

БЫСТРОЕ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ENDA

К. О. Куринов¹, Д. А. Кулешов¹, И. О. Малий²,

Ю. В. Стенькин^{1,2}, О. Б. Щеголев^{1,2}

В рамках проекта LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) в Кунмэе начала свою работу установка ENDA-64 (Electron Neutron Detector Array), которая предназначена для изучения ШАЛ (Широкий Атмосферный Ливень) с энергиями выше 1 ПэВ, восстановления энергетического спектра и массового состава космических лучей. Прототип кластера установки ENDA был создан на территории ИЯИ РАН в Москве (ENDA-INR). В работе представлено описание созданной программы быстрого моделирования отклика установки, приведено сравнение с результатами, полученными с помощью программы моделирования в Geant4, а также с экспериментальными данными.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, моделирование, Geant4.

Введение. Проект ENDA, ранее именуемый PRISMA, основан на использовании измерений адронной и электронной компоненты ШАЛ для оценки типа и энергии первичной частицы [1, 2]. В установке с помощью электронно-нейтронных детекторов (эндетекторов) регистрируются сигналы от заряженных частиц и тепловых нейтронов, которые генерируются высокоэнергетическими адронами ливня в результате ядерной реакции в веществе вблизи детектора (грунте, зданиях, материалах детектора и воздухе). Сигналы от тепловых нейтронов регистрируются во временном интервале от 100 мкс до 5 мс после прихода фронта ливня, а время интегрирования заряда 1 мкс.

¹ ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а; e-mail: kurinov.ko@gmail.com.

² МФТИ (национальный исследовательский университет), 141701 Россия, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Конструкция эн-детектора является стандартной для сцинтилляционных детекторов ШАЛ, а в качестве сцинтиллятора используется специализированный тонкий (толщина 50 мкг/см^2) сцинтиллятор на основе неорганического сцинтилляционного компаунда $\text{ZnS(Ag)} + \text{B}_2\text{O}_3$ с необогащенным бором. Сцинтиллятор изготовлен путём спекания кристаллов ZnS и B_2O_3 , которые затем помещаются в слой оптически прозрачного силикона.

Установка ENDA-INR [3] (работающий в режиме набора данных с сентября 2021 года) состоит из 16 эн-детекторов, расположенных по квадратной сетке 4×4 с шагом в 5 м на грунте под открытым небом. В настоящее время эн-детекторы применяются для регистрации ШАЛ в эксперименте LHAASO [4] (ENDA) и экспериментальном комплексе НЕВОД [5] (PRISMA [6] и УРАН [7]), а также для анализа вариаций нейтронного фона в геофизических исследованиях [8, 9].

Моделирование эксперимента состоит из двух частей. Первая часть связана с моделированием ШАЛ, для этого используется программа CORSIKA [10] версии 7.7402. Для моделирования электромагнитной компоненты ливня используется программа EGS4, для низких энергий адронных взаимодействий используется модель GHEISHA [11], а для высоких QGSJET-II-04 [12].

Вторая часть связана с моделированием отклика детекторов на прохождение ливня. Для этого использовалась программа моделирования, написанная с помощью пакета Geant4 [13] версии 11.0.3. Недостатком данной программы является её длительное время вычислений. Цель данной работы заключалась в том, чтобы создать программу быстрого Монте-Карло моделирования и максимально приблизить её к результатам программы моделирования из Geant4.

Описание программы моделирования в Geant4. Программа не включает в себя процесс моделирования оптических фотонов и, соответственно, ФЭУ и электроники, т. к. на данном этапе существуют большие неопределенности, связанные с определением оптических свойств используемого в эксперименте сцинтиллятора. Поэтому в программе моделирования рассчитывается только энерговыделение в сцинтилляторе (интегрированное в течение первой мкс после прихода фронта ливня) при прохождении через него заряженных частиц и число зарегистрированных нейтронов, которое определяется условием образования α -частицы и ${}^7\text{Li}$ в аналогичном эксперименту временном интервале.

