

ФУНКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ, РЕГИСТРИРУЕМОЙ УСТАНОВКОЙ НЕВОД-ШАЛ

© 2024 г. Е. А. Южакова^{1)*}, М. Б. Амельчаков¹⁾, А. Г. Богданов¹⁾, Д. М. Громушкин¹⁾, А. Ю. Коновалова¹⁾, Н. В. Пономарева¹⁾, С. С. Хохлов¹⁾, И. А. Шульженко¹⁾

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.; после доработки 27.09.2023 г.; принята к публикации 27.09.2023 г.

В работе представлено сравнение точности восстановления мощности и координат осей широких атмосферных ливней на основе отклика установки НЕВОД-ШАЛ при использовании различных функций пространственного распределения частиц. Приводится сопоставление пространственного распределения частиц ШАЛ по моделированным и экспериментальным данным.

DOI: 10.31857/S0044002724010053, EDN: KEFDOK

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования первичных космических лучей высоких энергий (более 10^{14} эВ) проводятся с помощью широких атмосферных ливней (ШАЛ). Основные параметры ШАЛ (зенитный и азимутальный угол, координаты оси, мощность и возраст ливня) позволяют получать информацию об энергетическом спектре, химическом составе и анизотропии космических лучей. Для регистрации широких атмосферных ливней в Экспериментальном комплексе НЕВОД [1] работает установка НЕВОД-ШАЛ [2], которая состоит из девяти кластеров и регистрирует ливни в диапазоне первичных энергий 10^{15} – 10^{17} эВ. Кластеры установки расположены на крышах лабораторных корпусов и на территории вокруг зданий и занимают площадь около 10^4 м². Каждый кластер состоит из четырех детектирующих станций (ДС), позволяющих измерять энерговыделение и время прихода частиц ливней.

Для восстановления параметров ШАЛ требуется единая функция, аппроксимирующая пространственное распределение частиц $\rho(r)$ на разных расстояниях r от оси ливня. В настоящее время существует множество различных функций, базирующихся на функции Нишимуры—Каматы—Грейзена [3]. Решение об использовании той или иной формы аппроксимирующей функции принимается на основе анализа моделированных событий.

2. ФУНКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В различных экспериментах по регистрации ШАЛ, измеряющих плотность частиц ливней, например ШАЛ-МГУ [4], Tunka-Grande [5], ТШВНС [6], KASCADE-Grande [7], EAS-TOР [8], применяются различные формы функции пространственного распределения (ФПР) для реконструкции параметров ливня. Наиболее распространенными формами ФПР являются: классическая функция Нишимуры—Каматы—Грейзена (НКГ), модифицированная функция НКГ (m), функция НКГ с локальным возрастом (loc) и ФПР из работы [9] (lag).

Классическая НКГ-функция представляет собой параметризацию функции пространственного распределения электронов, полученную в рамках чистой электромагнитной каскадной теории [10]:

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

где S — возраст (данная формула справедлива для диапазона возрастов $0.5 < S < 1.5$); N_e — мощность ливня (число частиц); r_M — радиус Мольера (характерная единица длины в теории рассеяния Мольера); δ — поправка на расстояние до оси ливня для предотвращения предельного случая $\rho \rightarrow \infty$, когда ось ливня попала в детектор.

Для уровня наблюдения установки НЕВОД-ШАЛ (примерно 181 м над уровнем моря) радиус Мольера находится в диапазоне от 70 до 80 м в зависимости от параметров атмосферы.

¹⁾ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

*E-mail: EAYuzhakova@mephi.ru

В работе В. В. Учайкина и его коллег [11] было установлено, что классическая функция НКГ не описывает радиальное распределение частиц при стремлении энергии первичной частицы к бесконечности ($E \rightarrow \infty$), поэтому авторы предложили следующую модификацию:

$$\rho_m(r, S, N_e) = (m)^{-2} \rho_{\text{НКГ}}\left(\frac{r}{m}\right); \quad (2)$$

$$\rho_{\text{НКГ}}\left(\frac{r}{m}\right) = \left(\frac{N_e}{r_M^2}\right) \left(\frac{r + \delta}{r_M m}\right)^{S-2} \times \left(1 + \frac{r + \delta}{r_M m}\right)^{S-4.5} \frac{\Gamma(4.5 - S)}{2\pi\Gamma(S)\Gamma(4.5 - 2S)}, \quad (3)$$

где $m = 0.78 - 0.21S$ для диапазона возрастов $0.8 < S < 1.6$.

