

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 524.1

## ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЧТ НА ТОЧНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

© 2026 г. П. А. Волчугов<sup>а</sup>, \*, А. П. Крюков<sup>а</sup>, Е. О. Гресь<sup>б</sup>, А. П. Демичев<sup>а</sup>, Ю. Ю. Дубенская<sup>а</sup>, Д. П. Журов<sup>б</sup>, С. П. Поляков<sup>с</sup>, Е. Б. Постников<sup>а</sup>, А. Ю. Разумов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003 Россия

<sup>с</sup>Институт проблем информатики и автоматизации, Национальная академия наук Республики Армения, Ереван, 0014 Республика Армения

\*E-mail: pvol4@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.07.2025 г.

После доработки 25.07.2025 г.

Принята к публикации 04.08.2025 г.

В данной работе исследуется влияние методов предварительной обработки данных на точность восстановления параметров событий, регистрируемых атмосферными черенковскими телескопами (АЧТ). Описана процедура моделирования регистрируемых телескопами событий с учетом свечения ночного неба и шума электроники камеры. Сравниваются два алгоритма очистки изображений для подавления шума и их эффективность.

**Ключевые слова:** АЧТ, широкие атмосферные ливни, Монте-Карло моделирование, нейронные сети, подготовка обучающей выборки

**DOI:** 10.56304/S2079562926010483

### ВВЕДЕНИЕ

Монте-Карло (МК) моделирование в физике высоких энергий является важной частью исследований. Моделирование используется как для оценки возможностей эксперимента, так и для настройки процедур извлечения полезного сигнала. В частности, ключевую роль МК моделирование играет в подготовке обучающих выборок для решения задач физики космических лучей методами машинного обучения [1–3]. Помимо детального моделирования самого детектора и исследуемого физического явления важно также учитывать фон. Различные фоновые компоненты присутствуют при регистрации полезного сигнала и способны вносить искажения.

При наземной регистрации высокоэнергетичных космических частиц атмосфера Земли выступает в роли огромного калориметра, в котором первичная частица теряет энергию, в результате взаимодействия с ядрами атмосферы. Энергия первичной частицы расходуется на лавинообразное рождение вторичных частиц и излучения, распространяющихся преимущественно в направлении движения первичной частицы. Этот процесс называется широким атмосферным ливнем (ШАЛ). Одним из видов излучения, сопровождающего

развитие ШАЛ в атмосфере, является черенковское излучение, регистрация которого позволяет восстановить информацию о первичной высокоэнергетичной частице. Однако, помимо черенковского излучения АЧТ регистрирует значительное количество оптических фотонов ночного неба. Кроме того, зарегистрированное событие содержит шумы электроники камеры. Наличие по меньшей мере этих двух компонент шума требует предварительной очистки изображений. В данной работе изучается влияние методов подавления шума на точность определения параметров ШАЛ в изображениях, регистрируемых АЧТ. В качестве исследуемых методов очистки изображений используются традиционный двухпороговый TCC (Tail-Cut Cleaning) и DIOS (Denoising Image of Shower) алгоритм, предложенный в [4].

### 1. АТМОСФЕРНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП

АЧТ исторически имеют сравнительно узкое поле зрения (обычно  $\sim 3\text{--}5^\circ$ ), что прежде всего обусловлено требованием многоканальной камеры с мелкими пикселями и особенностями оптической схемы Дэвиса–Коттона. По этой причине