В модель детектора была заложена упрощенная модель сцинтиллятора, представляющая собой сплошной слой компаунда $\text{ZnS(Ag)} + \text{B}_2\text{O}_3$ (массовое соотношение которых

65% на 35%), диспергированный в слое силикона, пластиковый корпус детектора, грунт и воздух. Сцинтиллятор задан диском с диаметром 69 см и толщиной 0.15 мм, который помещается в слой силикона толщиной 3 мм. Корпус детектора представляет собой полый цилиндр с высотой 70 см и толщиной стенок 8 мм. За материал грунта был взят бетон с плотностью 1.8 г/см^3 , который был задан прямоугольным параллелепипедом с толщиной в 20 метров. В качестве списка физических моделей взаимодействия частиц использовался набор QGSP_BIC_HP.

В выходной файл записывается энерговыделение и число зарегистрированных нейтронов в каждом из детекторов, а также дополнительная информация о событии ШАЛ, аналогичная экспериментальному формату данных за исключением дополнительной информации о направлении прихода ливня, типе и энергии первичной частицы.

Моделирование отклика эн-детектора на различные частицы в Geant4. Энерговыделение в программе быстрого моделирования разыгрывается на основе распределений по энерговыделению и функций плотности вероятности, которые были получены в программе полного моделирования. Для этого было проведено моделирование отклика эн-детектора на все типы вторичных частиц ШАЛ при различных фиксированных энергиях (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Тип и энергия разыгранных частиц

Тип частицы	Фиксированная энергия, МэВ
γ	$5 \cdot 10^{-2}, 10^{-1}, 3 \cdot 10^{-1}, 5 \cdot 10^{-1}, 1, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 10^2, 3 \cdot 10^2, 10^3, 10^4$
e^{\pm}	$1, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 10^2, 3 \cdot 10^2, 10^3, 10^4$
μ^{\pm}	$10, 30, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5$
h (кроме π^0)	$50, 10^2, 3 \cdot 10^2, 5 \cdot 10^2, 10^3, 3 \cdot 10^3, 10^4, 10^5$

По полученным выборкам были найдены зависимости эффективности одиночной частицы дать отклик детектора от её энергии (рис. 1). Под откликом детектора в данном случае понимается любое ненулевое энерговыделение в сцинтилляторе.

Из-за того, что сцинтиллятор тонкий, одиночные гамма-кванты почти не взаимодействуют с сцинтиллятором и их эффективность дать энерговыделение в детекторе находится на уровне нескольких процентов. Электроны с энергией ниже 3 МэВ в подавляющем большинстве не долетают до сцинтиллятора и теряют всю свою энергию в

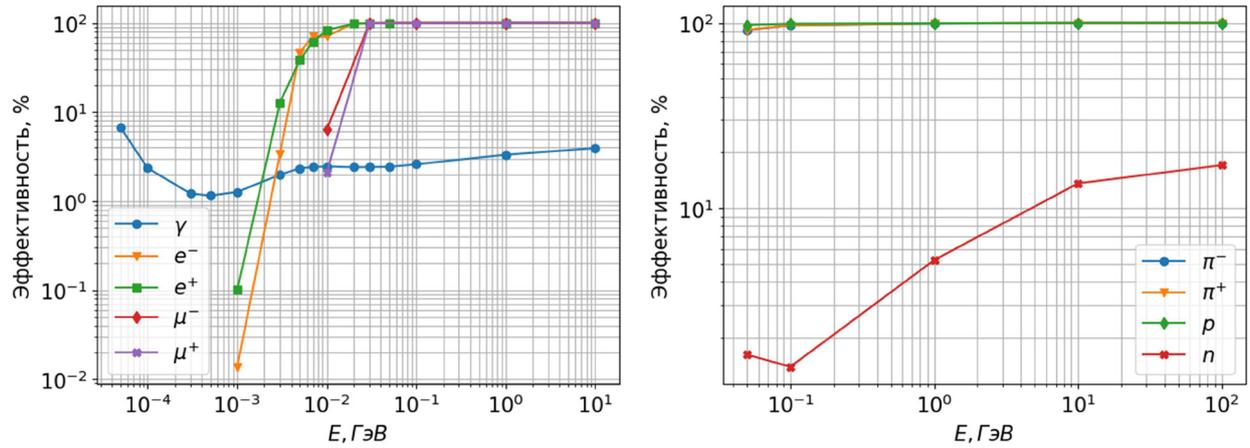


Рис. 1: Эффективность γ , e^\pm , μ^\pm (слева) и p , n , π^\pm (справа) дать отклик в эн-детекторе в зависимости от энергии частицы.