Экспериментальные данные ШАЛ-МГУ [12] показывают, что на расстоянии от 15 до 30 м от оси ливня пространственное распределение частиц спадает медленнее, чем предсказывает функция НКГ. Предполагается, что это связано с ядерно-каскадным процессом в ШАЛ, для учета которого вводится понятие локального возраста S_{loc} [13]. Модификация НКГ-функции осуществляется за счет поправки на зависимость локального возраста S_{loc} от расстояния до оси ливня r :

$$\rho_{\text{loc}}(r, S, N_e) = \left(\frac{N_e}{r_M^2}\right) \left(\frac{r + \delta}{r_M}\right)^{S+a(r)-2} \times \left(1 + \frac{r + \delta}{r_M m}\right)^{S+a(r)-4.5} C(S), \quad (4)$$

$$C(S) = \frac{\Gamma(4.5 - S)}{2\pi\Gamma(S)\Gamma(4.5 - 2S)}, \quad (5)$$

где $a(r)$ — экспериментально полученная зависимость локального возраста S_{loc} от расстояния до оси ливня r на установке ШАЛ-МГУ для ливней с зенитными углами $\theta < 30^\circ$.

Из теоретического расчета и Монте-Карло-моделирования, проведенного с учетом ядерно-каскадного процесса, в работе [9] предлагается описывать поперечное распределение электронов как в гамма-ливнях, так и в ливнях, инициированных первичными ядрами, с помощью масштабируемого формализма. В функции пространственного распределения основным масштабируемым параметром является среднеквадратичный радиус ливня $R_{m.s}$ (аналог радиуса Мольера r_M в классической ФПР):

$$\rho_{\text{lag}}(r, S, N_e) = \left(\frac{N_e \times 0.28}{R_{m.s}^2}\right) \left(\frac{r + \delta}{R_{m.s}}\right)^{-1.2} \times \left(1 + \frac{r + \delta}{R_{m.s}}\right)^{-3.33} \left[1 + \left(\frac{r + \delta}{10R_{m.s}}\right)^2\right]^{-0.6}. \quad (6)$$

Среднеквадратичный радиус $R_{m.s}$, м, зависит от среднего положения максимума каскадной кривой t_{max} , $\Gamma \times \text{см}^{-2}$, глубины атмосферы от первого взаимодействия до уровня наблюдения t и первичной энергии частицы E_0 :

$$R_{m.s}(E_0, t) = \frac{\rho_0}{\rho(t)} 173.0 \times \left[0.546 + \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{t}{t_{\text{max}} + 100(\Gamma \times \text{см}^{-2})} - 1\right)\right], \quad (7)$$

где $\rho_0 = 1.225 \times 10^{-3} \Gamma \times \text{см}^{-3}$; $\rho(t)$ — плотность воздуха на атмосферной глубине t . Положение максимума каскадной кривой определяется как

$$t_{\text{max}}(E_0) = 740 + 65 \log_{10}(E_0 / 10^{18} \text{ эВ}). \quad (8)$$

Так как среднеквадратичный радиус ливня зависит от положения максимума каскадной кривой и, следовательно, от энергии первичной частицы, то определение данного параметра представляется сложной задачей. Однако в работе [14] показано, что восстановление параметров с использованием масштабируемости также возможно при использовании фиксированных значений первичных энергий.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