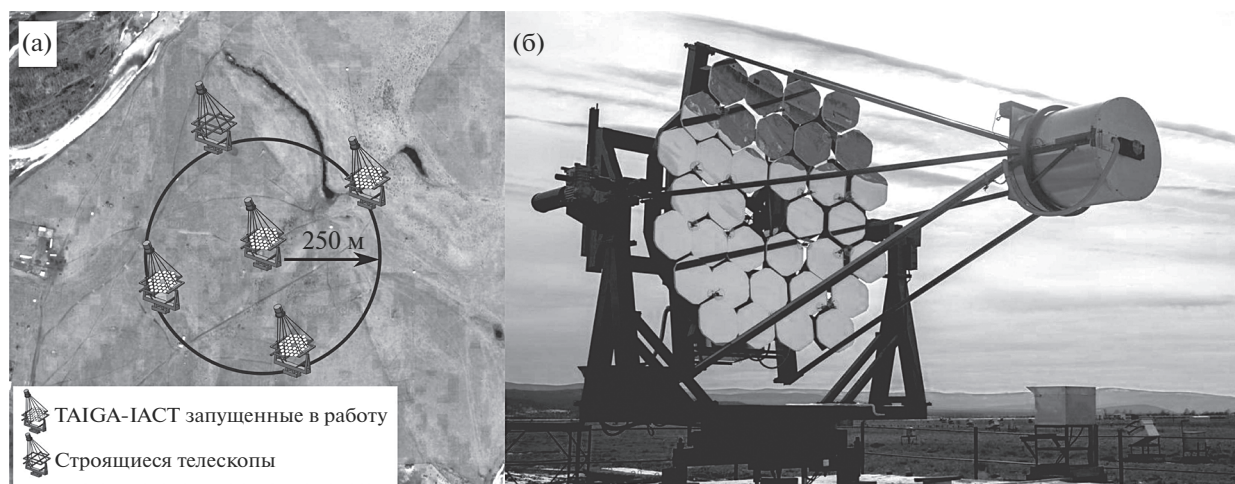


Рис. 1. (а) Взаимное расположение телескопов; (б) изображение телескопа установки TAIGA-IACT.

большинство АЧТ оборудованы поворотным механизмом, обеспечивающим непрерывное слежение за источником гамма-излучения, тем самым увеличивая время его наблюдения.

Таким образом, типичный АЧТ представляет собой систему, состоящую из сферического зеркала на поворотной платформе, с регистрирующей камерой в фокусе. В качестве пикселей регистрирующей камеры используется матрица фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). При регистрации ливня, черенковское излучение ШАЛ попадает на зеркало и затем фокусируется в фокальной плоскости, где свет детектируется ФЭУ, формируя изображение углового распределения черенковских фотонов. В настоящей работе мы использовали данные установки TAIGA-IACT, которая является частью астрофизического комплекса TAIGA [5, 6] и позволяет регистрировать гамма-кванты с энергиями выше нескольких тераэлектронвольт.

## 2. TAIGA-IACT

В настоящее время TAIGA-IACT представляет собой комплекс из четырех АЧТ (рис. 1а), расположенных в Республике Бурятия (Россия:  $51^{\circ}48'34.99''$  с.ш.,  $103^{\circ}04'01.99''$  з.д.). Диаметр сферического зеркала каждого телескопа составляет 4.3 м (рис. 1б). По сравнению с классическими АЧТ, телескопы TAIGA-IACT имеют сравнительно широкое поле зрения  $\sim 10^{\circ} \times 10^{\circ}$ . Количество пикселей (ФЭУ), каждый из которых обозревает отдельную область неба размером  $0.36^{\circ}$ , составляет около 600. Событие ШАЛ регистрируется, если амплитуда сигнала, превышающая 10 фотоэлектронных, возникает в двух соседних пикселях. На сегодняшний день с помощью установки TAIGA-IACT были зарегистрированы гамма-кванты с энергией выше 2 ТэВ от ряда галактических и внегалактических объектов,

представляющих значительный интерес для современной астрофизики [7, 8].

