

УДК 539

СТАТУС ВЫСОКОГОРНОЙ УСТАНОВКИ ENDA-LHAASO

© 2021 г. Ю. В. Стенькин^{1, *}, В. В. Алексеенко¹, Данженглуобу^{2, 3}, Л. В. Жанг⁴, Д. А. Кулешов¹, К. Р. Левочкин¹, В. В. Ли⁴, М. Ю. Лиу^{2, 3}, Й. Лиу⁵, С. Х. Ма^{6, 7}, Д. Х. Сяо^{2, 3}, О. Б. Щеголев¹, Ш. В. Цюи⁴, Т. Л. Чен^{2, 3}, Ц. Ши⁴, Ф. Янг⁴

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

²Тибетский университет, Школа науки, Лхаса, КНР

³Тибетский университет, Ключевая лаборатория космических лучей, Лхаса, КНР

⁴Хэбэйский педагогический университет, Школа физики, Шицзячжуан, КНР

⁵Хэбэйский университет экономики и бизнеса, Школа менеджмента и инженерии, Шицзячжуан, КНР

⁶Институт физики высоких энергий Китайской академии наук, Ключевая лаборатория астрофизики элементарных частиц, Пекин, КНР

⁷Центр исследования космических лучей Тяньфу, Чэнду, КНР

*E-mail: stenkinyv@lebedev.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Описана установка ENDA (electron-neutron detector array), запущенная в рамках международного проекта LHAASO в декабре 2019 г. в Тибете на высоте 4410 м над уровнем моря. Уникальной особенностью установки является одновременная регистрация по всей площади установки двух главных компонент широких атмосферных ливней: адронной и электронной, с помощью одних и тех же детекторов. Представлены основные параметры установки, полученные как в расчетах, так и в измерениях.

DOI: 10.31857/S0367676521040360

ВВЕДЕНИЕ

В рамках международного высокогорного эксперимента LHAASO [1] на тибетском плато (пров. Сычуань, КНР) на высоте 4410 м создается установка нового типа (ENDA или electron-neutron detector array) для изучения спектра космических лучей и их химического состава при энергии выше 1 ПэВ. Установка будет состоять из 400 электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторов), расположенных на поверхности земли в виде треугольной 60-градусной сетки с шагом 5 м. Разработанные в ИЯИ РАН эн-детекторы могут регистрировать две основные компоненты широкого атмосферного ливня (ШАЛ): электронную и адронную (через тепловые нейтроны) по всей площади установки, составляющей в окончательном варианте 10000 м². Такого типа установки (проект PRISMA), предложенные в 2009 г. [2], пока работают лишь в виде прототипов и только с нашим участием.

ПАРАМЕТРЫ И ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ

Установка ENDA [3] в настоящий момент состоит из одного работающего кластера, состоя-

щего из 16 нейтронных эн-детекторов (см. рис. 1). В детекторе используется сцинтилляционный композит из ZnS(Ag) и соединения необогащенного бора. Площадь сцинтиллятора 0.35 м², а толщина 50 мг/см², что обеспечивает эффективность регистрации тепловых нейтронов на уровне 20%. Порог для регистрации заряженных релятивистских частиц (mip) составляет около 6 частиц. Кластер имеет независимое питание и систему регистрации в виде 32-канального, 14-битного флэш-АЦП, оцифровывающего все импульсы с последнего и промежуточного 5-го динода ФЭУ после предварительного усиления зарядочувствительными предусилителями с интегрированием с постоянной 1 мкс. Данные разных кластеров синхронизированы с точностью 20 нс и будут “сшиваться” при обработке как между собой, так и с другими установками LHAASO [1]. Эта работа уже ведется и первые совместные с детекторами LHAASO события были продемонстрированы в докладе на конференции. Таким образом, точные параметры регистрируемых ШАЛ будут, при необходимости, определяться детекторами LHAASO, а кластерная система эн-детекторов позволит наращивать их количество, не прерывая набора данных. В ближайшее время планируется расши-

