

ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ШАЛ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ENDA-INR

© 2026 г. К. О. Куринов^{a, *}, Д. А. Кулешов^a, И. О. Малий^b,
Ю. В. Стенькин^{a, b}, В. И. Степанов^a, О. Б. Щеголев^{a, b}

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bМосковский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

*E-mail: kyrinov.ko@gmail.com

Поступила в редакцию 14.07.2025 г.

После доработки 18.07.2025 г.

Принята к публикации 29.07.2025 г.

ENDA-INR является прототипом кластера установки ENDA (Electron Neutron Detector Array) и располагается на территории ИЯИ РАН в Москве. Целью прототипа является исследование ШАЛ (широкий атмосферный ливень) с энергий выше 1 ПэВ, тестирование методов регистрации и обработки сигналов. В статье представлено описание процесса временной калибровки детекторов и оптимизации углового разрешения, а также приведены предварительные экспериментальные результаты.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, эн-детектор

DOI: 10.56304/S2079562926010215

1. ВВЕДЕНИЕ

Проект ENDA, ранее именуемый PRISMA, основан на использовании измерений адронной и электронной компоненты ШАЛ для оценки энергии первичной частицы и ее атомного номера [1, 2]. Установка ENDA-INR [3] (работающая в режиме набора данных с сентября 2021 г.) состоит из 16 электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторов), расположенных по квадратной сетке 4×4 с шагом в 5 м под открытым небом.

В установке с помощью эн-детекторов 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). Конструкция эн-детектора является стандартной для сцинтилляционных детекторов ШАЛ, а в качестве сцинтиллятора используется специализированный тонкий (толщина 50 мг/см^2) сцинтиллятор на основе неорганического сцинтилляционного компаунда $\text{ZnS(Ag)} + \text{B}_2\text{O}_3$ с небогащенным бором.

В экспериментальных данных направление прихода ШАЛ определяется из осциллограмм событий, которые записываются в случае большого суммарного энерговыделения или большого числа зарегистрированных нейтронов $N_n > 4$. Временем срабатывания эн-детектора считается мо-

мент пересечения сигналом уровня, равного половине его амплитуды. Порог по амплитуде был равен 12 каналам АЦП (8 частиц). Нормировка каналов АЦП в число частиц проводилась из сравнения показаний эн-детекторов установки ENDA и пластических детекторов KM2A-ED эксперимента LHAASO [4] в совместных событиях.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ УСТАНОВКИ

Направление прихода ливня, задаваемое с помощью зенитного и азимутального угла (θ , ϕ) определяется по относительным временам срабатывания детекторов с помощью аппроксимации фронта ШАЛ. Из-за малых размеров установки использовалось приближение плоского фронта ливня.

Вторичные частицы ливня с большими временными задержками относительно времени прихода ливня могут привести к большим ошибкам при восстановлении направления прихода, поэтому в качестве алгоритма оптимизации был выбран метод наименьших квадратов с итеративным перевзвешиванием (IRLS, Iteratively Reweighted Least Squares) [5], который является более устойчивым к выбросам в данных алгоритмом. Для сравнения результатов в качестве базисного алгоритма для реконструкции был использован Метод Наименьших Квадратов (МНК).