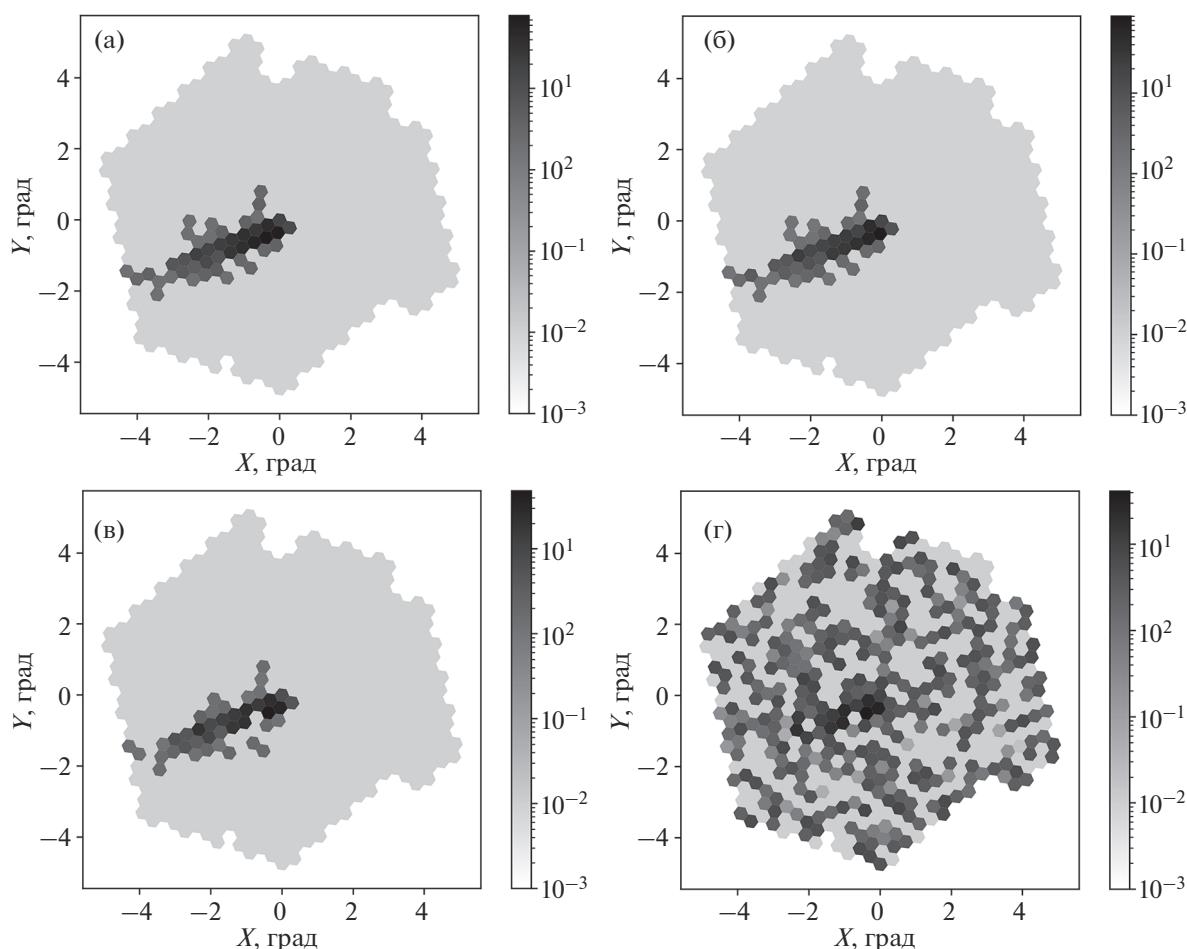
## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГИСТРИРУЕМЫХ СОБЫТИЙ

Поскольку параметры первичной частицы (энергия, направление прихода, положение оси, глубина максимума и др.) при регистрации реальных ШАЛ с помощью АЧТ достоверно неизвестны, Монте-Карло моделирование играет ключевую роль на всех этапах эксперимента, позволяя оценить его эффективность, оптимизировать методики извлечения полезного сигнала, формировать обучающие наборы для решения задач гамма-астрономии методами машинного обучения и оценивать достоверность получаемых результатов.

Процедура моделирования охватывает следующие процессы:

- Развитие ШАЛ в атмосфере — в данном случае, конечным результатом моделирования является пространственное распределение черенковских фотонов ШАЛ вблизи расположения АЧТ. В нашей работе ШАЛ моделировался в CORSIKA v7.35 с использованием GHEISHA-2002d для низкоэнергетических (ниже 80 ГэВ) и QGSJET-II-04 для высокоэнергетических (выше 80 ГэВ) адронных взаимодействий.