пластиковой бочке. Заряженные адроны и мюоны при энергии 30 МэВ и выше почти всегда дают отклик детектора.

Помимо этого, в программе быстрого Монте-Карло была учтена вероятность того, что частицы, не попавшие в детектор, все равно могут внести вклад в энерговыделение в детекторе. Это происходит за счет тормозного излучения для заряженных частиц и из-за рождения электрон-позитронных пар для гамма-квантов.

Для сэмплирования полученных распределений по энерговыделению в детекторе в программе быстрого моделирования использовался метод Неймана (выборка с отклонением) и взвешенная линейная интерполяция для распределений [14].

Моделирование числа зарегистрированных нейтронов. Нейтроны, регистрируемые эн-детекторами, рождаются в адрон-ядерных и фотоядерных взаимодействиях. Их число зависит от энергии налетающего адрона или гамма-кванта, а также от расстояния до центра детектора. Для получения первой зависимости были смоделированы выборки, в которых адроны и гамма-кванты различных энергий бросались в центр эн-детектора, затем были оценены средние значения числа зарегистрированных нейтронов на 1 брошенную частицу и получена степенная аппроксимация вида $\bar{n} \sim E^\alpha$ (рис. 2 слева), где $\alpha = 0.53 \pm 0.04$ для протонов и $\alpha = 0.54 \pm 0.02$ для гамма-квантов. Полученные зависимости хорошо согласуются с результатами, полученными на нейтронном мониторе, где средняя кратность регистрируемых испарительных нейтронов от протонов космических лучей была $\sim E^{0.56}$ для $5 < E \leq 1000$ ГэВ [15].

Для получения функции пространственного распределения (ФПР) зарегистрированных нейтронов относительно “родительских” адронов были смоделированы выборки, в которых высокоэнергичные протоны бросались на разных расстояниях от центра детектора с шагом в 1 метр. Для оценки влияния погодных условий на число зарегистрированных нейтронов была взята модель сухого грунта и грунта с 10% влажностью (рис. 2 справа).

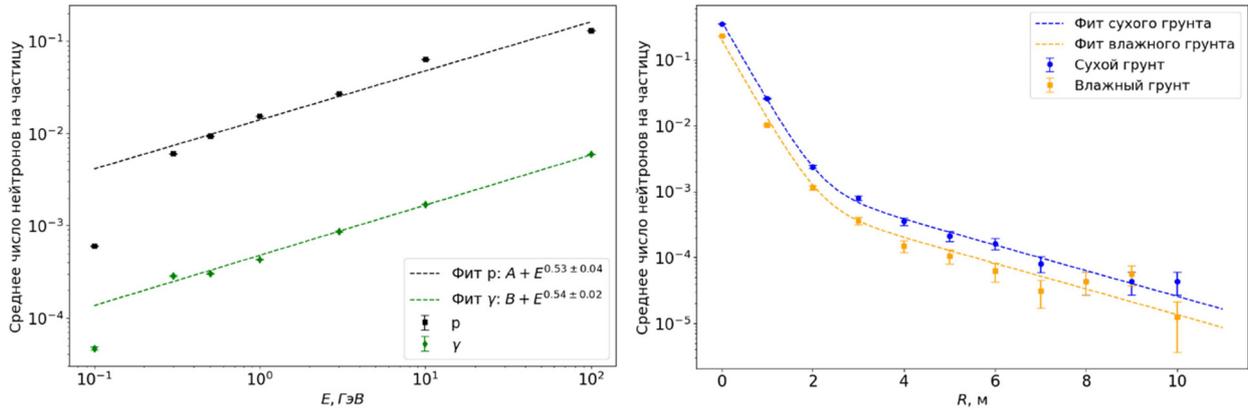


Рис. 2: Зависимость среднего числа зарегистрированных нейтронов в зависимости от энергии налетающей частицы для протона и гамма-кванта (слева) и зависимость среднего числа зарегистрированных нейтронов на 1 протон в зависимости от расстояния от места ядерной реакции до детектора (справа).