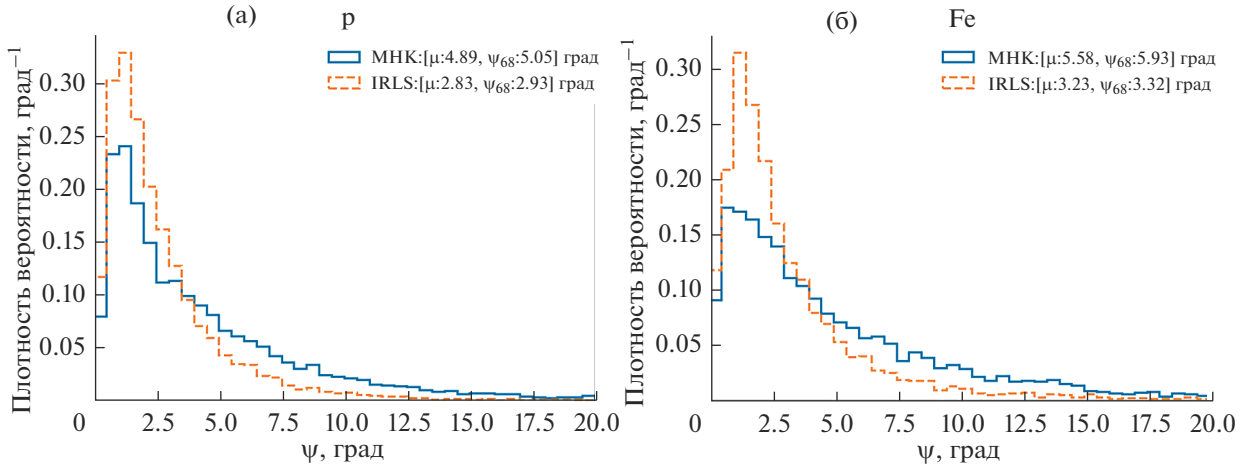


Рис. 1. Распределение по ψ для МНК (синяя кривая) и IRLS (оранжевая кривая) для протона (а) и железа (б).

На каждом шаге в методе IRLS происходит решение взвешенной линейной задачи наименьших квадратов (1):

$$\begin{aligned} \beta^{(k+1)} &= \operatorname{argmin}_{\beta} \sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} \omega_i^{(k)} |y_i - X_i \beta|^2 = \\ &= (X^T W^{(k)} X)^{-1} X^T W^{(k)} y, \end{aligned} \quad (1)$$

где β — матрица оптимизируемых коэффициентов $[\sin\theta\cos\theta \ \sin\theta\sin\theta \ \cos\theta]$, k — шаг алгоритма (в МНК $k=0$), N_{det} — число сработавших детекторов, X — матрица с координатами детекторов, y — матрица с временными задержками (ct_i), c — скорость света (0.2998 м/нс), $W^{(k)}$ — диагональная матрица весов (единичная матрица в МНК) с элементами $\omega_i^{(k)}$, задаваемых по (2):

$$\omega_i^{(k)} = \frac{1}{\max\{\delta, |y_i - X_i \beta^{(k)}|\}}, \quad (2)$$

где $\delta = 10^{-5}$.

Окончание итерационного процесса достигается при выполнении условия:

$$\beta^{(k+1)} - \beta^k \leq \epsilon,$$

где за ϵ было принято значение равное 10^{-5} .

Для оценки точности реконструкции алгоритмов использовалась выборка искусственных событий ШАЛ, которая была получена с помощью программы CORSIKA [6] версии 77402 и программы, моделирующей отклик установки на прохождение ливня.

В качестве первичных частиц были взяты протон и железо, а их энергия разыгрывалась по степенному закону с показателем дифференциального спектра $\gamma = -2.7$ в диапазоне от 1 до 100 ПэВ.

Зенитный угол разыгрывался в диапазоне от 0° до 45° в предположении изотропности распределения направления прихода по небесной сфере. Ось ливня равномерно разыгрывалась в границах установки, общее число событий после отбора составило около тринадцати тысяч событий для протона и около четырех тысяч для железа. В моделировании и в эксперименте отбирались события, в которых сработали минимум восемь эн-детекторов.

В моделировании за время срабатывания эн-детектора принимается момент времени, при котором суммарное число зарегистрированных частиц превысило значение порога срабатывания детектора (восемь частиц).

За угловое разрешение установки принималась квантиль 68% распределения угла отклонения ψ восстановленного вектора прихода от истинного (рис. 1).

$$\psi = \arccos\left(\frac{A_i B_i}{|A||B|}\right),$$

где A — восстановленный вектор прихода ШАЛ, а B — истинный вектор прихода ливня.