- Распространение черенковских фотонов в оптической системе АЧТ и их преобразование в фотоэлектроны на фотокатоде с учетом относительной квантовой чувствительности ФЭУ. Этот этап реализован программой TAIGA\_optics [9]. Она учитывает количество и расположение сегментов отражателя, потери фотонов на зеркалах, на входном окне регистрирующей камеры, а также спектральную квантовую эффективность ФЭУ (рис. 2а);



**Рис. 2.** Распределение черенковского света ШАЛ в камере TAIGA-IACT на разных этапах моделирования для одного события. Этапы представлены последовательно на иллюстрациях (а–г): (а) распределение черенковских фотонов в пикселях регистрирующей камеры с учетом оптической схемы телескопа, (б) учтена относительная квантовая чувствительность ФЭУ, (в) вводится моделирование аппаратного триггера телескопа с учетом эффекта послеимпульса, (г) наложен фон ночного неба.

• Преобразование фотоэлектронов в электрические импульсы системы формирования триггера в регистрирующей камере АЧТ. Чувствительность пикселей (рис. 2б), вероятность послеимпульса, параметры АЦП и особенности электроники (рис. 2в), а также фон ночного неба (рис. 2г) учитываются на основании экспериментальных измерений.

Все эти этапы вносят в данные искажения, которые можно интерпретировать как шумы, затрудняющие восстановление истинных параметров первичной частицы космических лучей.

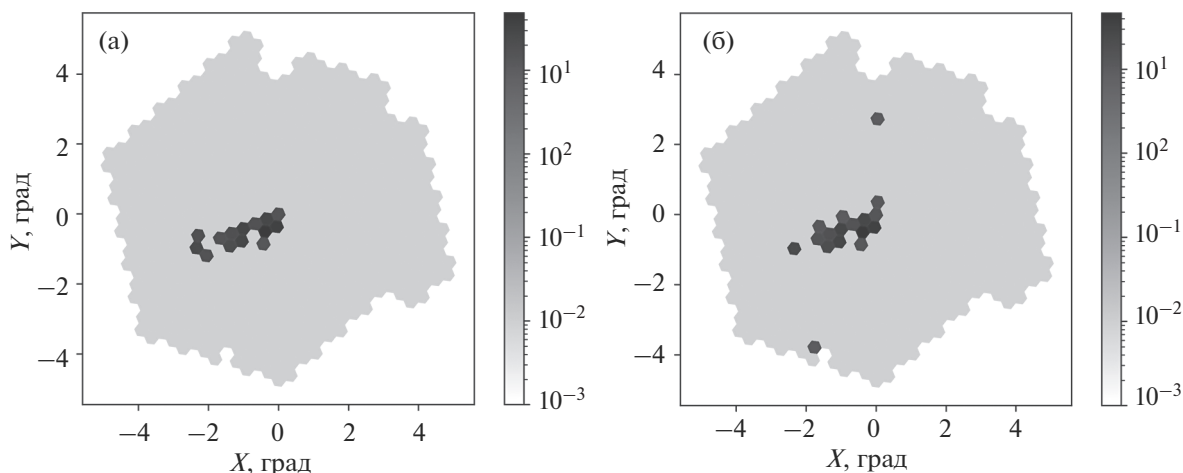
#### 4. МОДЕЛЬ ШУМА

Шумовая компонента амплитуды пикселя формируется из двух частей: амплитуды импульса фотоэлектрона и сигнала от фона ночного неба. Распределение амплитуд импульса фотоэлектрона считается известным из [10]. Таким образом, для

каждого зарегистрированного фотоэлектрона амплитуда случайно выбирается из экспериментально измеренного распределения. Отметим, что с некоторой вероятностью это распределение также учитывает возможность послеимпульса.

Уровень засветки от фона ночного неба считается известным из экспериментальных данных. В качестве его характеристики используется среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  распределения амплитуд пикселей, не прошедших процедуру очистки (см. разд. 4). Таким образом, для каждого пикселя в качестве амплитуды фона ночного неба случайным образом выбирается значение из предварительно сгенерированного распределения, усредненного по камере (рис. 2г).

После этапа наложения шума смоделированные события имеют наиболее близкую конфигурацию к экспериментально регистрируемым событиям от ШАЛ. Очистка изображений от этих



**Рис. 3.** Смоделированное событие из рис. 2 после прохождения процедуры очистки: (а) традиционный tail-cut cleaning с порогами очистки  $\text{thr}_1 = 7$  и  $\text{thr}_2 = 14$  ф.э., (б) DIOS алгоритм с порогом  $\text{thr} = 5$  ф.э. Значение порога для DIOS очистки подбиралось на основе распределения по параметру  $\alpha$  — направленности зарегистрированных событий на истинное направление прихода ШАЛ.