Как видно из левого рисунка число зарегистрированных нейтронов на 1 брошенную частицу почти на два порядка меньше для гамма-квантов чем для протонов, а энергии в 100 МэВ не хватает для рождения нейтронов в грунте. Отсюда следует, что массовое рождение нейтронов на уровне наблюдения начинается тогда, когда высокоэнергичные адроны ШАЛ достигают этого уровня.

Вид ФПР из правого рисунка можно описать двумя экспонентами следующего вида:

$$f(R) = A \times e^{-\frac{R}{r_1}} + B \times e^{-\frac{R}{r_2}},$$

где $r_1 = 0.36$ м и $r_2 = 2.65$ м.

Первый параметр связан с площадью детектора, а второй связан с нейтронами, которые родились в грунте и пришли с больших расстояний через диффузию в воздухе. Среднее число зарегистрированных нейтронов в 1.67 раз выше для сухого грунта.

Сравнение программы полного и быстрого моделирования. Сравнение программ моделирования проводилось на основе рассчитанных откликов установки на прохождения

ШАЛ. В качестве конфигурации установки использовалась конфигурация установки ENDA-INR. На первом этапе с помощью программы CORSIKA были смоделированы выборки при фиксированных энергиях первичной частицы (1, 3 и 10 ПэВ), в качестве первичной частицы был взят протон, зенитный угол был равен 0° . Ось ливня бросалась в одно и то же место около одного из центральных детекторов. Затем было проведено сравнение числа зарегистрированных частиц в обеих программах моделирования, путем деления суммарного энерговыделения на среднее энерговыделение от прохождения электронов ШАЛ через сцинтиллятор, которое равно 70.9 кэВ. На рис. 3 представлены распределения по числу частиц в четырех детекторах, расположенных на разном расстоянии от оси ШАЛ для энергии первичной частицы в 1 ПэВ, вертикальными линиями обозначены средние значения соответствующих распределений.