Из рис. 1 видно, что качество восстановления направления прихода ШАЛ лучше у алгоритма наименьших квадратов с итеративным перевзвешиванием, угловое разрешение равно 2.93° для протона и 3.32° для ядра железа, у метода наименьших квадратов 5.05° и 5.93° соответственно. В событиях с $N_n > 4$, для алгоритма IRLS, угловое разрешение для протонной выборки составило 1.36° , а для выборки железа 1.27° . Количество восстановленных событий для метода IRLS также оказалось больше, чем для МНК, на 0.4% для выборки с протоном и на $\sim 1\%$ для выборки с железом.

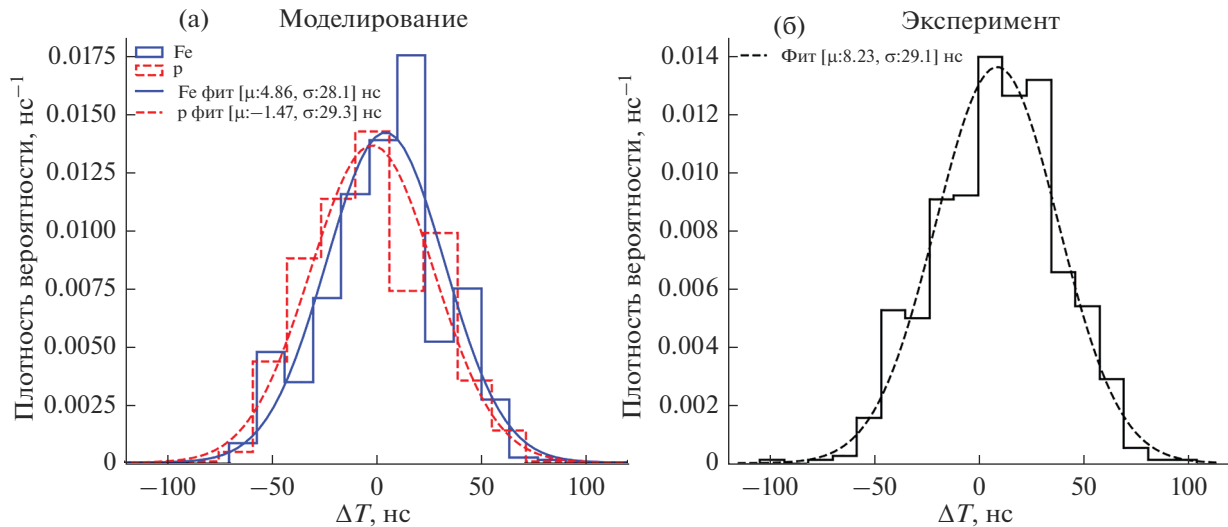


Рис. 2. Распределение по ΔT в моделировании (а) и эксперименте (б).

3. ВРЕМЕННАЯ КАЛИБРОВКА УСТАНОВКИ

В качестве меры временного разрешения установки использовалась величина среднеквадратичного отклонения распределения “разности разностей” $\Delta T = (t_1 - t_2) - (t_3 - t_4)$, что представляет из себя линейную комбинацию относительных времен срабатывания четырех детекторов, находящихся в углах установки [7].

Из-за осевой симметрии установки и изотропного направления прихода ШАЛ по азимутальному углу распределение по ΔT представляет из себя симметричное распределение. На рис. 2 представлены распределения по ΔT , полученное из результатов моделирования (для протона и ядер железа) и эксперимента.

Полученные распределения фитировались нормальным распределением, после чего были оценены значения среднего (μ) и среднеквадратичного отклонения (σ). По данным моделирования $\sigma = 29.3$ нс для протона и $\sigma = 28.1$ нс для железа, по данным эксперимента $\sigma = 29.1$ нс. Исходя из того, что измеряемая величина ΔT складывается из четырех независимых случайных величин, то оценка временного разрешения одного детектора будет ~ 14.4 нс.

Из-за того, что временное разрешение тесно связано с угловым, а экспериментальные и расчетные оценки временного разрешения оказались очень близкими, можно сделать вывод о близости реального значения углового разрешения установки к оценке, полученной в разд. 2.