шумов является важной задачей, как для экспериментального, так и для моделируемого наборов событий.

## 5. АЛГОРИТМЫ ОЧИСТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Наиболее распространенным методом очистки изображений ШАЛ, регистрируемых АЧТ, является процедура ТСС. Процедура выполняется в 2 этапа:

1. удаление пикселей с амплитудой ниже  $\text{thr}_1$ ;
2. удаление пикселей, не имеющих соседей с амплитудой  $\geq \text{thr}_2$ , из пула оставшихся пикселей, где  $\text{thr}_1 < \text{thr}_2$  — пороговые значения процедуры, определяемые на основе моделирования. Данный подход хорошо зарекомендовал себя и применяется во многих обсерваториях, применяющих АЧТ. Возможны и другие варианты очистки. В качестве альтернативного подхода, в данной работе была реализована процедура DIOS [4]. Данный подход можно описать следующим алгоритмом:

1. Удаление пикселей с амплитудой ниже  $\text{thr}$ .
2. Удаление пикселей без соседей из массива оставшихся.
3. Проверка пикселей с одним соседом из массива оставшихся: удаление исследуемого пикселя, если его единственный сосед не имеет  $\geq 2$  соседних пикселей без учета исследуемого.

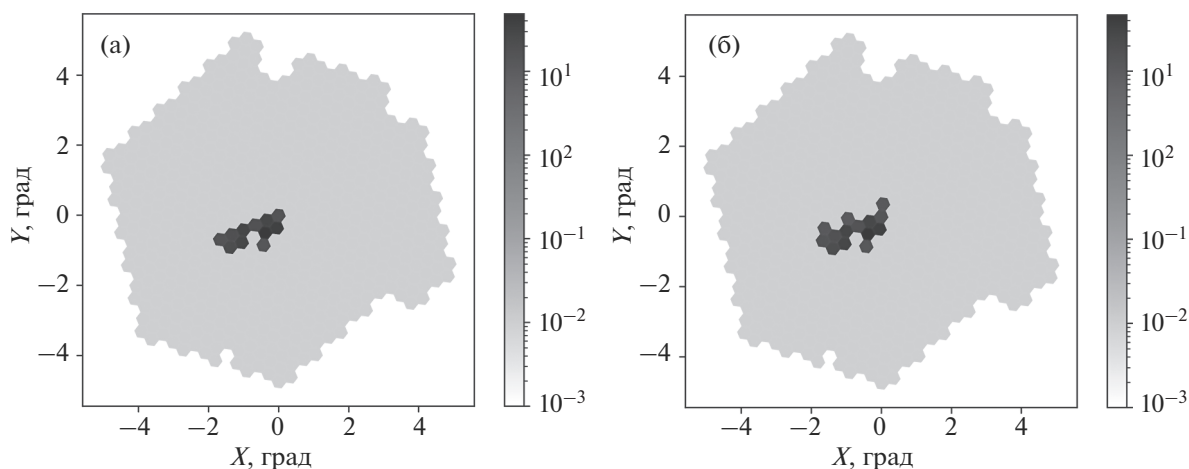
Таким образом, процедура DIOS оказывается более сложной с точки зрения алгоритма обхода пикселей, но при этом более простой с точки зрения оптимизации порога очистки, что является достаточно важным фактором, поскольку данный параметр требует регулярного мониторинга.

Примеры работы обоих алгоритмов представлены на рис. 3.

Помимо основного этапа очистки изображений от шумовых срабатываний пикселей, дополнительно применяется процедура выделения наиболее яркого острова, поскольку при достаточно высокой фоновой засветке, процедура очистки может пропускать дополнительные острова пикселей, не связанные с черенковским сигналом. Набор пикселей называется островом, если между любыми двумя пикселями этого набора существует “маршрут”, пролегающий через пиксели-соседи. В данной работе селекция единственного острова проводится по суммарной яркости каждого из них: сохраняются амплитуды пикселей острова с максимальной яркостью. Пример события с применением операции выделения яркого острова представлен на рис. 4.

