

УДК 524.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА УСТАНОВОК ПРИЗМА-32 И УРАН НА ПРОХОЖДЕНИЕ ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ

© 2021 г. З. Т. Ижбулякова¹*, А. Г. Богданов¹, Ф. А. Богданов¹, Д. М. Громушкин¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: izhbulyakovazarina@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Для исследования нейтронной компоненты широкого атмосферного ливня (ШАЛ) в составе экспериментального комплекса НЕВОД созданы установки ПРИЗМА-32 и УРАН. Для интерпретации экспериментальных данных проведено моделирование отклика установок на прохождение ШАЛ. В результате модельных расчетов получены функции пространственного распределения заряженной компоненты ШАЛ, а также зависимости среднего числа регистрируемых нейтронов от мощности ливня.

DOI: 10.31857/S036767652104013X

ВВЕДЕНИЕ

Исследования энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей (ПКЛ) позволяют получать важную информацию о процессах, происходящих в нашей Галактике и во Вселенной. В настоящее время для изучения ПКЛ в области энергий выше 10^{15} эВ используется метод широких атмосферных ливней (ШАЛ), которые представляют собой ядерно-электромагнитные каскады, образующиеся при взаимодействии ПКЛ с атмосферой. Несмотря на то, что адронная компонента является основой ШАЛ, она изучена недостаточно, поскольку ее регистрация представляет собой сложную и дорогостоящую задачу. Недавно был предложен новый метод изучения адронной компоненты с помощью установок из электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторов) [1]. Метод основан на регистрации тепловых нейтронов, которые рождаются в результате расщепления ядер при прохождении адронов через атмосферу и вещество, окружающее эн-детектор.

В составе Экспериментального комплекса НЕВОД НИЯУ МИФИ совместно с ИЯИ РАН были созданы установки, предназначенные для изучения адронной компоненты ШАЛ на поверхности Земли в области ПэВ-ных энергий КЛ посредством регистрации тепловых нейтронов: ПРИЗМА-32 [2] и УРАН [3]. С целью корректной интерпретации данных, получаемых на этих установках, необходимо провести модельные расчеты и анализ отклика установок на электромагнит-

ную и нейтронную компоненты ШАЛ. В частности, одной из важнейших задач проводимого моделирования является получение связи между числом нейтронов ШАЛ и мощностью ливня, что дает возможность оценивать мощность ШАЛ по числу регистрируемых установками нейтронов.

УСТАНОВКИ ПРИЗМА-32 И УРАН

Уникальность установок ПРИЗМА-32 и УРАН заключается в использовании сцинтилляционных детекторов, которые способны регистрировать одновременно электронную и нейтронную компоненты ШАЛ.

ПРИЗМА-32 состоит из 32 детекторов на основе сцинтиллятора $ZnS(Ag) + LiF$, которые разбиты на два кластера по 16 детекторов. Эн-детекторы расположены на четвертом этаже экспериментального комплекса НЕВОД вокруг бассейна. Общая площадь ПРИЗМА-32 составляет порядка 500 м^2 , детекторы располагаются с шагом 2.5 и 5 м.

Детектирующая часть установки УРАН состоит из 72 эн-детекторов на основе сцинтиллятора $ZnS(Ag) + V_2O_5$, которые объединены в 6 кластеров по 12 штук. Детекторы располагаются на крышах корпусов 47 и 476 (НЕВОД) на территории НИЯУ МИФИ на расстоянии 5 м друг от друга (в пределах одного кластера), суммарная площадь установки составляет $\sim 1000 \text{ м}^2$.