Для анализа различных ФПР при реконструкции параметров ливней на основе отклика установки НЕВОД-ШАЛ использовались моделированные события, полученные в программе CORSIKA [15] (версия 7.7410) с использованием модели адронных взаимодействий QGSJET-II-04 + FLUKA 2020.0.3. Электронно-фотонная компонента рассчитывалась с помощью подпрограмм EGS. Энергетический спектр первичных частиц имеет степенную форму с показателем $(\gamma + 1) = 2.7$. Анализировались 1200 000 событий для ливней от протонов с энергиями $10^{15} - 10^{17}$ эВ в диапазоне зенитных углов от 0° до 50° . Оси ливней разыгрывались равномерно по площади, включающей установку НЕВОД-ШАЛ и территорию за границей установки (100 м от края). Моделирование откликов детектирующих станций (ДС) проведено с использованием пакета Geant4 [16] (версия 10.7), описание частиц и физических процессов осуществлялось с помощью стандартного набора (PhysicsList) QGSP_BERT.

При анализе экспериментальных данных первым этапом реконструкции является определение зенитного и азимутального углов прихода первичной частицы по относительным временным задержкам срабатывания ДС установки. Для проверки разных форм ФПР по моделированным событиям направление оси ШАЛ считалось известным и при

обработке событий проводился только амплитудный анализ откликов детектирующих станций.

Для получения координат оси, мощности и возраста ливня использовались два метода: метод наименьших квадратов (МНК) и метод максимального правдоподобия (ММП).

Восстановление параметров ливней методом наименьших квадратов проводилось путем аппроксимации откликов детектирующих станций функцией пространственного распределения частиц. Для аппроксимации использовалась библиотека языка программирования Python — SciPy [17], предназначенная для выполнения научных и инженерных расчетов. Выбранная функция оптимизации `scipy.optimize.curve_fit` использует нелинейный МНК при подборе параметров.

Поиск параметров ШАЛ методом максимального правдоподобия основан на минимизации логарифмической функции правдоподобия $L(n, \lambda)$:

$$L(n, \lambda) = - \left[\sum_{i=1}^k \ln P_n + \sum_{i=1}^{j-k} \ln P_0 \right]; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^k \ln P_n = \sum_{i=1}^k \left[n_i \ln \lambda_i - \lambda_i + \ln \left(1 - \prod_{i=2}^4 e^{-\lambda_i} \right) \right]; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{j-k} \ln P_0 = \sum_{i=1}^{j-k} \ln \left[e^{-\lambda_i} + \left(1 - e^{-\lambda_i} \right) \prod_{i=2}^4 e^{-\lambda_i} \right], \quad (11)$$

где n — количество зарегистрированных частиц; k — количество сработавших ДС в событии; j — общее количество ДС, подключенных к установке на момент регистрации; P_n и P_0 — вероятности детектирующей станции сработать и не сработать соответственно; λ — ожидаемое число частиц.

В данных формулах учтены триггерные условия срабатывания кластера: отклик от двух и более ДС в кластере превышает 0.75 частицы.

Поиск минимума функции правдоподобия (см. формулу (11)) выполняется функцией `optimize.minimize` из библиотеки SciPy, которая для поиска минимума использует усеченный алгоритм Ньютона.

В анализе использовались события с мягкими и жесткими условиями отбора. Мягкие условия отбора: максимальное энерговыделение в одной из внутренних детектирующих станций (рис. 1), включая ДС центрального кластера установки, который расположен на крыше ЭК НЕВОД; сработали три и более кластера одновременно. Жесткие условия отбора: максимальное энерговыделение в одной из детектирующих станций центрального кластера; в событии одновременно сработали семь и более кластеров. Количество событий, удовлетворяющих жестким условиям, — 9876, мягким условиям — 83683.

