

**ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

УДК 524.1

**СИСТЕМА КАЛИБРОВОЧНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НЕВОД КАК ДЕТЕКТОР ШАЛ**

© 2021 г. Е. Н. Калинин^а, *, М. Б. Амельчаков^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,
Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

*E-mail: zhenya-toodoo@mail.ru

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

Экспериментальный комплекс НЕВОД включает несколько установок для совместного исследования различных компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ). Одной из таких установок является система калибровочных телескопов (СКТ). Данная установка используется для калибровки измерительных модулей черенковского водного детектора, а также для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ. Восстановление параметров широких атмосферных ливней по данным СКТ имеет целью расширение возможностей всего экспериментального комплекса для исследования ливней в области энергий первичных частиц от 0.1 до 10 ПэВ. Основной задачей восстановления является определение координат положения оси ШАЛ с помощью метода максимального правдоподобия. Для поиска оптимальных значений параметров используется итерационный симплекс-метод Нелдера–Мида. Точность оценки восстанавливаемых параметров ливней изучалась на моделированных событиях. Моделирование проводилось на основе функции пространственного распределения Нишимуры–Каматы–Грейзена для заряженных частиц в ливне. Приводятся результаты восстановления параметров ШАЛ, зарегистрированных в верхней плоскости СКТ.

Ключевые слова: широкий атмосферный ливень, электрон-фотонная компонента, функция пространственного распределения, сцинтилляционный детектор

DOI: 10.56304/S2079562920060305

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи (КЛ) несут важную информацию о механизмах генерации и ускорения в различных процессах и объектах во Вселенной. При энергиях первичных частиц более 1 ПэВ, из-за резкого спадающего степенного энергетического спектра, их исследование возможно только с помощью регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) на наземных установках. Установки для регистрации ШАЛ обычно разворачиваются на большой площади. Одной из самых маленьких может считаться установка ARGO-YBJ [1] с размерами 74 × 78 м². Она расположена на высоте 4300 м в Тибете (Китай) и предназначена для регистрации ШАЛ начиная от сотен гигаэлектронвольт. Установки, рассчитанные на энергии более 100 ТэВ, как, например, Tibet ASγ [2], имеет площадь уже более 30000 м².

Результаты многолетних исследований ШАЛ, проводимых на разных установках, позволили обобщить полученные данные о параметрах ливней, и в результате была получена полуэмпирическая формула пространственного распределения

(ФПР) заряженных частиц ШАЛ – формула Нишимуры–Каматы–Грейзена (НКГ) [3]:

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

где N_e , s , r – параметры ливня (мощность, возраст и расстояние до оси соответственно), $\Gamma(x)$ – гамма-функция, r_m – радиус Мольера в плоскости регистрации. Плотность частиц в ливне убывает по степенному закону от оси ливня к его периферии, как это видно из формулы (1). Часто небольшую окрестность оси ливня называют стволем ШАЛ, так как там сосредоточены самые энергичные частицы. Эта формула, полученная в 1960 году, до сих пор используется для восстановления параметров регистрируемых ливней.

В Экспериментальном комплексе НЕВОД [4] создан уникальный набор установок, который позволяет исследовать различные компоненты ШАЛ в широком диапазоне энергий (10¹⁰–10¹⁹ эВ). Одной