Значительное отклонение среднего значения от нуля для экспериментального распределения, объясняется наличием неучтенных задержек, связанных с задержками срабатывания ФЭУ, временем распространения сигнала по кабелям и вре-

менем обработки сигналов измерительными каналами регистрирующей электроники. Учет данных задержек необходим для корректной реконструкции направления прихода ливня.

Для их определения были вычислены и построены распределения по разности времен срабатывания между каждой парой детекторов. Исходя из уже упомянутого предположения об изотропии азимутального угла прихода ШАЛ, полученные распределения должны быть симметричны. Смещения их средних значений относительно нуля имеют систематический характер, определяя искомые временные задержки между детекторами.

На рис. 3 приведены распределения разности времен срабатывания первого эн-детектора относительно второго и третьего.

Полученные временные задержки между детекторами были в дальнейшем учтены при обработке экспериментальных данных.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обработки были взяты данные за промежуток времени с 20.09.2023 по 05.02.2025, в течение которого конфигурация установки была неизменна. После удаления периодов нестабильной работы установки и шумовых событий, 715 событий было отобрано. На рис. 4 представлено реконструированное распределение косинуса зенитного и азимутального угла.

Распределение по косинусу зенитного угла описывается степенным законом $\sim \cos^\alpha \theta$, где $\alpha = 8.60 \pm 0.54$, что находится в хорошем согласии с ожидаемым значением $\sim 8.5-9.0$ для уровня моря [8]. Распределение по азимутальному же углу близко к равномерному.

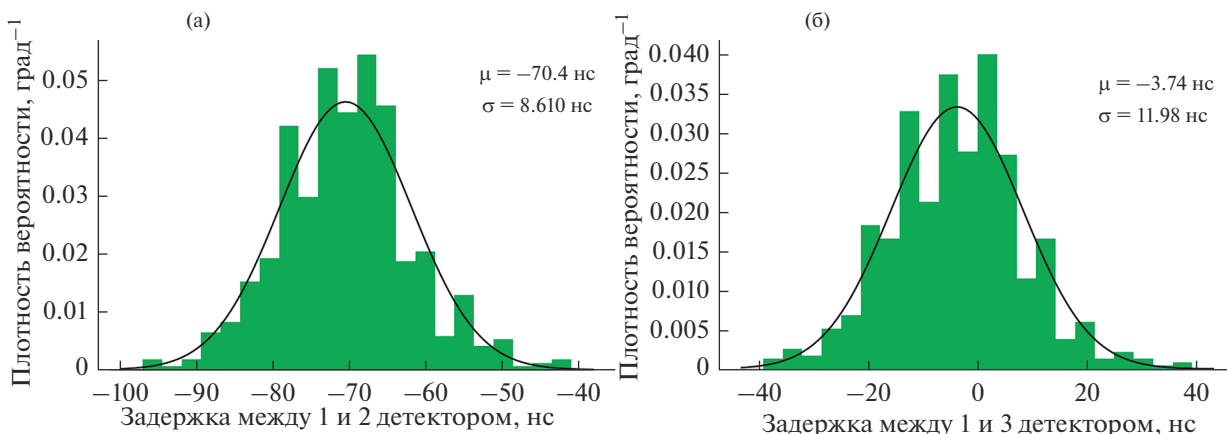


Рис. 3. Распределения разности времен срабатывания 1 эн-детектора относительно 2 (а) и 3 (б).