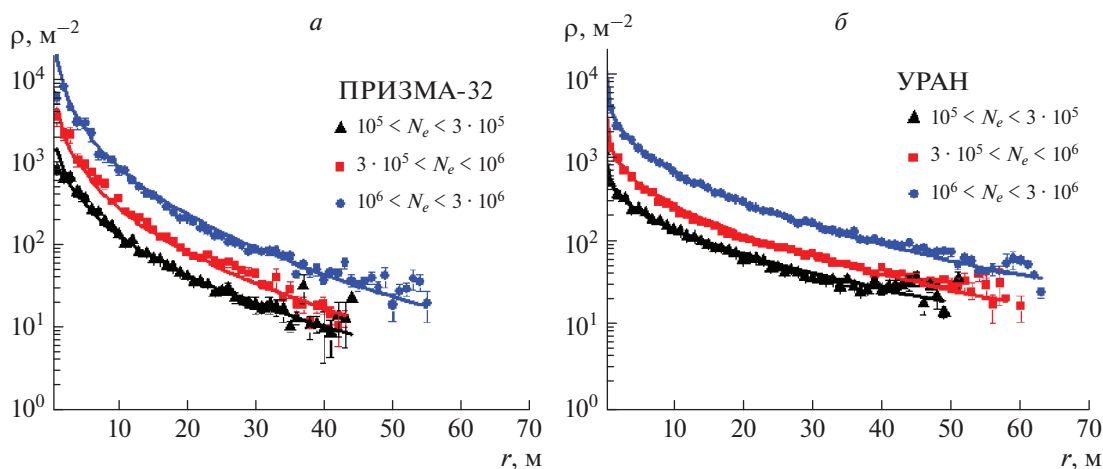


Рис. 1. ФПР электромагнитной компоненты ШАЛ для различных мощностей ливней, полученные по результатам моделирования установок ПРИЗМА-32 (а) и УРАН (б) (треугольники – диапазон мощностей ШАЛ $10^5 < N_e < 3 \cdot 10^5$, квадраты – $3 \cdot 10^5 < N_e < 10^6$, круги – $10^6 < N_e < 3 \cdot 10^6$, выбранные диапазоны мощностей соответствуют логарифмическому шагу, непрерывными линиями показана аппроксимация НКГ-функциями).

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для корректной интерпретации данных, получаемых на этих установках, необходимо провести модельные расчеты. Для моделирования геометрии установок ПРИЗМА-32 и УРАН, а также их отклика на прохождение ШАЛ, использовался программный пакет Geant4.10.5 [4], который представляет собой набор библиотек на языке C++ для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием метода Монте-Карло. Для выполнения поставленной задачи был выбран стандартный пакет библиотек, учитывающий взаимодействие тепловых нейтронов с веществом, QGSP_VIC_HP. Созданная единая модель установок ПРИЗМА-32 и УРАН описывает реальную геометрию и химический состав детекторов и окружающей среды. Моделирование ШАЛ проводилось с помощью программного пакета CORSIKA7.6900 [5]. Для достижения поставленных целей были выбраны модели QGSJET-II-04 (взаимодействие частиц высоких энергий) и FLUKA2011 (низкие энергии). Уровень наблюдения ШАЛ составлял 170 м над уровнем моря. Порог наблюдения вторичных частиц равен 50 КэВ. Координаты прихода первичной частицы ШАЛ распределены равномерно в пределах площадей каждой установки. Вторичные частицы ШАЛ генерировались непосредственно над крышей зданий. При моделировании первичными частицами ШАЛ являлись протоны с энергиями, соответствующими энергетическому спектру КЛ в диапазоне $10^{15} - 10^{17}$ эВ. Зенитные углы θ направления прихода ШАЛ также варьировались в диапазоне от 0° до 50° .

Установки ПРИЗМА-32 и УРАН способны одновременно регистрировать две основные компоненты широких атмосферных ливней адронную (нейтронную) и электромагнитную, при этом, в случае прохождения ШАЛ через установки, детекторы сначала (в пределах временных ворот ~ 1 мкс) срабатывают от электромагнитной компоненты, а затем в течение 20 мс осуществляют регистрацию запаздывающих тепловых нейтронов, сопровождающих ливень. Аналогичный подход к регистрации двух компонент ШАЛ использовался в ходе моделировании отклика установок ПРИЗМА-32 и УРАН на прохождение ШАЛ. Триггерные условия, используемые при моделировании, установлены в соответствии с экспериментом: регистрация 17 заряженных частиц в двух и более детекторах каждого из шести кластеров для установки УРАН и регистрация 32 заряженных частиц в двух и более детекторах каждого из двух кластеров для установки ПРИЗМА-32.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На сегодняшний день функция пространственного распределения (ФПР) электромагнитной компоненты ШАЛ является хорошо изученным параметром, который был получен в различных экспериментах [6]. Подобные измерения на установках ПРИЗМА-32 и УРАН проводятся с целью подтверждения корректности работы установок и правильности интерпретации получаемых данных. На рис. 1а представлена ФПР электромагнитной компоненты для различных мощностей

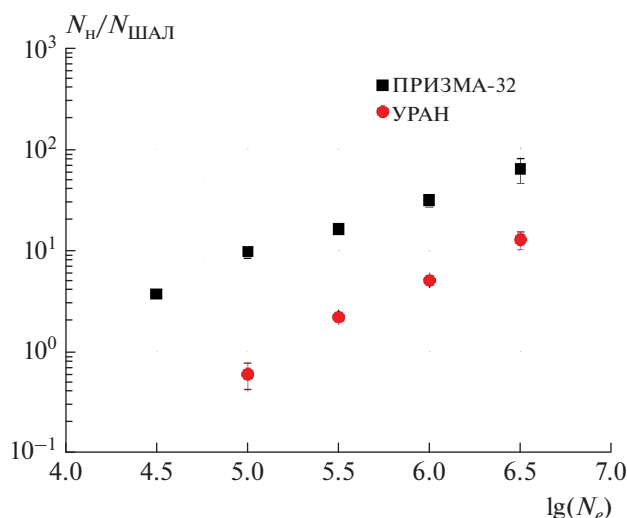


Рис. 2. Зависимость среднего числа зарегистрированных установками ПРИЗМА-32 (квадраты) и УРАН (круги) нейтронов ШАЛ от мощности ливня.