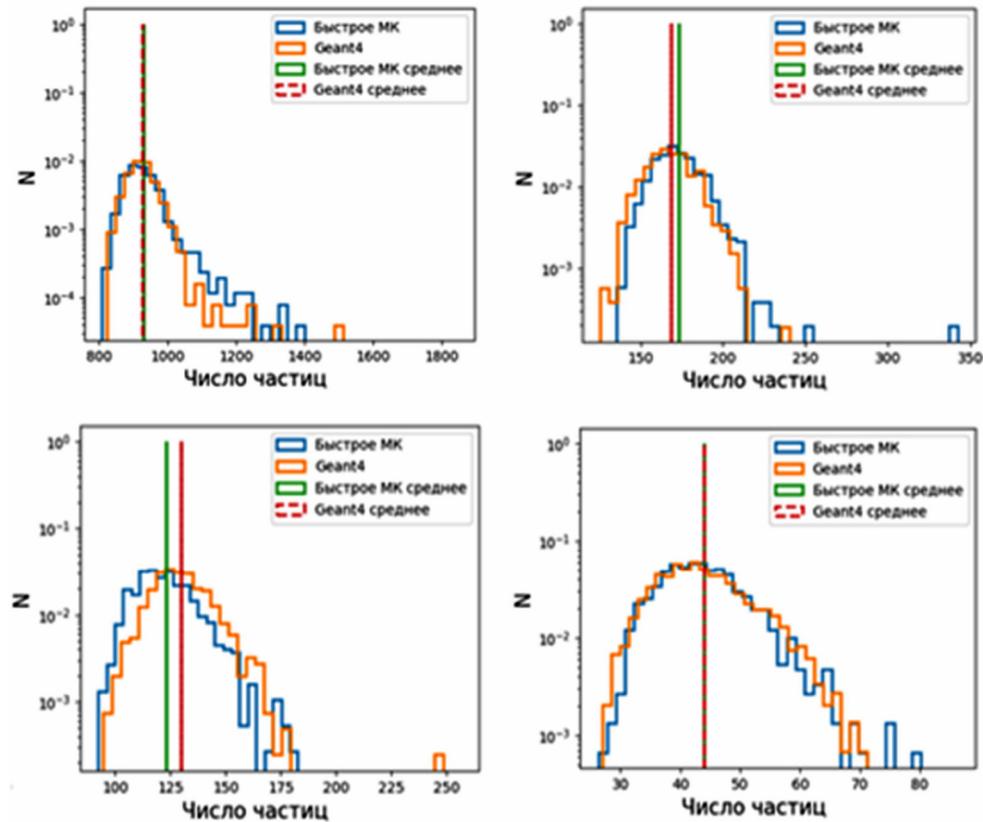


Рис. 3: Распределения по числу частиц в эн-детекторах для программы быстрого моделирования (синий цвет) и полного моделирования (оранжевый цвет).

Как видно из рис. 4 обе программы дали очень близкие результаты, а относительная разница среднего числа частиц не превышала 5%. Для проверки корректности розыг-

рыша числа зарегистрированных нейтронов сравнивались распределения суммарного числа нейтронов в событии в обеих программах моделирования (рис. 4).