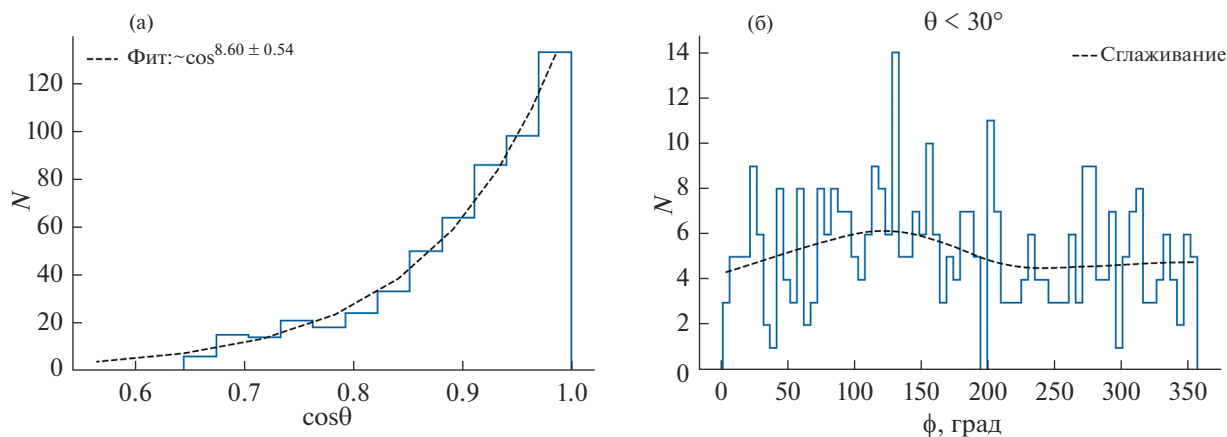


Рис. 4. Распределения по косинусу реконструированного зенитного угла (а) и азимутальному углу (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была проведена временная калибровка эн-детекторов и получена оценка временного разрешения установки. За счет применения алгоритма IRLS удалось улучшить угловое разрешение в ~ 1.75 раза по сравнению с базисным МНК. Итоговая оценка углового разрешения установки составляет $\sim 3.1^\circ$. Реконструированное по экспериментальным данным распределение по косинусу зенитного угла находится в хорошем согласии с результатами других установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Stenkin Yu.V. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2009. V. 196. P. 293–296. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2009.09.056>
2. Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Danzengluobu, et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85 (4). P. 405–407. <https://doi.org/10.3103/S1062873821040353>
3. Shchegolev O.B., Alekseenko V.V., Kuleshov D.A., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1690. P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012011>
4. He H. (LHAASO Collab.) // Radiat. Detect. Technol. Methods. 2018. V. 2. P. 7. <https://doi.org/10.1007/s41605-018-0037-3>
5. Holland P.W. // Comm. Statist. Theory Methods. 1997. V. 6 (9). P. 813–827. <https://doi.org/10.1080/03610927708827533>
6. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., et al. // Report FZKA (Forschungszentrum Karlsruhe). No. 6019. 1998. <https://www.iap.kit.edu/corsika/>.
7. Алексеенко В.В., Бакастанов В.Н., Джанпуев Д.Д. и др. // Установка “Ковер”: оценка углового разрешения с использованием детектора черенковского излучения. Препринт ИЯИ-1109/2003. 2003. Москва: ИЯИ.
8. Grieder P.K.F. // Extensive Air Showers. High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects — A Tutorial, Reference Manual and Data Book. 2010. Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76941-5>

Extensive Air Showers Arrival Direction Reconstruction in the ENDA-INR Experiment

**K. O. Kurinov^{1, *}, D. A. Kuleshov¹, I. O. Maliy²,
Yu. V. Stenkin^{1, 2}, V. I. Stepanov¹, and O. B. Shchegolev^{1, 2}**

¹*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudniy, Moscow oblast, 141701 Russia*

**e-mail: kyrinov.ko@gmail.com*

Received July 14, 2025; revised July 18, 2025; accepted July 29, 2025

Abstract—ENDA-INR is a prototype of the ENDA (Electron Neutron Detector Array) cluster, located on the territory of INR RAS in Moscow. Used to study EAS (Extensive Air Showers) for energy above 1 PeV, testing registration and signal processing methods. Paper provides information about detectors time calibration and optimization of array angular resolution and some preliminary results obtained from experiment.

Keywords: cosmic rays, extensive air showers, en-detector