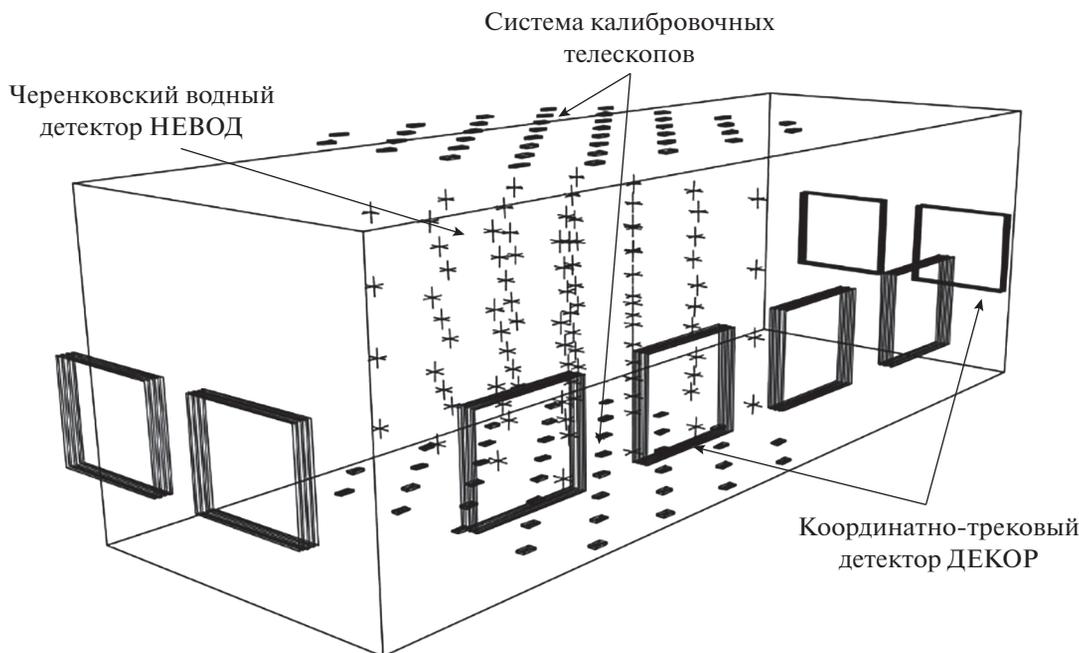


Рис. 1. Установки экспериментального комплекса невод.

из установок комплекса является система калибровочных телескопов. Верхняя плоскость установки используется для исследования электронной компоненты ШАЛ в диапазоне первичных энергий от 0.1 до 1 ПэВ. Плоскость занимает площадь всего $8 \times 10 \text{ м}^2$.

1. СИСТЕМА КАЛИБРОВОЧНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

Система калибровочных телескопов (СКТ) [5] в составе Экспериментального комплекса НЕВОД [4] создавалась для калибровки измерительных модулей черенковского водного детектора, но после модернизации в 2012 году используется также как детектор электронной и мюонной компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ). Результаты обработки данных СКТ использовались для восстановления спектров локальной плотности электронной и мюонной компонент ШАЛ [6].

СКТ состоит из двух плоскостей сцинтилляционных детекторов площадью по 80 м^2 каждая (рис. 1). Одна плоскость СКТ расположена над черенковским водным детектором, а другая на его дне. В каждой плоскости 40 сцинтилляционных детекторов с размерами $40 \times 20 \times 2 \text{ см}^3$ установлены в шахматном порядке. Нижняя плоскость экранирована водным бассейном глубиной 9 м, в котором поглощается электрон-фотонная компонента.

Поэтому восстановление параметров электронной компоненты ШАЛ осуществляется только по данным верхней плоскости установки. Для этого

в триггерной системе экспериментального комплекса вырабатывается общий сигнал записи события при срабатывании внутри временных ворот 75 нс не менее 3 сцинтилляционных детекторов в верхней плоскости СКТ. Порог срабатывания детекторов установлен на уровне 25 мВ, что соответствует приблизительно 20–25% от значения наиболее вероятного отклика на вертикальный мюон. Распределение по кратности срабатывания детекторов СКТ приведено на рис. 2. Начиная с кратности, равной 10, распределение на рис. 2 имеет степенной вид с показателем -2.7 . Эффект повышения темпа счета для 38–40 сработавших детекторов связан с тем, что число детекторов СКТ ограничено. Если бы в плоскости СКТ было более 40 детекторов, то избыток событий с большой кратностью срабатывания распределился бы среди них.

При отборе событий для восстановления параметров ШАЛ принималось во внимание, что при малых кратностях (порядка 10) вероятность того, что ось проходит через площадь расположения детекторов, невелика. Поэтому в качестве критерия отбора было выбрано значение кратности равное 30 сработавшим детекторам.

2. КАЛИБРОВКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Для количественной оценки числа регистрируемых частиц используется амплитудная калибровка сцинтилляционных детекторов по энерговыделению одиночных вертикальных мюонов. Для регистрации одиночных мюонов использует-

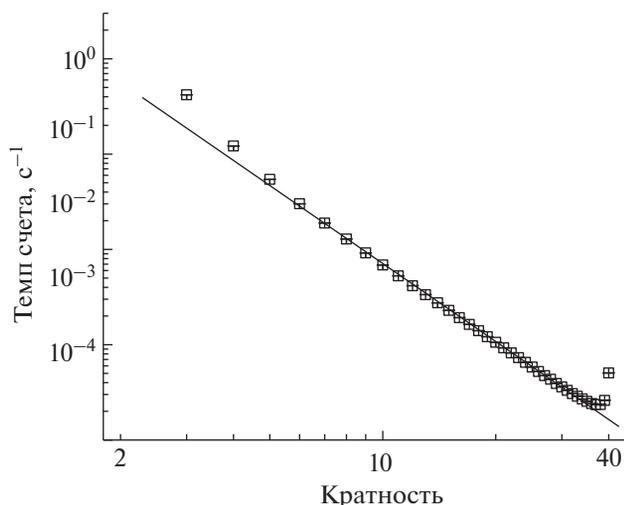


Рис. 2. Распределение кратности срабатывания детекторов верхней плоскости СКТ.

ся телескопный триггер, когда детекторы сработали одновременно в верхней и нижней плоскостях. Обрабатываются только те события, в которых сработало по одному детектору в каждой плоскости. Для увеличения статистики событий для каждого детектора учитываются телескопные события со всеми детекторами противоположной плоскости. При этом учитывается угол наклона траектории мюона. Для учета используется зависимость наиболее вероятных потерь от толщины слоя вещества детектора [7] и амплитуда отклика приводится к вертикальному положению трека. Распределение приведенных амплитуд откликов для одного из детекторов представлено на рис. 3. Так как распределение имеет несимметричный вид, то наиболее удобной величиной для определения отклика детектора является значение амплитуды, соответствующее максимуму распределения. Для этого проводилась аппроксимация с помощью функции распределения Гумбеля [8].

3. МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

Восстановление параметров ШАЛ проводится методом подбора оптимальных параметров модифицированной ФПР. Модификация ФПР необходима для того, чтобы учесть конечность размеров детекторов, и заключалась в замене переменной r на $r + \Delta$ в формуле (1), где Δ по величине сравнима с размером детектора и равна 0.2 м. Данная замена наиболее простым способом позволяет учесть размеры детектора. Параметры считаются оптимальными, если функция L , построенная с помощью метода максимального правдоподобия [9], достигает своего максимального значения:

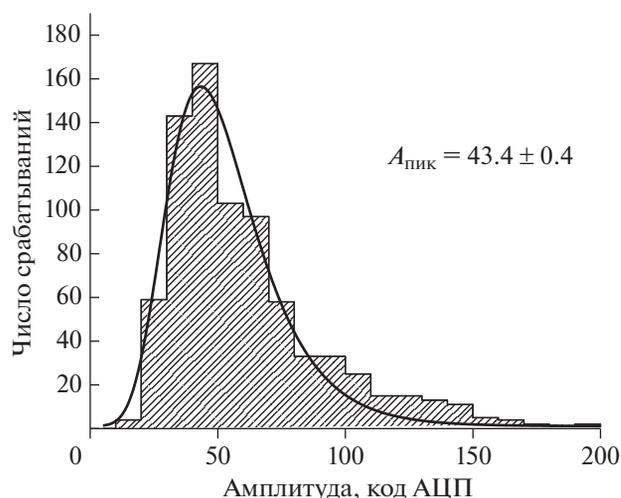


Рис. 3. Распределение амплитуд откликов для одного из детекторов СКТ.

$$L = \prod_{i=1}^n P(n_i, N_i), \quad (2)$$

где i – порядковый номер детектора, $P(n_i, N_i)$ – вероятность реализации того, что при ожидаемом числе частиц попавших в детектор n_i будет зарегистрировано N_i . L называют функцией максимального правдоподобия. На практике удобнее использовать логарифмический вид функции правдоподобия (2).

Для определения вероятностей реализации события используется распределение Пуассона. В результате логарифмическая функция правдоподобия имеет вид:

$$\ln L = \sum_i (N_i \ln n_i - n_i). \quad (3)$$

В формуле (3) опущено слагаемое, которое не меняет свое значение при варьировании параметров ливней.

