

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 524.1

КАЛИБРОВКА УСТАНОВКИ С ТОНКИМИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

© 2025 г. С. Ю. Жежера^а, *, М. Б. Амелчаков^а, А. Г. Богданов^а,
Д. М. Громушкин^а, А. Ю. Коновалова^а, К. Р. Нугаева^а, Е. П. Хомчук^а,
С. С. Хохлов^а, И. А. Шульженко^а, Е. А. Южакова^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва 115409 Россия

*E-mail: SYZhezhera@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.08.2024 г.

После доработки 15.08.2024 г.

Принята к публикации 20.08.2024 г.

Описывается метод калибровки установки УРАН, имеющей тонкие сцинтилляционные детекторы, по совместным событиям регистрации широких атмосферных ливней с установкой НЕВОД-ШАЛ. Приводятся результаты реконструкции параметров широких атмосферных ливней по данным установки УРАН, полученные с учетом калибровочных коэффициентов.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, сцинтилляционный детектор, калибровка, Экспериментальный комплекс НЕВОД, УРАН, НЕВОД-ШАЛ

DOI: 10.56304/S2079562925010282

ВВЕДЕНИЕ

Регистрация широких атмосферных ливней (ШАЛ) является единственным способом исследования частиц первичных космических лучей с энергиями выше 10^{15} эВ. В большинстве экспериментов по исследованию широких атмосферных ливней восстановление параметров первичной частицы проводится на основе анализа энергосодержания частицы ливня в массиве расположенных в горизонтальной плоскости детекторов. При этом предполагается, что основная часть энергосодержания обусловлена взаимодействием электромагнитной компоненты ливня с веществом детектора. Параметры ливня оцениваются путем аппроксимации наблюдаемых в детекторах установки энергосодержаний функцией пространственного распределения электронов ШАЛ. В этой связи важным аспектом эксперимента является энергетическая калибровка детекторов ливневой установки, то есть определение связи между откликами детекторов и энергией, выделенной в них частицами ШАЛ.

Для энергетической калибровки ливневых установок обычно используется фон атмосферных мюонов. Измеренные при регистрации мюонов амплитудные или зарядовые спектры откликов детекторов сопоставляются с ожидаемыми спектрами энергосодержаний, полученными путем расчетов или моделирования. Таким способом были откалиброваны детекторы установок EAS-TOP [1],

KASCADE [2], KASCADE-Grande [3], Pierre Auger [4], Tibet air-shower array [5], Ice-Top [6], LHAASO [7] и др.

Однако использование одиночных мюонов для калибровки возможно только в случаях, когда толщина рабочего вещества детектора достаточно велика для того, чтобы выделить отклик на мюоны на фоне откликов на электроны радиационного фона. Например, при использовании пластиковых сцинтилляторов их толщина должна составлять не менее 3 см [8]. Таким образом, калибровка тонких детекторов является достаточно сложной экспериментальной задачей. К подобным детекторам можно отнести электронно-нейтронные детекторы установки УРАН, входящей в состав Экспериментального комплекса НЕВОД [9].

УРАН (Установка для Регистрации Атмосферных Нейтронов) [10] включает в себя 72 электронно-нейтронных детектора (эн-детектора), объединенных в 6 кластеров, расположенных на двух крышах лабораторных корпусов Экспериментального комплекса НЕВОД, по 36 детекторов на каждой крыше. Детекторы располагаются в узлах квадратной сетки с шагом около 5 м. Установка предназначена для исследования ШАЛ по электронно-фотонной и адронной компоненте в диапазоне энергий от 10^{15} до 10^{17} эВ. Схема расположения установки УРАН приведена на рис. 1.