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве тестового набора событий использовался набор гамма-квантов с энергиями от 20 до 200 ТэВ, распределенными по степенному закону с показателем спектра  $-1$ . Частицы бросались на площадь  $\sim 3 \text{ км}^2$  вокруг установки. Всего было брошено  $2.4 \times 10^4$  событий. На каждом этапе моделирования, для каждого события были рассчитаны значения параметров Хилласа, таких как  $\alpha$ , width, length, con2, size и dist. Параметры Хилласа представляют собой ряд геометрических характеристик изображений ШАЛ, широко используемых в анализе данных АЧТ для классификации событий [11]. В качестве метрики оценки использовалась средняя абсолютная ошибка (MAE) между значениями параметра события в исход-



**Рис. 4.** Пример события с применением операции выделения яркого острова: (а) использование традиционного алгоритма ТСС; (б) использование DIOS алгоритма.

ной выборке (до наложения каких-либо шумов) и значениями параметра после определенного этапа моделирования (табл. 1). Каждая строка табл. 1 соответствует одному из параметров Хилласа, каждый столбец — определенному этапу моделирования. Этапы моделирования расположены последовательно, слева направо. Ошибка рассчитывается на каждом этапе только для тех событий, которые прошли предыдущие этапы моделирования. Этим объясняется снижение ошибки на этапе моделирования аппаратного триггера телескопа. На данном этапе событий в 2.7 раза меньше чем на предыдущем, поскольку для многих событий не выполняется условие превышения амплитуды в 10 фотоэлектронов в двух соседних пикселях, что необходимо для выработки триггера. Сокращение доли присутствующих в моделировании событий на последующих этапах, отно-

сительно числа событий после моделирования аппаратного триггера не превышает 5%.

Наибольшие искажения вносятся на этапе наложения фона ночного неба. Оба исследуемых варианта очистки позволяют успешно минимизировать возникающие на данном этапе искажения изображения ШАЛ: MAE в большинстве случаев снижается до уровня соответствующего этапу моделирования оптических свойств телескопа. Выявленная на данный момент разница между результатами работы ТСС и DIOS подходами не является статистически значимой. Однако, как уже было отмечено в разделе 4, DIOS алгоритм является более простым с точки зрения оптимизации порога очистки, что делает его более привлекательным по сравнению с ТСС процедурой при том же результате.

**Таблица 1.** Значение средней абсолютной ошибки определения параметра на разных этапах моделирования событий, регистрируемых телескопом установки TAIGA-IACT. Каждая строка соответствует одному из параметров Хилласа, каждый столбец — определенный этап моделирования. Этапы моделирования расположены последовательно, слева направо. Ошибка рассчитывается на каждом этапе только для тех событий, которые прошли предыдущие этапы моделирования