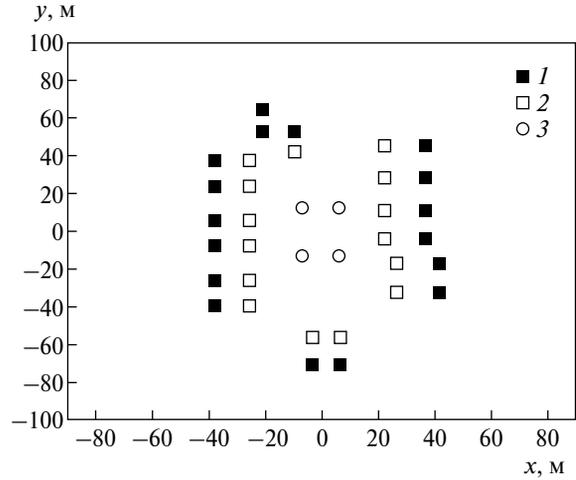


Рис. 1. Координаты детектирующих станций установки НЕВОД-ШАЛ: 1 — внешние ДС; 2 — внутренние ДС; 3 — ДС центрального кластера установки.

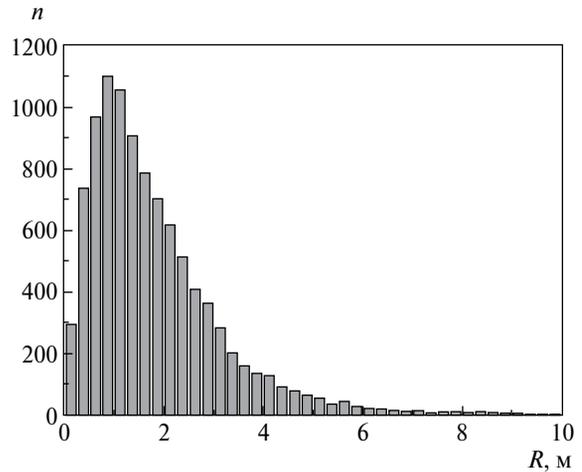


Рис. 2. Распределение событий n по расстоянию R между восстановленной (МНК с классической НКГ-функцией) и моделированной осями ШАЛ.

Для оценки погрешности восстановления оси ШАЛ используется величина $\sqrt{R^2}$, где R — расстояние между положениями восстановленной $(x_{\text{восс}}, y_{\text{восс}})$ и моделированной $(x_{\text{мод}}, y_{\text{мод}})$ оси ШАЛ в плоскости $z = 0$:

$$R = \sqrt{(x_{c, \text{мод}} - x_{c, \text{восс}})^2 + (y_{c, \text{мод}} - y_{c, \text{восс}})^2}. \quad (12)$$

Распределение событий по расстоянию между положениями восстановленной и моделированной осей R приведено на рис. 2. Координаты оси ливня находились методом наименьших квадратов с использованием классической НКГ-функции при жестких условиях отбора. Величина $\sqrt{R^2}$ для данного распределения составляет 3.4 м, наиболее вероятное значение — 0.9 м, ширина на полувысоте — 2.2 м.

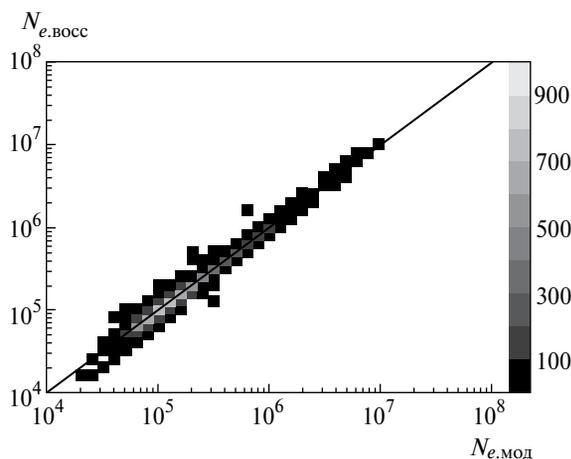


Рис. 3. Корреляции восстановленной $N_{e,восс}$ (МНК с классической НКГ-функцией) и моделированной $N_{e,мод}$ мощности ливня. Линия на рисунке показывает прямую пропорциональность.