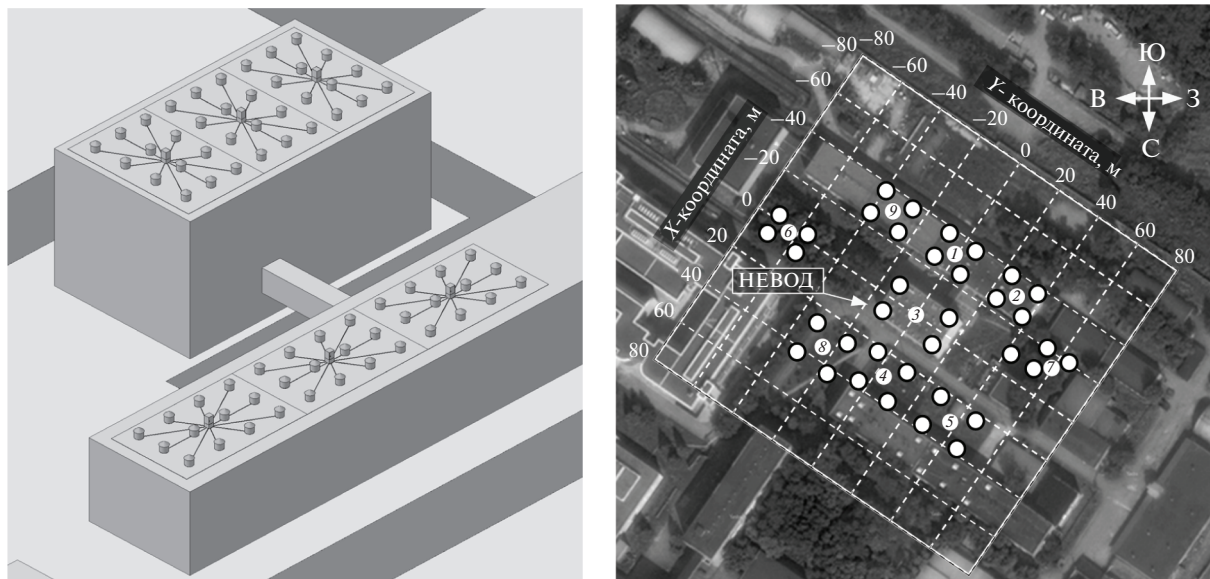


Рис. 1. Схема размещения детекторов установок УРАН (слева) и НЕВОД-ШАЛ (справа).

Внешние корпуса детекторов установки УРАН изготовлены из оцинкованной стали и имеют цилиндрическую форму с конической крышкой (рис. 2). В качестве внутреннего светозащитного корпуса эн-детектора используется 200-литровый полиэтиленовый цилиндрический бак черного цвета с высотой 570 мм и диаметром 740 мм. В нижней части детектора расположен лист тонкого сцинтиллятора площадью 0.36 м². Сцинтилляционные вспышки, обусловленные прохождением через детектор заряженных частиц и тепловых нейтронов, регистрируются фотоумножителем ФЭУ-200, подвешенным на крышке внутреннего корпуса. Для улучшения светосбора в конструкции детектора используется светособирающий конус из вспененно-

го полиэтилена, имеющего коэффициент диффузного отражения более 0.9. На дно внутреннего корпуса приклеен лист из этого же материала, который выполняет роль подложки сцинтиллятора.

Для регистрации тепловых нейтронов от ШАЛ в установке УРАН используется неорганический сцинтиллятор ZnS(Ag) с добавкой B₂O₃, изготовленный компанией ЗАО «НПФ «Люминофор». Сцинтиллятор представляет собой белый порошок с размером гранул от 300 до 800 мкм, который замешивается в силиконовый оптический компаунд для защиты от воздействия внешней среды. Готовый сцинтиллятор имеет форму диска диаметром 680 мм и толщиной 50 мг/см². Эффективность регистрации тепловых нейтронов таким сцинтиллятором составляет около 5%.

Кроме установки УРАН, для регистрации электронно-фотонной компоненты широких атмосферных ливней с энергиями в диапазоне от 10¹⁵ до 10¹⁷ эВ в Экспериментальном комплексе НЕВОД функционирует установка НЕВОД-ШАЛ [11]. Установка НЕВОД-ШАЛ включает 36 сцинтилляционных детектирующих станций, размещенных на площади около 10⁴ м² вокруг Экспериментального комплекса НЕВОД на крышах лабораторных корпусов и на поверхности грунта. Детектирующие станции НЕВОД-ШАЛ объединены в 9 кластеров. Схема расположения детектирующих станций и кластеров установки приведена на рис. 1.