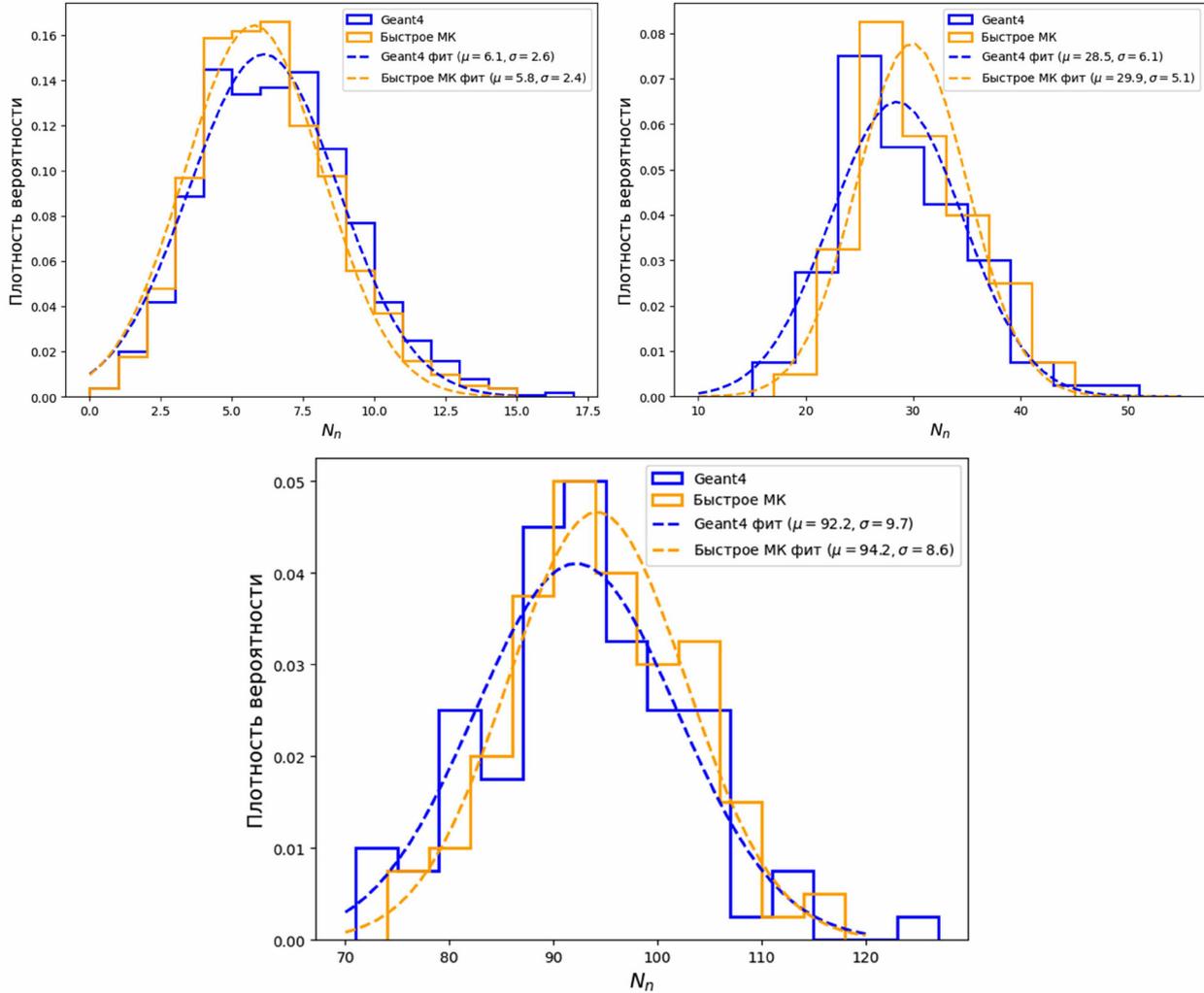


Рис. 4: Распределения по числу зарегистрированных нейтронов для программы быстрого моделирования (оранжевый цвет) и полного моделирования (синий цвет) для $E_0 = 1$ ПэВ (слева сверху), $E_0 = 3$ ПэВ (справа сверху) и для $E_0 = 10$ ПэВ (снизу).

Распределения из рисунков выше аппроксимировались нормальным распределением, в результате относительная ошибка среднего значения оказалась на 5.2% ниже при энергии 1 ПэВ, на 4.7% при 3 ПэВ и на 2.1% выше при 10 ПэВ для программы быстрого Монте-Карло.

Сравнение с экспериментальными результатами. Для сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными с помощью программы быстрого Монте-

Карло была смоделирована выборка для протонов и ядер железа в энергетическом диапазоне от 10^{15} до 10^{17} эВ без процедуры прореживания с показателем дифференциального спектра -2.7 , зенитный угол был в диапазоне от 0 до 45 градусов в предположении изотропности распределения направления прихода по небесной сфере. Уровень наблюдения 170 м относительно уровня моря. Общий размер выборки составил около 50 000 событий.

В качестве экспериментальных данных была взята информация с установки ENDA-INR за промежуток времени с 01.09.23 по 05.02.25, в течение которого конфигурация установки была неизменна. Отбор событий в данных моделирования и эксперимента был идентичный, отбирались события, в которых сработали минимум 10 детекторов с порогом в 12 каналов АЦП (~ 18 частиц). Нормировка каналов АЦП в число частиц проводилась из сравнения показаний эн-детекторов установки ENDA и пластических детекторов KM2A-ED эксперимента LHAASO в совместных событиях.

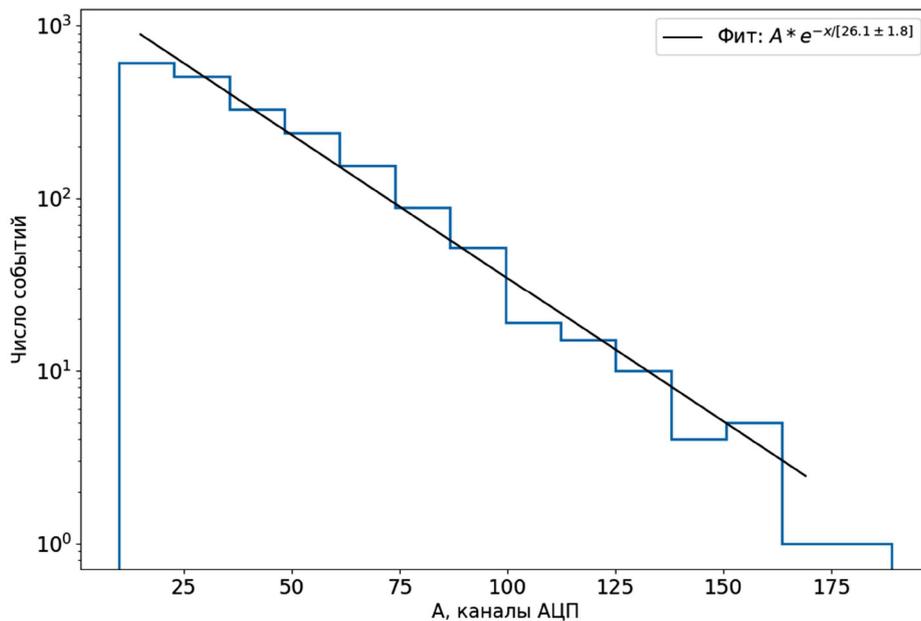


Рис. 5: Амплитудное распределение тепловых нейтронов.