Важнейшим параметром ШАЛ является мощность. При моделировании ливней с первичной энергией от 10^{15} до 10^{17} эВ значения мощности находятся в диапазоне от 2×10^4 до 10^7 частиц. На рис. 3 представлена корреляция восстановленной $N_{e,восс}$ и моделированной $N_{e,мод}$ мощности ливня. Мощность восстановлена с помощью классической НКГ-функции методом наименьших квадратов при жестких условиях отбора. Значение моделированной мощности ливня соответствует общему числу электронов на уровне наблюдения, которые получают прямым пересчетом числа электронов в программе CORSIKA. Как видно, большинство событий лежат на линии прямой пропорциональности, коэффициент корреляции составляет 0.99.

Точность реконструкции мощности ливня определялась как стандартное отклонение σ распределения логарифма отношения восстановленной и моделированной мощности при значении моделированной $\lg N_{e,мод} = 5.0 \pm 0.1$ (рис. 4). Стандартное отклонение представленного распределения составляет 0.045 ± 0.001 , среднее значение равно 0.011 ± 0.001 .

При анализе встречались события, для которых алгоритмы восстановления не смогли определить наилучшие параметры. В основном это связано с тем, что ось ливня находилась за пределами установки НЕВОД-ШАЛ либо на установку пришел ливень малой мощности, поэтому количество невосстановленных событий может служить критерием оценки работы методов реконструкции.

В табл. 1 представлены результаты реконструкции параметров ШАЛ для различных видов ФПР методом наименьших квадратов: погрешность восстановления оси $\sqrt{R^2}$, точность восстановления

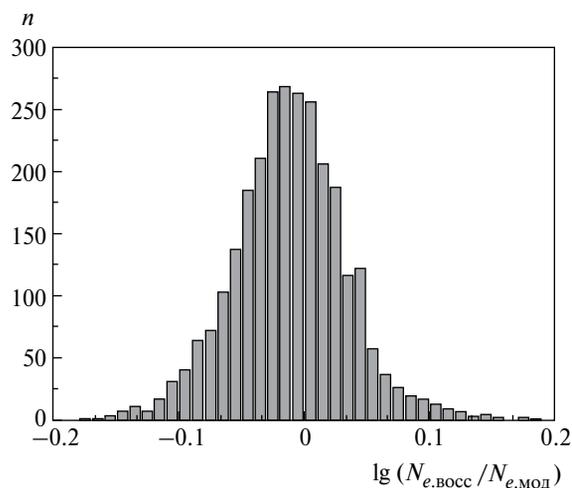


Рис. 4. Распределение событий n по логарифму отношения восстановленной (МНК с классической НКГ-функцией) и моделированной мощности при моделированном значении $\lg N_{e,мод} = 5 \pm 0.1$.

мощности σ и количество невосстановленных событий. Персональному компьютеру на базе процессора Intel Core i7 (3.6 ГГц) с оперативной памятью 64 Гбайт для обработки выборки событий с мягкими и жесткими условиями отбора методом наименьших квадратов с использованием классической НКГ-функции потребовалось примерно 16 мин. Как видно, различные функции дают близкую точность восстановления оси и мощности ливня, хотя результат использования ФПР [9] по сравнению с остальными вариантами хуже на ~ 1.5 м. Погрешность определения оси ливня для всех вариантов функций лежит в диапазоне от 3 до 5 м. При характерном размере одного кластера 15 м

Таблица 1. Результаты реконструкции параметров ШАЛ методом наименьших квадратов

Форма ФПР	$\sqrt{R^2}$, м	σ	Число невосстановленных событий
Жесткие условия отбора			
Классическая НКГ	3.4	0.045	1
Модифицированная НКГ	3.8	0.050	8
С локальным возрастом	3.6	0.048	6
Из работы [9]	5.0	0.103	0
Мягкие условия отбора			
Классическая НКГ	31.7	0.090	312
Модифицированная НКГ	35.1	0.109	125
С локальным возрастом	30.8	0.104	53
Из работы [9]	36.0	0.161	2

полученная точность восстановления удовлетворяет требованиям эксперимента. Как видно из таблицы, наилучшая точность восстановления мощности достигается при использовании классической НКГ-функции, среднеквадратичное отклонение распределения по отношению логарифмов моделированной и восстановленной мощности $\sigma = 0.045$ для жестких условий отбора и $\sigma = 0.090$ для мягких, что при пересчете из логарифмического в линейный масштаб дает относительную точность 11 и 23%.