Рабочим веществом детектирующих станций НЕВОД-ШАЛ является органический сцинтиллятор на основе полистирола толщиной 4 см (4.12 г/см²), поэтому детекторы установки НЕВОД-ШАЛ калибруются атмосферными мюона-

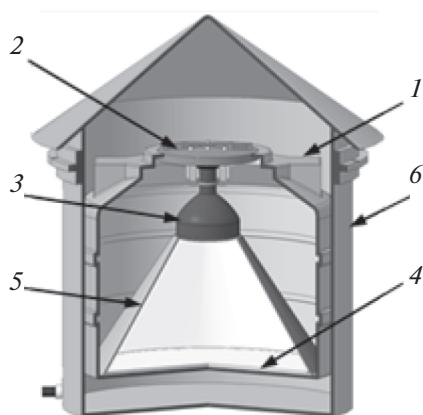


Рис. 2. Схема детектора установки УРАН: 1 – светозащитный корпус детектора; 2 – крышка с подвеской; 3 – ФЭУ-200; 4 – сцинтиллятор ZnS(Ag) + B₂O₃; 5 – светособирающий конус; 6 – внешний корпус.

ми [12]. В данной статье описывается метод калибровки установки УРАН по совместным с установкой НЕВОД-ШАЛ событиям регистрации широких атмосферных ливней.

1. КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ УСТАНОВКИ УРАН

Калибровка электронно-нейтронных детекторов УРАН проводилась по совместным событиям с установкой НЕВОД-ШАЛ, зарегистрированным в период с 01.07.2020 до 24.07.2022. При этом отбирались события, в которых в установке НЕВОД-ШАЛ сработало не менее 7 кластеров. Для обеспечения наилучшей точности восстановления параметров ШАЛ необходимо использовать события, в которых ось ливня попала в центральный кластер установки. Поэтому было применено дополнительное условие отбора, в соответствии с которым максимальное энерговыделение наблюдалось в одной из детектирующих станций центрального кластера, находящегося на крыше Экспериментального комплекса НЕВОД. В установке УРАН события записывались при выполнении триггерного условия срабатывания не менее двух детекторов в кластере, причем амплитуда сигналов в каждом из детекторов должна превышать 9 кодов АЦП.

Реконструкция основных параметров широких атмосферных ливней (положение и наклон оси, мощность и возраст ливня) проводилась по откликам детектирующих станций установки НЕВОД-ШАЛ. Отклики детекторов УРАН сопоставлялись с ожидаемым числом заряженных частиц, проходящих через каждый детектор в конкретном событии. При этом число заряженных частиц оценивалось на основе функции, аппроксимирующей пространственное распределение частиц ливня $\rho(r)$ на разных расстояниях r от его оси.

Впервые параметризованная функция пространственного распределения электронов в соответствии с электромагнитной каскадной теорией [13] была предложена Дж. Нишимурой и К. Каматой. Впоследствии она была модифицирована К. Грейзенем [14] и имеет вид:

$$\rho_e(r, S, N_e) = \left(\frac{N_e}{r_m^2} \right) \left(\frac{r}{r_m} \right)^{S-2} \left(1 + \frac{r}{r_m} \right)^{S-4.5} \times \frac{\Gamma(4.5 - S)}{2\pi\Gamma(S)\Gamma(4.5 - 2S)}, \quad (1)$$

где r — расстояние от оси ливня, S — возраст ливня (при анализе использовалось постоянное значение $S = 1.4$), N_e — общее число электронов или мощность ШАЛ, определяющая количество частиц на уровне наблюдения, r_m — радиус Мольера, характеризующий поперечные размеры ливня. Для уровня наблюдения установок УРАН и НЕВОД-ШАЛ

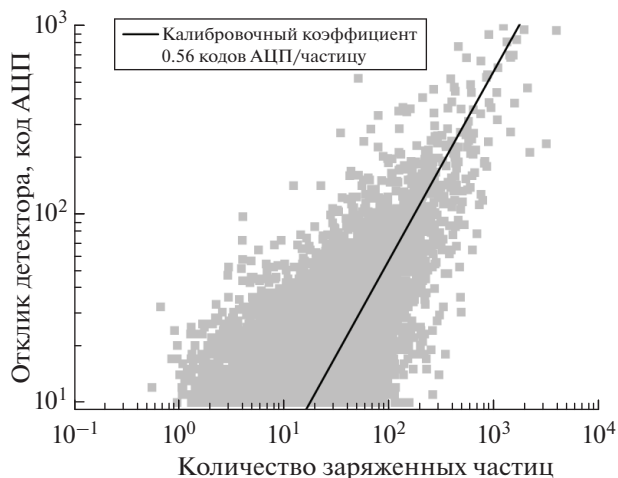


Рис. 3. Зависимость отклика детектора № 1.4 установки УРАН от количества прошедших через него заряженных частиц.