Нахождение максимума функции осуществляется итерационным симплекс-методом Нелдера-Мида [10]. Суть симплекс-метода заключается в том, чтобы двигаться в сторону наилучшего положения с помощью отражения и растяжения симплекса. Данный метод зависит от начального положения и быстро находит положение максимума. Для нахождения глобального максимума рассматриваются несколько начальных точек, расположенных равномерно в заданной области. Критерием остановки является случай, когда разность значений функции правдоподобия (3) текущей и предыдущей итерации меньше заданного значения:

$$|\ln L_{i+1} - \ln L_i| < \varepsilon. \quad (4)$$

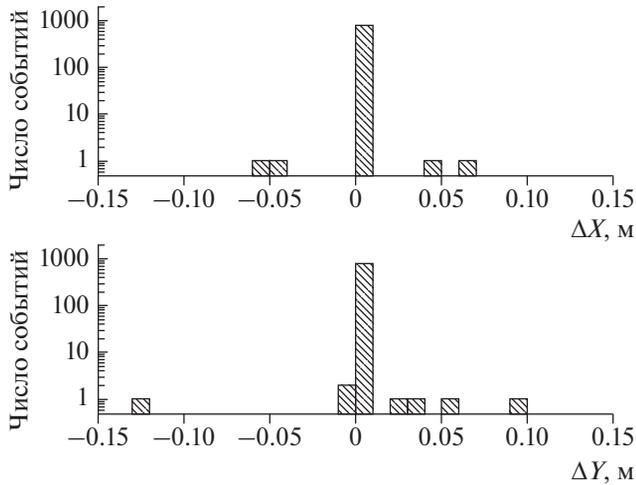


Рис. 4. Распределение отклонений от истинного значения положений оси ШАЛ.

В данной работе использовалось значение $\varepsilon \sim 10^{-8}$, так как при данном значении видно, что число n_i формулы (3) должно измениться на величину того же порядка.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОБЫТИЙ

Для оценки точности метода восстановления были использованы моделированные события. Для моделирования использовалась модифицированная ФПР и генераторы случайных величин – параметров ШАЛ. Положение осей ливней задавалось равномерно на площади расположения верхней плоскости СКТ ($11 \times 13 \text{ м}^2$). Границы площади были выбрана таким образом, чтобы отступы от крайних детекторов установки составляли 1.5 м. В качестве генератора мощности ШАЛ была выбрана степенная функция с показателем -2.5 , где в качестве нижней границы выбрано значение $N_e = 10^5$. Так как на практике преимущественно встречаются старые ливни, то в качестве генератора возраста выбрано распределение Гаусса с резким пиком (параметры распределения: среднее значение 1.1, среднеквадратичное отклонение 0.1).

На этапе моделирования событий считалось, что условия “идеальные”. Это означает, что детекторы регистрируют все попавшие в них частицы:

$$N_i = S p_e(N_e, s, r_i), \quad (5)$$

где S – площадь детектора, r_i – расстояние от оси ШАЛ.

При восстановлении было получено распределение отклонений от истинного значения положений оси ШАЛ вдоль координат x и y (рис. 4). Из полученных распределений видно, что большинство точек восстанавливаются практически “идеально”. Доля событий, которые отклонились бо-

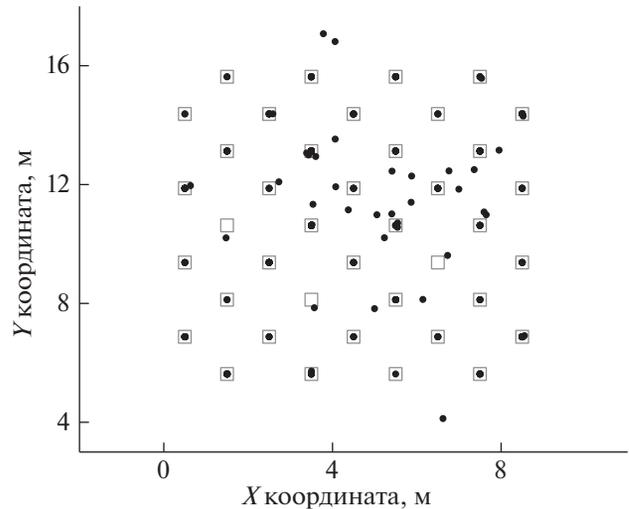


Рис. 5. Результаты восстановления положения оси ливня. Точками показаны восстановленные положения осей ШАЛ.

лее чем на 1 см от заданного в модели положения, составляет около 1%, и все они находятся на периферии установки.

5. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Данные результатов обработки приводятся за период работы установки СКТ с 24.09.2020 по 30.09.2020. За данный период в СКТ было зарегистрировано 621 событие в верхней плоскости с кратностью более 29 детекторов.

В ходе обработки данных использовалась модифицированная ФПР. Количество попавших в детектор частиц оценивалось как произведение плотности числа частиц в данной точке на реальную площадь детектора (5). Направление прилета ШАЛ по данным СКТ не определялось. Но, тем не менее, можно считать эти направления близки к вертикальным из-за достаточно узкого распределение зенитных углов $\sim \cos^{8.5} \theta$ [11].

На рис. 5 представлены восстановленные положения осей ШАЛ по данным экспериментальной выборки. Можно заметить, что восстановленные положения осей ливня в основном локализируются в местах расположения детекторов СКТ. Данный факт указывает на то, что модификации ФПР недостаточно для корректной работы алгоритма.

Для расчета ожидаемого количества попавших в детектор частиц с учетом его реальных размеров было введено интегрирование по площади детектора:

$$N_n = \int_S dS p_e(N_e, s, r). \quad (8)$$

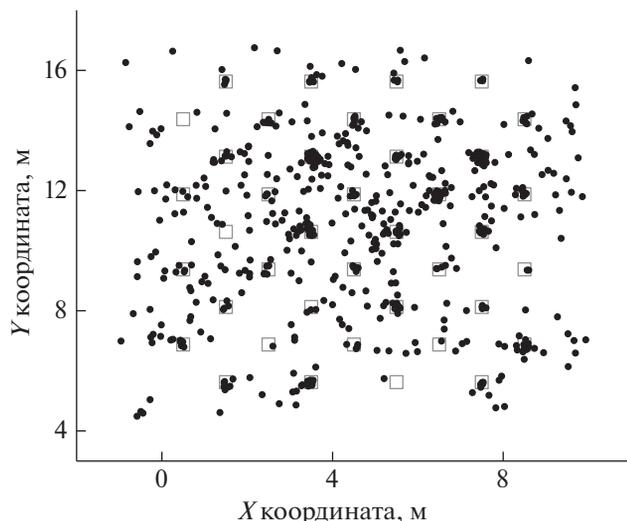


Рис. 6. Результат восстановления стволов шал в случае “неточечных” детекторов. Точками показаны восстановленные положения осей ШАЛ.

Интегрирование осуществлялось методом Монте-Карло: проводилась замена таким образом, чтобы область интегрирования S имела вид единичного квадрата, а затем выбирались 10 точек, подчиняющихся равномерному распределению. Таким образом, интеграл сводится к обычной сумме [12]:

$$N \approx \frac{S}{M} \sum_{j=1}^M \rho_e(N_e, s, r_j), \quad (9)$$

где M – число выбранных точек (в данной работе $M = 10$). Результаты восстановления положения осей в этом случае представлены на рис. 6. Видно, что те события, которые были “притянуты” к координатам расположения детекторов, теперь распределены по площади установки. Распределения по координатам X и Y восстановленных осей в плоскости верхней плоскости СКТ приведены на рис. 7.

Из полученных распределений видно, что модификации ФПР недостаточно при восстановлении положения стволов ШАЛ, а следовательно, кроме расходимости в нуле поправкой Δ , нужно также учитывать реальные размеры детекторов и проводить интегрирование по площадям, занимаемым этими детекторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов обработки моделированных событий следует, что используемые совместно методы максимального правдоподобия и Нелдера-Мида можно использовать для восстановления координат осей ШАЛ.

В результате восстановления параметров ШАЛ по экспериментальным данным было выявлено, что если размеры установки меньше характерных размеров регистрируемых ШАЛ, то неприменимо использование точечного приближения размера детекторов в установке.