Результаты восстановления параметров ливней для разных видов ФПР методом максимального правдоподобия приведены в табл. 2. Для обработки событий с мягкими и жесткими условиями отбора на основе метода максимального правдоподобия при использовании классической НКГ-функции персональному компьютеру с теми же характеристиками (как и для обработки МНК) требуется приблизительно 2.5 ч. Для всех форм ФПР результаты по восстановлению оси ШАЛ в среднем на 18% хуже, чем при использовании метода наименьших квадратов, однако алгоритм ММП восстанавливает все события из имеющейся выборки.

Для обоих методов восстановления параметров (МНК и ММП) результаты точности реконструкции для классической НКГ, модифицированной НКГ и функции с локальным возрастом являются сопоставимыми. Результат применения ФПР из работы [9] оказался несколько хуже. Масштабируемый подход, по сравнению с функциями, основанными на классической НКГ, позволяет получить более точное распределение электронов на больших расстояниях от оси ливня (до 3 км), поэтому скейлинговый формализм хорошо описывает данные крупномасштабных установок [18]. Однако теоретические и экспериментальные ФПР

плохо согласуются на малых расстояниях от оси ливня, что важно для установок меньших размеров, например, ШАЛ-МГУ [19] и НЕВОД-ШАЛ. Оптимальным вариантом для реконструкции параметров широких атмосферных ливней на установке НЕВОД-ШАЛ является классическая НКГ-функция.

4. СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА

Для сравнения моделированных и экспериментальных распределений плотности частиц был выбран период работы установки НЕВОД-ШАЛ за один месяц — от 01.07.2020 до 31.07.2020. Всего за данный период было зарегистрировано около 22.5 млн событий, из них примерно 140 тыс. удовлетворяют жестким условиям отбора. Средняя экспериментальная плотность частиц ливней была получена при жестких условиях отбора в диапазоне восстановленной мощности $\lg N_{e, \text{восст}} = 5.00 \pm 0.25$. Реконструкция параметров ливней проводилась методом максимального правдоподобия с использованием классической НКГ-функции. На рис. 5 представлены средние функции пространственного распределения: сплошные квадраты — экспериментальные данные установки НЕВОД-ШАЛ; полые точки — средние плотности по данным моделирования при жестких условиях отбора в диапазоне мощности $\lg N_{e, \text{мод}} = 5.00 \pm 0.25$; сплошная линия — теоретические значения плотности частиц ливня, рассчитанные по классической НКГ-функции со значением мощности $\lg N_e = 5.0$ и возраста $S = 1.36$ (средний возраст ливней в анализируемой выборке событий по данным CORSIKA).

Таблица 2. Результаты реконструкции параметров ШАЛ методом максимального правдоподобия

Форма ФПР	$\sqrt{R^2}$, м	σ	Число невосстановленных событий
Жесткие условия отбора			
Классическая НКГ	5.0	0.053	0
Модифицированная НКГ	4.6	0.052	0
С локальным возрастом	4.9	0.052	0
Из работы [9]	5.1	0.120	0
Мягкие условия отбора			
Классическая НКГ	32.1	0.111	0
Модифицированная НКГ	34.0	0.118	0
С локальным возрастом	31.7	0.117	0
Из работы [9]	33.6	0.175	0