(~180 м над уровнем моря) радиус Мольера равен 78 м.

На рис. 3 представлен пример зависимости отклика детектора № 4 кластера № 1 установки УРАН от количества заряженных частиц. Коэффициент корреляции для данной зависимости равен 0.77. Полученный калибровочный коэффициент для детектора № 1.4 равен 0.56 ± 0.01 кодов АЦП/частицу.

Полученные зависимости откликов детекторов установки УРАН от числа прошедших через них заряженных частиц аппроксимировались линейными функциями, проходящими через начало координат. Коэффициенты наклона прямых принимались за калибровочные коэффициенты детекторов.

Таким образом, были получены калибровочные коэффициенты для всех 72 эн-детекторов установки УРАН. Распределение коэффициентов представлено на рис. 4. Среднее значение коэффициентов составило 0.69 ± 0.05 кодов АЦП/частицу, стандартное отклонение распределения равно 0.44 ± 0.04 кодов АЦП/частицу.

При сборке детекторов установки УРАН в процессе настройки детекторов проводилось выравнивание откликов фотоприемников на стандартный источник света. Подобный метод настройки не учитывал особенностей световых выходов отдельных сцинтилляторов, что привело к значительному разбросу калибровочных коэффициентов отдельных детекторов. Однако предложенный метод калибровки установки УРАН по совместным событиям с установкой НЕВОД-ШАЛ позволяет получить калибровочные коэффициенты непосредственно во время эксперимента и учесть их при дальнейшем анализе. Кроме того, у детекторов, калибровочные

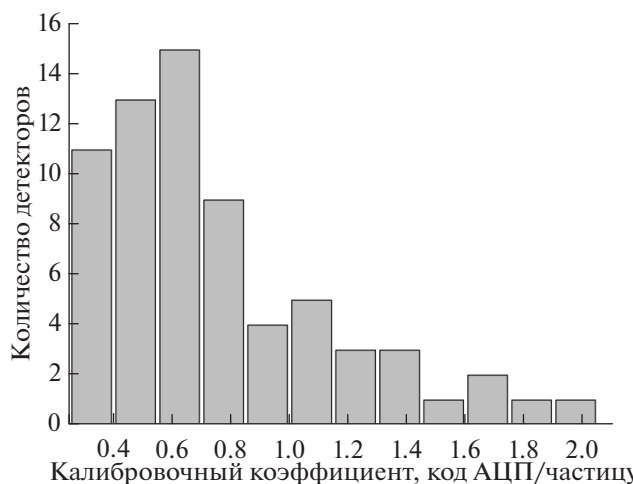


Рис. 4. Распределение калибровочных коэффициентов детекторов установки УРАН.

коэффициенты которых значительно отличаются от среднего значения, будут изменены напряжения питания фотоприемников для уменьшения величины разброса калибровочных коэффициентов детекторов в следующих измерительных сериях.

2. РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ УРАН

Как правило, при восстановлении параметров ШАЛ реконструкция наклона оси проводится на основе временных характеристик откликов детекторов, а положение оси, мощность и возраст ливня восстанавливаются по амплитудным характеристикам.

В состав спектрометрических трактов детекторов установки УРАН входят интегрирующие усилители ($RC = 1$ мкс), которые позволяют отбирать сигналы от тепловых нейтронов, но при этом ухудшают точность измерения времен прихода сигналов. Поэтому восстановление наклона оси ливня в совместных событиях проводилось по откликам детектирующих станций установки НЕВОД-ШАЛ, а положение оси и мощность ливня реконструировались на основе амплитудного анализа откликов детекторов установки УРАН. Индивидуальные калибровочные коэффициенты позволили проводить оценку плотности заряженных частиц, прошедших через детекторы УРАН в отдельных событиях. Возраст ШАЛ при реконструкции считался постоянным и равным среднему на уровне наблюдения $S = 1.4$.