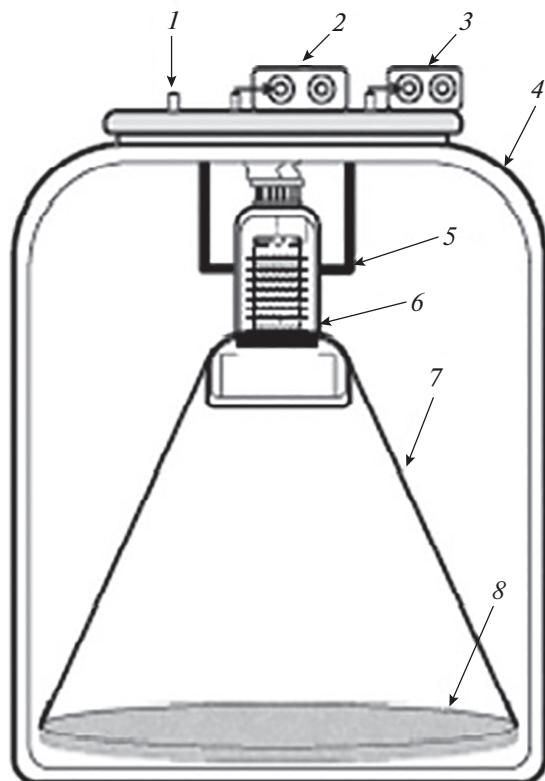


Рис. 1. Конструкция эн-детектора установки ENDA. 1 – высоковольтный разъем; 2 – предохранитель 8-го диода; 3 – предохранитель 5-го диода; 4 – полиэтиленовый корпус (бак для воды); 5 – крепеж ФЭУ; 6 – ФЭУ (CR-165); 7 – светособирающий конус; 8 – сцинтиляционный диск Ø70 см.

рение установи до 4 кластеров, детекторы для которых уже готовы. Дальнейшее расширение установки будет зависеть от объема финансирования и от готовности инфраструктуры.

Математическое моделирование будущего эксперимента проводилось в течение нескольких последних лет. При этом расчеты проводились в три этапа: программа CORSIKA использовалась для моделирования ШАЛ, GEANT – для моделирования отклика эн-детекторов на частицы ШАЛ и затем полученные фитирующие функции использовались при моделировании отклика установки ENDA-64 на ШАЛ. В качестве примера на рис. 2 приведены результаты моделирования с целью определения пороговых энергий для первичных частиц различных масс. При этом отдельно строились спектры всех ливней и ливней с числом зарегистрированных нейтронов 3 и более. Как видно из рисунка, пороговые энергии для ливней с нейтронами лежат в районе $E = 1$ ПэВ для протонов и около 2 ПэВ для кремния, тогда как для всех ливней (без отбора по нейтронам) порог расположен в районе $E = 100\text{--}200$ ТэВ, т.е. на порядок величины ниже. Это объясняется тем,

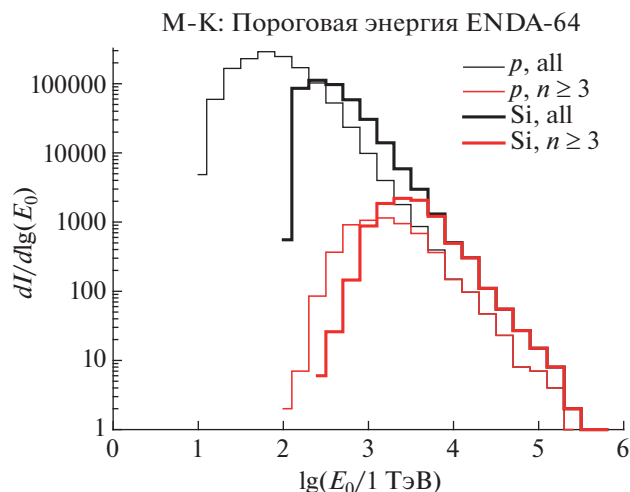


Рис. 2. Полученные при моделировании установки ENDA-64 спектры регистрируемых ливней от первичных протонов и ядер кремния.

что при энергиях 0.1–1 ПэВ даже на такой высоте адронов еще мало и массовое рождение вторичных нейтронов начинается при более высоких энергиях. Причем с ростом энергии выше 100 ТэВ на частицу сначала начинают доходить адроны в протонных ливнях, затем в ливнях от гелия и т.д. поскольку, в соответствии с принципом суперпозиции, тут важна энергия на нуклон. Таким образом, ПэВ-ная область энергий является переходной от бесствольных к нормальным ливням. Только когда ливни от ядер железа становятся нормальными, тогда достигается равновесие для всех ливней (выше 10 ПэВ) и метод ШАЛ начинает работать корректно. Это обстоятельство играет огромную роль в феноменологии ШАЛ и приводит, по нашему мнению, к систематическим ошибкам при восстановлении первичного спектра из спектра мощностей ШАЛ в ПэВ-ной области, т.к. безадронные (бесствольные ливни) имеют не стандартную форму из-за нарушенного равновесия между основной адронной и прочими компонентами ШАЛ [4]. Именно поэтому полноценное измерение адронной компоненты ШАЛ является обязательным, поскольку только каскадирующие адроны определяют свойства наблюдаемых ливней, а их отсутствие свидетельствует о том, что ливень бесствольный и его надо анализировать не так, как стандартный ливень.