| Этап моделирования<br>(→)/параметр<br>изображений (↓) | Относительная<br>чувствительность<br>ФЭУ | Аппаратный<br>триггер<br>телескопа | Фон<br>ночного<br>неба | Очистка |        | Выделение острова |       |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|------------------------|---------|--------|-------------------|-------|
|                                                       |                                          |                                    |                        | ТСС     | DIOS   | ТСС               | DIOS  |
| Число событий                                         | 18751                                    | 7007                               | 7007                   | 6790    | 6759   | 6979              | 6891  |
| $\alpha$                                              | 1.138                                    | 0.856                              | 36.875                 | 2.292   | 18.069 | 1.737             | 2.460 |
| width                                                 | 0.007                                    | 0.010                              | 1.550                  | 0.057   | 0.289  | 0.057             | 0.036 |
| length                                                | 0.024                                    | 0.018                              | 1.496                  | 0.113   | 0.490  | 0.110             | 0.075 |
| con2                                                  | 0.037                                    | 0.014                              | 0.195                  | 0.043   | 0.031  | 0.045             | 0.029 |
| Log(size)                                             | 0.054                                    | 0.202                              | 0.294                  | 0.245   | 0.180  | 0.248             | 0.218 |
| dist                                                  | 0.048                                    | 0.037                              | 1.284                  | 0.083   | 0.255  | 0.083             | 0.078 |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было показано, что процедура очистки оказывает существенное влияние на качество анализа изображений ШАЛ в регистрирующей камере АЧТ. Было продемонстрировано, что процедура очистки изображений DIOS, предложенная в [4], обеспечивает качество очистки сопоставимое с традиционным методом ТСС. Оба подхода позволяют подавлять шумовую компоненту изображения на одинаковом уровне. При этом DIOS алгоритм представляется более простым для оптимизации порога очистки. Оба алгоритма очистки были протестированны на Монте-Карло данных атмосферных черенковских телескопов установки TAIGA-IACT. Предполагается продолжить исследование возможности использования процедуры очистки изображений с помощью DIOS алгоритма. В частности, планируется оценить качество выделения гамма-квантов из адронного фона и точность восстановления их энергии сверточными нейронными сетями на основе данных, очищенных двумя методами.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова с использованием оборудования, предоставленного по Программе развития МГУ, и данных, полученных на уникальной экспериментальной установке TAIGA.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-11-00136, <https://rscf.ru/project/24-11-00136/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Demichev A., Kryukov A. // *Astron. Comput.* 2024. V. 46. P. 100793. <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2024.100793>
2. Kryukov A.P., Polyakov S.P., Vlaskina A.A., et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2023. V. 78 (Suppl. 1). P. S37–S44. <https://doi.org/10.3103/S0027134923070184>
3. Gres E.O., Kryukov A.P., Volchugov P.A., et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2024. V. 79 (Suppl. 2). P. S622–S629. <https://doi.org/10.3103/S0027134924702072>
4. Khurana M., Yadav K.K., Chandra P., et al. // *Galaxies*. 2025. V. 13. P. 14.
5. Буднев Н.М., Кузьмичев Л.А., Астапов И.И. и др. // *Журн. техн. физ.* 2023. Т. 93 (12). С. 1794. <https://doi.org/10.61011/JTF.2023.12.56824.f234-23>
6. Kuzmichev L.A. et al. // *Phys. At. Nucl.* 2018. V. 81 (4). P. 497–507.
7. Свешникова Л.Г., Волчугов П.А., Постников Е.Б. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87 (7). С. 966–972. <https://doi.org/10.31857/S0367676523701697>
8. Sveshnikova L.G., Astapov I.I., Bezyazeev P.A., et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2021. V. 85. P. 398–401. <https://doi.org/10.3103/S1062873821040365>
9. Grinyuk A.A., Postnikov E.B., Sveshnikova L.G. // *Phys. At. Nucl.* 2020. V. 83. P. 262–267. <https://doi.org/10.1134/S106377882002012X>
10. Mirzoyan R., Lorenz E., Petry D., Prosch C. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* 1997. V. 387 (1). P. 74. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00964-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00964-3)
11. Hillas A.M. // *Proc. 19th Int. Cosmic Ray Conf. (ICRC19)*. 1985. V. 3. P. 445.

## Influence of IACT Data Preprocessing Methods on the Accuracy of EAS Parameters Reconstruction

P. A. Volchugov<sup>1</sup>\*, A. P. Kryukov<sup>1</sup>, E. O. Gres<sup>2</sup>, A. P. Demichev<sup>1</sup>, J. J. Dubenskaya<sup>1</sup>, D. P. Zhurov<sup>2</sup>,  
S. P. Polyakov<sup>3</sup>, E. B. Postnikov<sup>1</sup>, and A. Y. Razumov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*Research Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia*

<sup>3</sup>*Institute for Informatics and Automation Problems of the National Academy of Science  
of the Republic of Armenia, Yerevan, 0014 Republic of Armenia*

\*e-mail: pvol4@yandex.ru

Received July 25, 2025; revised July 25, 2025; accepted August 4, 2025

**Abstract**—This work investigates the influence of data preprocessing methods on the accuracy of reconstructing the parameters of events detected by Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACTs). The simulation of the events detected by the telescopes is described, taking into account the night background and the noise of the recording camera electronics. Two image cleaning algorithms for noise suppression and their efficiency are compared.

**Ключевые слова:** IACT, EAS, Monte Carlo simulation, neural networks, training dataset