Для определения характеристик ливней использовался метод аппроксимации экспериментальной установленной зависимости плотности частиц от расстояния до оси ливня с применением функции Нишимуры—Каматы—Грейзена. В качестве инструмента для аппроксимации была выбрана

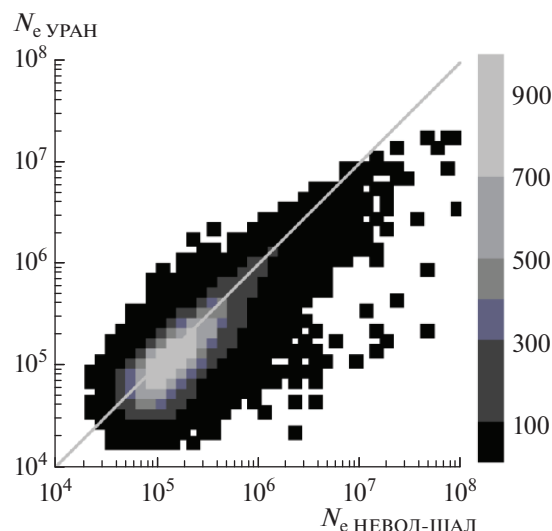


Рис. 5. Корреляции мощностей широких атмосферных ливней, восстановленных по данным установок УРАН и НЕВОД-ШАЛ.

библиотека SciPy [15], разработанная для языка программирования Python и предназначенная для научных и инженерных вычислений. Функция `scipy.optimize.curve_fit` использует нелинейный метод наименьших квадратов, что позволяет оптимизировать параметры функции пространственного распределения. Важно отметить, что точность определения параметров зависит от корректности начальных приближений и установленных границ параметров.

За начальное приближение положения оси ливня были приняты координаты центра тяжести сработавших детекторов установки УРАН. Эти координаты были вычислены с учетом амплитуды откликов детекторов в качестве весовых коэффициентов. Для оценки погрешности восстановления положения оси ливня анализировались расстояния между осями, полученными по данным установок НЕВОД-ШАЛ и УРАН. Среднее расстояние составило 9.9 метров, в 68% событий расстояния между осями, восстановленными установками УРАН и НЕВОД-ШАЛ, не превышают 10.9 м.

В качестве исходной оценки мощности ливня N_e использовались значения, полученные из функции Нишимуры—Каматы—Грейзена:

$$N_e = \frac{\rho_{\max} r_m^2}{\left(\frac{r}{r_m}\right)^{S-2} \left(1 + \frac{r}{r_m}\right)^{S-4.5} \frac{\Gamma(4.5-S)}{2\pi\Gamma(S)\Gamma(4.5-2S)}}, \quad (2)$$

где $\rho_{\max}$ — максимальная плотность частиц, зарегистрированная в детекторе за одно событие.

По полученным результатам была построена корреляция восстановленных по установкам УРАН и НЕВОД-ШАЛ мощностей ливней (рис. 5).

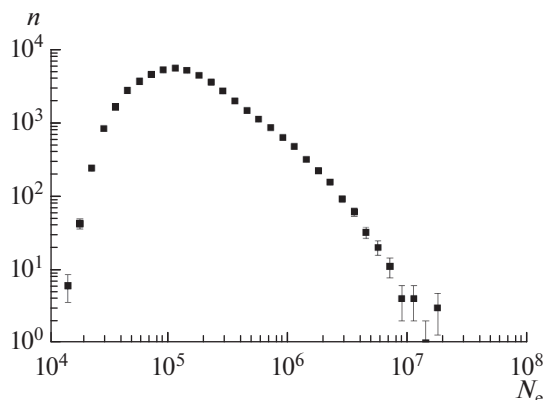


Рис. 6. Спектр восстановленных мощностей широких атмосферных ливней по данным установки УРАН.