В моделировании эффективность регистрации нейтронов определяется вероятностью захвата теплового нейтрона в сцинтилляторе ($eff_{сцин}$) и оценивается величиной $\approx 19\%$, что подтверждается экспериментальными измерениями [17]. В нашем же эксперименте эффективность регистрации нейтронов меньше из-за установленного порога по амплитуде импульса ($eff_{порог}$) (5 мВ или 10 каналов АЦП) и из-за алгоритма

выделения сигналов от тепловых нейтронов ($eff_{отбор}$) (из-за чего теряется $1 \div 2\%$ нейтронных импульсов) [16]. Эффективность с учетом порога по амплитуде можно оценить с помощью амплитудного распределения нейтронных импульсов (рис. 5), предполагая, что распределение описывается экспонентой вплоть до нуля по формуле: $eff_{порог} = e^{-(\xi/\beta)} = e^{-(10/26.1)} \approx 0.68$, где ξ – порог по амплитуде, β – показатель экспоненты, полученный в результате фита.

Итоговая эффективность регистрации нейтронов равна $eff = eff_{сцин} \times eff_{порог} \times eff_{отбор} = 0.19 \times 0.68 \times 0.98 \approx 12.7\%$. При сравнении экспериментальных результатов с результатами моделирования на это делалась поправка. Из данных эксперимента также был вычтен фон тепловых нейтронов, который оценивается в эксперименте по специальному программному триггеру и составляет 0.47 нейтронов на событие. На рис. 6 показана зависимость среднего числа зарегистрированных нейтронов от суммарного числа зарегистрированных частиц в событии ШАЛ.

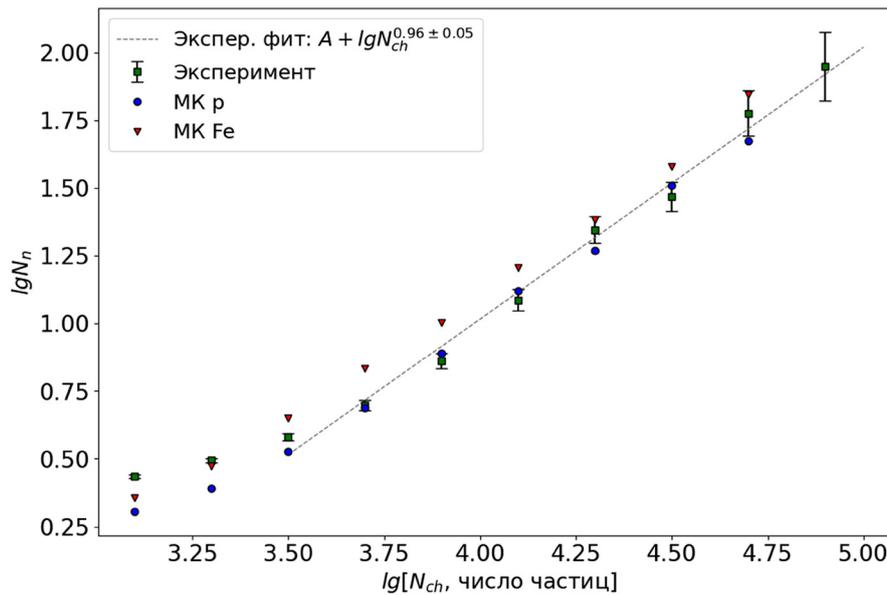


Рис. 6: Зависимость среднего числа зарегистрированных нейтронов от суммарного числа зарегистрированных частиц в событии.

Полученная зависимость имеет нелинейную и линейную область, где первая связана с отсутствием высокоэнергичных адронов. Линейная область описывается степенным законом $lgN_n \sim lgN_{ch}^\alpha$ с $\alpha = 0.96 \pm 0.05$, где N_n – число нейтронов, N_{ch} – зарегистрированное число частиц, фит проводился от 3.5 до 5 по логарифму суммарного числа частиц. Полученный показатель степени находится в хорошем согласии с данными мо-

делирования, где для протонов $\alpha = 0.90 \pm 0.05$, а для ядер железа $\alpha = 0.94 \pm 0.07$, а также с экспериментальным результатом, свидетельствующим о пропорциональности плотности адронной компоненты и плотности потока заряженных частиц [18].