Возможность регистрации двух компонент ливня одними и теми же детекторами позволила нам разработать новый метод определения химсостава космических лучей при энергиях выше 1 ПэВ, используя отношение числа нейтронов к электронам n/e [5]. Применение для этого методов машинного обучения, а также использование для анализа всех компонент ШАЛ, позволит нам по-

лучить хорошую точность в восстановлении массового состава космических лучей [6] и их энергетического спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокогорная установка ENDA начинает работу по изучению спектра и массового состава космических лучей в области энергии 1–100 ПэВ. На территории эксперимента LHAASO, на высоте 4410 м развернут первый кластер из 16 эн-детекторов. Идет отладка онлайн программы, решаются проблемы синхронизации с детекторами LHAASO, проводится детальное математическое моделирование эксперимента. В ближайшие 1–2 года ожидается расширение установки до 4 кластеров, тогда же начнется штатный набор экспериментальных данных, а при наличии достаточного финансирования, установка будет в дальнейшем расширена до 25 кластеров (400 эн-детекторов). Результаты моделирования и разработанный нами новый метод изучения химического состава космических лучей при энергиях выше 1 ПэВ позволяют надеяться на скорое решение этой важнейшей проблемы и связанной с ней проблемы наблюдаемого “излома” в спектре космических лучей в ПэВ-ной области энергий.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-02-00339) и Программы Президиума РАН “Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии”, а также при поддержке программами International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (grant no. 113111KYSB20170055) и National Natural Science Foundation (NSFC) (grant nos. U2031103, 11963004, 11873005, U1831129, 11905043).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bai X., Bi B.Y., Bi X.J. et al. // arXiv: 1905.02773v1. 2019.
2. Stenkin Yu.V. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2009. V. 196. P. 293.
3. Xinhua Ma, Jiancheng He, Yi Zhang et al. // Proc. ICRC2019 (Madison, 2019). P. 345.
4. Стенькин Ю.В. // ЯФ. 2008. Т. 71. № 1. С. 99; Stenkin Yu.V. // Phys. Atom. Nucl. 2008. V. 71. No. 1. P. 98.
5. ШегOLEV О.Б., Алексеенко В.В., Стенькин Ю.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 691; Shchegolev O.B., Alekseenko V.V., Stenkin Yu.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 632.
6. Ma X.H., Shchegolev J.B., Stenkin Yu.V. // Proc. ICRC2019. (Madison, 2019). P. 431.

Status of the high-altitude array ENDA-LHAASO

Yu. V. Stenkin^{a, *}, V. V. Alekseenko^a, Danzengluobu^{b, c}, Liang-Wei Zhang^d, D. A. Kuleshov^a, K. R. Levochkin^a, Bing-Bing Li^d, Mao-Yuan Liu^{b, c}, Ye Liu^e, Xin-Hua Ma^{f, g}, Di-Xuan Xiao^{b, c}, O. B. Shchegolev^a, Shu-Wang Cui^d, Tian-Lu Chen^{b, c}, Cong Shi^d, Fan Yang^d

^aInstitute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

^bScience School, Tibet University, Lhasa, 850000 China

^cKey Laboratory of Comic Rays, Tibet University, Lhasa, 850000 China

^dThe College of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang, 050024 China

^eSchool of Management Science and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, 050061 China

^fKey Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049 China

^gTianfu Cosmic Ray Research Centre, Chengdu, China

*e-mail: stenkinyv@lebedev.ru

The ENDA (electron-neutron detector array) setup launched as part of the international LHAASO project in December 2019 in Tibet at an altitude of 4410 m above sea level is described. The unique feature of the ENDA is following: a possibility to measure two main EAS components—electronic and hadronic ones over whole array are using only en-detectors. Performances and some parameters of the array, obtained in testing measurements and calculations are presented.