Коэффициент корреляции оценок мощностей равен 0.80, большинство событий лежат вблизи линии равенства. Погрешность восстановления логарифма мощности, оцененная как стандартное отклонение распределения разности логарифмов мощностей, восстановленных по установкам УРАН и НЕВОД-ШАЛ, составила 0.24.

Также был получен спектр мощностей ливней по восстановленным данным установки УРАН (рис. 6) в диапазоне мощностей $N_e = 10^{4.15} - 10^{7.25}$. На хвосте распределение приближено к степенному виду. В пределах мощностей от $10^{5.3}$ до $10^{6.5}$ показатель степени для спектра $\beta = -2.39 \pm 0.04$. В обзоре [16] приведены результаты измерения спектров мощностей ШАЛ для различных экспериментов, в которых показатели степени спектра мощностей ШАЛ находятся в пределах от $\beta = -2.3$ до $\beta = -2.8$. Таким образом, показатель спектра мощности ШАЛ, измеренный на установке УРАН, согласуется с показателями, полученными на других установках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика калибровки детекторов установки УРАН по совместным событиям, зарегистрированным установками УРАН и НЕВОД-ШАЛ. Средний калибровочный коэффициент составил 0.69 ± 0.05 кодов АЦП/частицу. Проведена пробная реконструкция параметров ШАЛ по данным установки УРАН. Погрешность восстановления координат осей широких атмосферных ливней составляет 10.9 м. Относительная погрешность восстановления мощности ливня равна $10^{0.24}$. Получен спектр мощностей ливней по данным установки УРАН в диапазоне $\lg N_e = 5.3 - 6.5$ с показателем степени $\beta = -2.39 \pm 0.04$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на Уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-72-10010, <https://rscf.ru/project/22-72-10010/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Aglietta M. *et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1993. V. 336. P. 310–321.
2. Antoni T. *et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2003. V. 513. P. 490–510.
3. Apel W.D. *et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2010. V. 620. P. 202–216.
4. Bertou X. *et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2006. V. 568. P. 839–846.
5. Amenomori M. *et al.* // Astrophys. J. 2008. V. 678. P. 1165–1179.
6. Abbasi R. *et al.* // Astropart. Phys. 2013. V. 44. P. 40–58.
7. Yu-Jiang Bi *et al.* // Chin. Phys. C. 2022. V. 46. P. 035001.
8. Ampilogov N.V. *et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2009. V. 73 (5). P. 637.
9. Yashin I.I. *et al.* // J. Instrum. 2021. V. 16. P. T08014.
10. Gromushkin D.M. *et al.* // J. Instrum. 2017. V. 12 (7). P. C07029.
11. Amelchakov M.B. *et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2022. V. 1026. P. 166184.
12. Amelchakov M.B. *et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2023. V. 1057. P. 168795.
13. Kamata K., Nishimura J. // Prog. Theor. Phys. Suppl. 1958. V. 6. P. 93–155.
14. Greisen K. // Ann. Rev. Nucl. Sci. 1960. V. 10. P. 63–108.
15. SciPy. SciPy Reference Guide. 2015. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/>.
16. Grieder P.K.F. Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects: A Tutorial, Reference Manual and Data Book. 2010. Berlin: Springer. V. 2. P. 614.

Calibration of the Array with Thin Scintillation Detectors for Detection of Extensive Air Showers

S. Yu. Zhezhera^{1, *}, M. B. Amelchakov¹, A. G. Bogdanov¹, D. M. Gromushkin¹, A. Yu. Kononova¹,
K. R. Nugaeva¹, E. P. Khomchuk¹, S. S. Khokhlov¹, I. A. Shulzhenko¹, and E. A. Yuzhakova¹

¹ *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: SYZhezhera@mephi.ru*

Received August 15, 2024; revised August 15, 2024; accepted August 20, 2024

Abstract—A method for calibration of the URAN array, which consists of thin scintillation detectors, is discussed. It is based on comparing of detected extensive air shower events with events in the NEVOD-EAS array. The results of reconstruction of the air-shower parameters according to the URAN array data, obtained taking into account the calibration coefficients, are presented.

Keywords: extensive air showers, scintillation detectors, calibration, Experimental complex NEVOD, URAN, NEVOD-EAS