Заключение. Была создана программа быстрого моделирования отклика установки ENDA на прохождение ШАЛ. Программа показала хорошее согласие с результатами полного моделирования, а также данными эксперимента. Время вычисления оказалось меньше в ~ 2000 раз. Данная программа в дальнейшем будет использоваться для моделирования большого набора откликов по событиям ШАЛ, которые, в свою очередь, будут использоваться для проверки работы алгоритмов реконструкции энергии первичной частицы и её типа.

Данная работа была поддержана грантом РФФ, № 23-72-01086.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Yu. V. Stenkin, On the PRISMA Project. Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **196**, 293 (2009). DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2009.09.056.
- [2] Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, Данженглуобу и др., Известия Российской Академии Наук. Серия физическая **85**, 4 (2021). DOI: 10.31857/S0367676521040360.
- [3] O. V. Shchegolev, V. V. Alekseenko, D. A. Kuleshov, et al., J. Phys. Conf. Ser. **1690**(1), 012011 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1690/1/012011.
- [4] H. He (on behalf of LHAASO collaboration), Radiat. Detect. Technol. Methods **2**, 7 (2018). DOI: 10.1007/s41605-018-0037-3.
- [5] I. I. Yashin, M. V. Amelchakov, I. I. Astapov, et al., J. Instrum. **16**(08), T08014 (2021). DOI: 10.1088/1748-0221/16/08/T08014.
- [6] Д. М. Громушкин, Ф. А. Богданов, Ю. В. Стенькин и др., Физика элементарных частиц и атомного ядра **49**, 4 (2018). DOI: 10.1134/S1063779618040275.
- [7] Д. М. Громушкин, И. И. Астапов, Н. С. Барбашина и др., Известия Российской Академии Наук. Серия физическая **81**, 4 (2017). DOI: 10.7868/S0367676517040202.
- [8] Д. М. Громушкин, В. В. Алексеенко, А. А. Петрухин и др., Известия Российской Академии Наук. Серия физическая **73**, 425 (2009). DOI: 10.3103/S1062873809030381.
- [9] Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, А. С. Багрова и др., Известия Российской Академии Наук. Серия физическая **81**, 179 (2017). DOI: 10.7868/S0367676517020405.

- [10] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, et al., A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Report FZKA, Forschungszentrum Karlsruhe, **6019**(11) (1998). www.iap.kit.edu/corsika/.
- [11] H. Fesefeldt, RWTH Aachen **647**, 27 (1985).
- [12] N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, A. I. Pavlov, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **52**(17), 17 (1997). DOI: 10.1016/S0920-5632(96)00846-8.
- [13] S. Agostinelli (on behalf of Geant4 collaboration), Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **506**(3), 250 (2003). DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- [14] D. Leśniak, I. Sieradzki, I. Podolak, Distribution-interpolation trade off in generative models. 7th International Conference on Learning Representations, ICLR 2019, New Orleans, LA, USA, May 6-9, openreview.net, (2019).
- [15] M. Nieminen, J. J. Torsti, E. Valtonen, Phys. Rev. D **26**(5), 1036 (1982). DOI: 10.1103/PhysRevD.26.1036.
- [16] K. O. Kurinov, D. A. Kuleshov, A. A. Lagutkina, et al., J. Exp. Theor. Phys. **136**(4), 465 (2023). DOI: 10.1134/S1063776123040039.
- [17] Yu. V. Stenkin, *Large scintillator detector for thermal neutron recording. Nuclear Track Detectors Design, Methods and Applications*. M. Sidorov and O. Ivanov eds. (Nova Science Publishers, Inc.), chapter 10, p. 253-256 (2010).
- [18] Н. А. Добротин, Г. Т. Зацепин, И. Л. Розенталь и др., Успехи физических наук **49**(2), 185 (1953).

Поступила в редакцию 26 апреля 2025 г.

После доработки 4 августа 2025 г.

Принята к публикации 5 августа 2025 г.