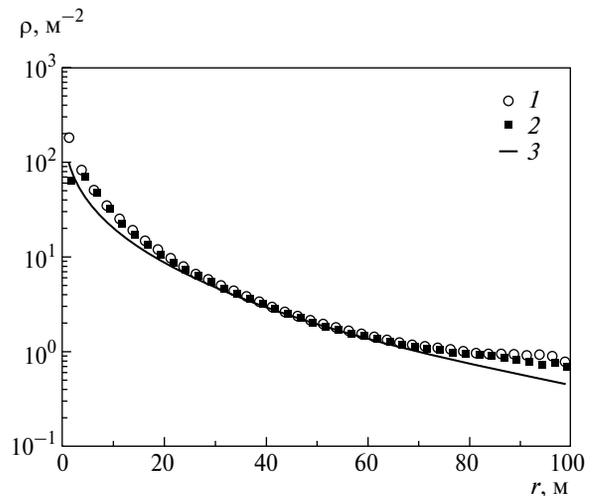


Рис. 5. Средние ФПР: 1 — данные эксперимента; 2 — результаты моделирования; 3 — теоретическая плотность частиц по функции НКГ ($\lg N_e = 5$, $S = 1.36$).

Как видно, экспериментальная плотность частиц по данным установки НЕВОД-ШАЛ хорошо согласуется с результатами моделирования. Классическая НКГ-функция хорошо описывает экспериментальные данные и результаты моделирования на расстояниях от 20 до 70 м. Как и во многих экспериментах, в области ствола ШАЛ наблюдается превышение плотности частиц над теоретической ФПР, которое может быть вызвано совокупностью факторов, таких как энерговыделение адронной компоненты, переходные эффекты в детекторах, включая $\gamma - e$ -конверсию [20], и др. Завышение плотности частиц на расстояниях более 70 м (\sim радиус Мольера) объясняется повышением вклада мюонной компоненты ливня в общее энерговыделение.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из четырех проверенных вариантов функции пространственного распределения наилучшие результаты для восстановления характеристик ливней на установке НЕВОД-ШАЛ показывает классическая НКГ-функция. Функция с локальным возрастом и модифицированная функция НКГ дают сопоставимую точность восстановления параметров. Использование распределения плотности частиц ливня по функции [9] приводит к меньшей точности восстановления параметров по сравнению с остальными вариантами. Сравнение метода наименьших квадратов и метода максимального правдоподобия показало, что МНК дает лучшую точность при восстановлении положения оси и мощности ШАЛ и в 8–10 раз более быструю скорость работы, но при этом возникают проблемы при реконструкции 0.4% событий.

Средние экспериментальные плотности частиц ливня, полученные на установке НЕВОД-ШАЛ, хорошо согласуются с смоделированными данными CORSIKA (QGSJET-II-04 + FLUKA 2020.0.3).