При учете изменения плотности частиц ШАЛ в пределах площади детекторов установка СКТ, не-

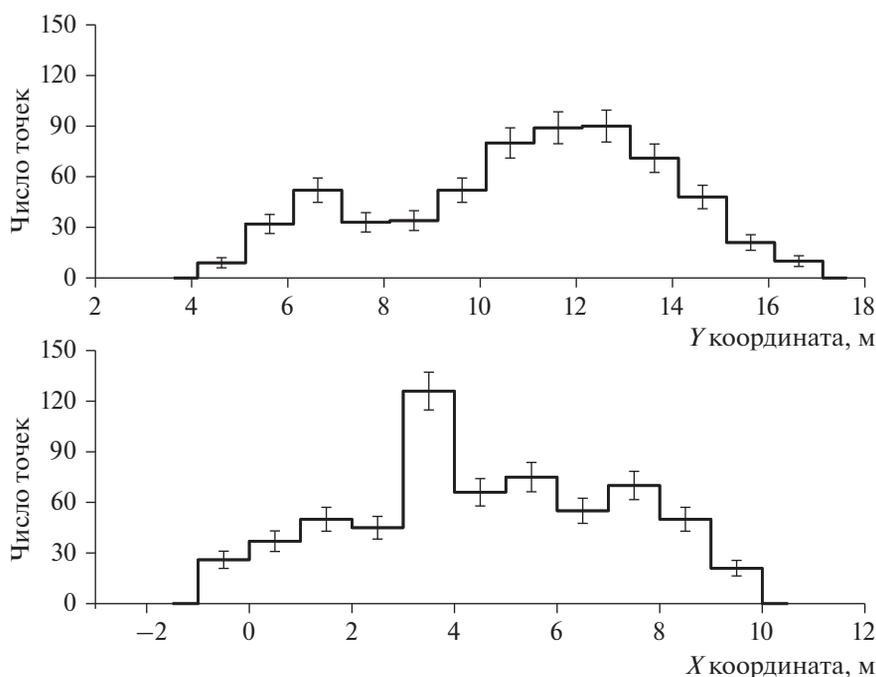


Рис. 7. Распределение положений осей шал вдоль координат X и Y для модели.

смотря на свои небольшие размеры, может быть использована для регистрации стволов ШАЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Bartoli B. et al.* // Phys. Rev. D. 2012. V. 85. P. 092005.
2. *Amenomori M. et al.* // Astrophys. J. 2008. V. 678. P. 1165–1179.
3. *Greisen K.* // Ann. Rev. Nucl. Sci. 1960. V. 10. P. 63–108.
4. *Petrukhin A.A.* // Phys. Usp. 2015. V. 58. No. 5. P. 486–494.
5. *Amelchakov M.B. et al.* // Instr. Exp. Tech. 2018. V. 61. No. 5. P. 673–679.
6. *Amelchakov M.B. et al.* // Phys. At. Nuclei. 2019. V. 82. No. 6. P. 699–703.
7. *Zyla P.A. et al. (Particle Data Group)* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 2020. No. 8. P. 083C01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>
8. *Gumbel E.J.* Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications. Applied Mathematics Series 33 (1st Ed.). U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards. 1954. P. 51.
9. *Худсон Д.* Статистика для физиков. Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике. Пер. англ. 1970. Москва: Мир.
10. *Банди Б.* Методы оптимизации. Вводный курс. 1988. Москва: Радио и Связь.
11. *Grieder P.K.F.* Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects. A Tutorial, Reference Manual and Data Book. 2010. Heidelberg. V. 1.
12. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. 1978. Москва: Наука.

Calibration Telescope System of the Nevod Experimental Complex as the EAS Detector

E. N. Kalinin¹ and M. B. Amelchakov^{1, *}

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe sh. 31, Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: zhenya-toodoo@mail.ru*

Received March 4, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

The NEVOD experimental complex includes several installations for the joint study of various components of extensive air showers (EAS). One of the installations is the calibration telescope system (CTS). This installation is used for calibration of the measuring modules of the Cherenkov water detector, as well as for recording the electron-photon and muon components of the EAS. The reconstruction of the EAS parameters according to the CTS data aims to improve the capabilities of the entire experimental complex for studying showers in the region of primary particle energies from 0.1 to 10 PeV. The main task of reconstruction is to determine the coordinates of the EAS axis position using the maximum likelihood method. The iterative simplex method of Nelder-Mead is used to find the optimal values of the parameters. The accuracy of the reconstructed parameters was estimated on simulated events. The simulation was based on the Nishimura-Kamata-Greisen lateral distribution function for EAS charged particles. The results of reconstruction of the parameters of the EAS registered in the upper plane of the SCT are presented.

Keywords: extensive air shower, electron-photon component, lateral distribution function, scintillation detector