ШАЛ по данным моделирования установки ПРИЗМА-32, на рис. 1б – установки УРАН. ФПР хорошо описываются функциями Нишимуры–Каматы–Грейзена (НКГ-функциями) (1):

$$f(r) = \frac{N_e}{2\pi R_M^2} \left(\frac{r}{R_M}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{R_M}\right)^{s-4.5} \times \left(\frac{\Gamma(4.5-s)}{\Gamma(s)\Gamma(4.5-2s)}\right) \quad (1)$$

с радиусом Мольера $R_M = 80$ м и средним возрастом $s = 1.1$ для установки ПРИЗМА-32 и $s = 1.4$ для УРАН. Возраст ливня 1.4 является нормальным для высоты 170 м над уровнем моря. “Омоложение” ШАЛ, регистрируемых на ПРИЗМА-32, может объясняться наличием бетонной крыши и стен, способных поглощать низкоэнергичную электромагнитную компоненту ШАЛ. Результаты моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными установок УРАН и ПРИЗМА-32 [7, 8].

Одним из наиболее важных результатов проведенных расчетов является определение связи между числом нейтронов и мощностью ШАЛ. На рис. 2 приведены зависимости среднего числа нейтронов, которые должны регистрироваться установками ПРИЗМА-32 и УРАН, от мощности ливня (N_e). В двойном логарифмическом масштабе зависимости имеют близкий к линейному характер. Тангенсы угла наклона прямых, которыми могут быть описаны представленные зависимости, составляют $\beta = 0.65 \pm 0.04$ для установки

ПРИЗМА-32 и $\beta = 0.77 \pm 0.07$ для УРАН. Для эксперимента УРАН наблюдается разумное согласие с результатами эксперимента CASCADE [9] (обе установки находятся на уровне моря), по данным которого был получен тангенс угла наклона $\beta = 0.76 \pm 0.03$. В связи с эффектом “омоложения” ливней, наблюдаемом на установке ПРИЗМА-32, полученный в ходе моделирования тангенс угла наклона прямой не согласуется с результатами установок, расположенных на уровне моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием программных пакетов Geant4 и CORSIKA была создана единая модель установок для регистрации тепловых нейтронов ШАЛ ПРИЗМА-32 и УРАН. ФПР электромагнитной компоненты ШАЛ аппроксимируются НКГ-функциями, что подтверждает возможность регистрации заряженной компоненты детекторами подобного типа. По данным моделирования получены зависимости среднего числа нейтронов от мощности ШАЛ, которые могут быть описаны степенным законом: $\langle N_n \rangle / N_{\text{ШАЛ}} \sim N_e^\beta$ с показателем $\beta = 0.77 \pm 0.07$ для УРАН и 0.65 ± 0.04 для ПРИЗМА-32.

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., Hurtado A., Musalem O. // Proc. 26th ICRC. (Madison, 1999). V. 1. P. 252.
2. Gromushkin D.M., Alekseenko V.V., Petrukhin A.A. // J. Instrum. 2014. V. 9. Art. No. 08028.
3. Громушкин Д.М., Астапов И.И., Барбашина Н.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 544; Gromushkin D.M., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 4. P. 506.
4. <https://geant4.web.cern.ch>.
5. <https://www.iap.kit.edu/corsika>.
6. Grieder Peter K.F. Extensive air showers. V. 1. L.: Springer, 2010. 810 p.
7. Gromushkin D.M., Bogdanov F.A., Petrukhin A.A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. No. 1. Art. No. 012202.
8. Shchegolev O.B., Bogdanov F.A., Izhbulyakova Z.T. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 83. No. 2. P. 290.
9. Antoni T., Apel W.D., Bekk K. et al. // J. Phys. G. 1999. V. 25. No. 10. P. 2161.

Simulation of the response of the PRISMA-32 and URAN facilities to the passage of the extensive air showers

Z. T. Izhbulyakova^{a,*}, A. G. Bogdanov^a, F. A. Bogdanov^a, D. M. Gromushkin^a

^a*National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: izhbulyakovazarina@yandex.ru*

The PRISMA-32 and URAN arrays were created at the Unique Scientific Facility NEVOD (MPhI) to register the neutron component of the extensive air showers (EAS). To correctly interpret the experimental data of the arrays, it was necessary to carry out model calculations of the response of the facilities to the passage of the EAS. Using simulation data, the lateral distribution functions of the charged EAS components and the dependence of the average number of registered neutrons on the shower size were obtained.