Исследование выполнено на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-72-10010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. I. Yashin, M. B. Amelchakov, I. I. Astapov, N. S. Barbashina, A. G. Bogdanov, F. A. Bogdanov, V. V. Borog, A. Chiavassa, A. N. Dmitrieva, D. M. Gromushkin, S. S. Khokhlov, V. V. Kindin, R. P. Kokoulin, K. G. Kompaniets, A. Yu. Konovalova, A. A. Kovylyayeva *et al.*, *JINST* **16**, T08014 (2021).
2. M. B. Amelchakov, N. S. Barbashina, A. G. Bogdanov, A. Chiavassa, D. M. Gromushkin, S. S. Khokhlov, V. V. Kindin, R. P. Kokoulin, K. G. Kompaniets, A. Yu. Konovalova, V. V. Ovchinnikov, N. A. Pasyuk, A. A. Petrukhin, I. A. Shulzhenko, V. V. Shutenko, I. I. Yashin *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **1026**, 166184 (2022).
3. K. Greisen, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **10**, 63 (1960).
4. Yu. A. Fomin, N. N. Kalmykov, I. S. Karpikov, G. V. Kulikov, M. Yu. Kuznetsov, G. I. Rubtsov, V. P. Sulakova, and S. V. Troitsky, *JINST* **11**, T08005 (2016).
5. R. D. Monkhoev, N. M. Budnev, D. M. Voronin, A. R. Gafarov, O. A. Gress, T. I. Gress, O. G. Grishin, A. N. Dyachok, S. N. Epimakhov, D. P. Zhurov, A. V. Zagorodnikov, V. L. Zurbanov, A. L. Ivanova, N. N. Kalmykov, Yu. A. Kazarina, S. N. Kiryuhin *et al.*, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **81**, 468 (2017).
6. A. P. Chubenko, A. L. Shepetov, V. P. Antonova, R. U. Beisembayev, A. S. Borisov, O. D. Dalkarov, O. N. Kryakunova, K. M. Mukashev, R. A. Mukhamedshin, R. A. Nam, N. F. Nikolaevsky, V. P. Pavlyuchenko, V. V. Piscal, V. S. Puchkov, V. A. Ryabov, T. Kh. Sadykov *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **832**, 158 (2016).
7. A. Chiavassa, W. D. Apel, J. C. Arteaga-Velázquez, K. Bekk, M. Bertaina, J. Blümer, H. Bozdog, I. M. Brancus, E. Cantoni, F. Cossavella, K. Daumiller, V. de Souza, F. Di Piero, P. Doll, R. Engel, D. Fuhrmann *et al.*, *EPJ Web Conf.* **208**, 03002 (2019).
8. EAS-TOP Collab. (M. Aglietta, B. Alessandro, P. Antonelli, F. Arneodo, L. Bergamasco, M. Bertaina, C. Castagnoli, A. Castellina, A. Chiavassa, G. Cini Castagnoli, B. D’Ettorre Piazzoli, G. Di Sciascio, W. Fulgione, P. Galeotti, P. L. Ghia *et al.*), *Astropart. Phys.* **10**, 1 (1999).
9. R. I. Raikin, A. A. Lagutin, N. Inoue, and A. Misaki, in *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, 2001*, vol. 1, p. 290.
10. K. Kamata and J. Nishimura, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **6**, 93 (1958).
11. A. A. Lagutin, A. V. Pljasheshnikov, and V. V. Uchaikin, in *Proceedings of the 16th International Cosmic Ray Conference, Tokyo, 1979*, Ed. by S. Miyake (Japan, Tokyo, 1979), vol. 7, p. 18.
12. N. N. Kalmykov, G. V. Kulikov, V. P. Sulakov, and Yu. A. Fomin, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **71**, 522 (2007).
13. Yu. A. Fomin, N. N. Kalmykov, V. N. Kalmykov, G. V. Kulikov, V. I. Solovjeva, V. P. Sulakov, and E. A. Vishnevskaya, in *Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference, Tsukuba, 2003*, Ed. by T. Kajita (Japan, IUPAP, 2003), vol. 1, p. 119.
14. Yu. A. Fomin, N. N. Kalmykov, J. Kempa, G. V. Kulikov, and V. P. Sulakov, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **175–176**, 334 (2008).
15. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, Report FZKA6019 (Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1998).
16. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **506**, 250 (2003).
17. SciPy, SciPy Reference Guide, <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/> (2015).
18. A. A. Lagutin, R. I. Raikin, N. Inoue, and A. Misaki, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **28**, 1259 (2002).
19. Н. Н. Калмыков, Г. В. Куликов, В. П. Сулаков, Ю. А. Фомин, *Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 3. Физ. астрон.* **1**, 32 (2007).
20. P. K. F. Grieder, *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical: a Tutorial, Reference Manual and Data Book* (Springer, Berlin, London, 2010), vol. 1.

**LATERAL DISTRIBUTION FUNCTIONS
OF THE ELECTRON-PHOTON COMPONENT OF THE EAS REGISTERED
WITH THE NEVOD-EAS ARRAY**

**E. A. Yuzhakova¹⁾, M. B. Amelchakov¹⁾, A. G. Bogdanov¹⁾, D. M. Gromushkin¹⁾,
A. Yu. Konovalova¹⁾, N. V. Ponomareva¹⁾, S. S. Khokhlov¹⁾, I. A. Shulzhenko¹⁾**

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

A comparison of the accuracy of reconstruction of the shower size and coordinates of the axes of extensive air showers based on the response of the NEVOD-EAS array are presented. The reconstruction is based on various functions of the lateral distribution of particles. A comparison of the lateral distribution of EAS particles according to MC and experimental data is given.