженных частиц. Проведена сшивка данных независимо работающих кластеров с января по декабрь 2019 г. во временных воротах 1 мкс. В результате проведенной сшивки выделено 2948 событий с максимальной кратностью срабатывания кластеров (шесть).

Для обработки экспериментальных данных, полученных на установке УРАН, был разработан алгоритм определения параметров зарегистрированных ливней по измеренному энерговыделению от заряженной компоненты ШАЛ. Предполагая, что пространственное распределение электроннофотонной компоненты описывается функцией Нишимуры—Каматы в аппроксимации Грейзена, можно оценить основные параметры ливней: возраст (*s*), мощность (N_e) и положение оси. Направление прихода зарегистрированных ливней определялось с помощью установки НЕВОД-ШАЛ [4, 5], которая работает с установкой УРАН от единой системы синхронизации.



Рис. 2. Зависимость числа зарегистрированных нейтронов ($\sum n$) от мощности зарегистрированного ливня (N_e).

НЕЙТРОННАЯ КОМПОНЕНТА ШАЛ

Определение положения оси и мощности ШАЛ позволяет изучить зависимость характеристик нейтронной компоненты от параметров ШАЛ. На рис. 1 представлены зависимости плотности нейтронов (ρ_n) от расстояния до оси ливня (r), для различных интервалов по N_e : $3 \cdot 10^{15} - 10^{16}$, $10^{16} - 3 \cdot 10^{16} - 10^{16}$. Полученные распределения хорошо описываются экспоненциальной функцией с параметром r_0 :

$$f(r) = p_0 + p_1 \cdot e^{\frac{r}{r_0}}.$$
 (1)

Значения параметра r_0 для трех интервалов N_e представлены в табл. 1. Из полученных распределений видно, что с ростом N_e растет и плотность регистрируемых нейтронов, в то же время среднее расстояние (r_0), которое проходит нейтрон, прежде чем будет зарегистрирован, слабо изменяется. Важно отметить, что полученное пространственное распределение нейтронов является подобным распределению, полученному ранее на установке ПРИЗМА-32 [6–8].

На рис. 2 представлена зависимость числа зарегистрированных нейтронов от мощности ливня, которая в дважды логарифмическом масштабе

Таблица 1. Значения параметра *r*₀

| $N_{ m e}$ | <i>г</i> ₀ , м |
|-----------------------------|---------------------------|
| $3 \cdot 10^{15} - 10^{16}$ | 2.61 ± 0.86 |
| $10^{16} - 3 \cdot 10^{16}$ | 2.85 ± 0.37 |
| $3 \cdot 10^{16} - 10^{17}$ | 3.49 ± 0.42 |

имеет линейный характер, что говорит о степенном характере зависимости, с показателем $\beta = 0.84 \pm 0.13$. Данная зависимость является подобной результатам, полученным на адронном калориметре установки KASKADE [9], на которой изучалась связь числа адронов и мощности ШАЛ, где показатель, в зависимости от энергетического порога адронов изменялся в диапазоне от 0.7 до 0.8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые представлены результаты обработки данных установки УРАН за 2019 г., критериями отбора событий являлось срабатывание не менее двух эн-детекторов (\geq 17 заряженных частиц) в каждом из шести кластеров установки. По откликам детекторов на заряженную компоненту, получена оценка мощности зарегистрированных ливней и определено положение оси ливня. Представлены функции пространственного распределения нейтронов для трех интервалов мощностей ливней, которые хорошо описываются экспоненциальной функцией. Получена зависимость числа зарегистрированных нейтронов в ливне от его мощности, которая носит степенной характер, с показателем $\beta = 0.84 \pm 0.13$.

Работа выполнена на уникальной научной установке "Экспериментальный комплекс НЕВОД" при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект "Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя" № 0723-2020-0040.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Stenkin Y.V., Valdes-Galicia J.F. // Proc. 27th ICRC (Hamburg, 2001). V. 4. P. 1453.
- Gromushkin D.M., Bogdanov F.A., Khokhlov S.S. et al. // J. Instrum. 2017. V. 12. Art. No. 07029.
- 3. Громушкин Д.М., Богданов Ф.А., Лахонин А.А. и др. // физ. элем. частиц и атом. ядра. 2018. Т. 49. № 1. С. 78; Gromushkin D.M., Bogdanov F.A., Lakhonin A.A. et al. // Phys. Part. Nucl. 2018. V. 49. No. 1. P. 47.
- 4. Shulzhenko I.A., Amelchakov M.B., Barbashina N.S. et al. // EPJ Web Conf. 2017. V. 145. Art. No. 07003.
- Chiavassa A., Shulzhenko I.A. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1390. Art. No. 012137.
- 6. Gromushkin D.M., Bogdanov F.A., Stenkin Y.V. et al. // Phys. Part. Nucl. 2018. V. 49. No. 4. P. 602.
- 7. Gromushkin D.M., Bogdanov F.A., Bouchama L. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. No. 6. P. 822.
- Shchegolev O.B., Bogdanov F.A., Izhbulyakova Z.T. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 83. No. 2. P. 290.
- Antoni T., Apel W.D., Bekk K. et al. // J. Phys. G. 1999.
 V. 25. No. 10. P. 2161.

The investigation of characteristics of neutron component of extensive air shower by the URAN array data

F. A. Bogdanov^{*a*, *}, D. M. Gromushkin^{*a*}, Z. T. Izhbulyakova^{*a*}, A. D. Pochestnev^{*a*}, I. A. Shulzhenko^{*a*}, K. O. Yurin^{*a*}

^aNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia *e-mail: acoustic925@gmail.com

The URAN array was created in the Experimental Complex NEVOD (MEPhI) for the study of the hadron component of extensive air showers by recording the neutron component of the air shower. The article contains the characteristics of the neutron component of air showers recorded by the URAN array in 2019: lateral distribution and the dependence of the neutron number on shower size.