

## ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ЗЕРКАЛА И РАЗМЕРА ПИКСЕЛЯ КАМЕРЫ ЧЕРЕНКОВСКОГО ГАММА-ТЕЛЕСКОПА НА РЕЖЕКЦИЮ АДРОННОГО ФОНА

*Е. Б. Постников<sup>1,\*</sup>, И. И. Астапов<sup>2</sup>, П. А. Безъязыков<sup>3</sup>,  
А. В. Блинов<sup>4</sup>, Е. А. Бонвеч<sup>1</sup>, А. Н. Бородин<sup>4</sup>, Н. М. Буднев<sup>3</sup>,  
А. В. Булан<sup>1</sup>, Д. В. Чернов<sup>1</sup>, А. Кьявасса<sup>5</sup>, А. Н. Дячок<sup>3</sup>,  
А. Р. Гафаров<sup>3</sup>, А. Ю. Гармаш<sup>6,7</sup>, В. М. Гребенюк<sup>4</sup>,  
Е. О. Гресь<sup>3</sup>, О. А. Гресь<sup>3</sup>, Т. И. Гресь<sup>3</sup>, А. А. Гринюк<sup>4</sup>,  
О. Г. Гришин<sup>3</sup>, А. Д. Иванова<sup>3</sup>, А. Л. Иванова<sup>3,7</sup>,  
М. А. Илюшин<sup>3</sup>, Н. Н. Калмыков<sup>1</sup>, В. В. Киндин<sup>2</sup>,  
С. Н. Кирюхин<sup>2</sup>, Р. П. Кокоулин<sup>3</sup>, Н. И. Колосов<sup>3</sup>,  
К. Г. Компаниец<sup>2</sup>, Е. Е. Коростелева<sup>1</sup>, В. А. Кожин<sup>1</sup>,  
Е. А. Кравченко<sup>6,7</sup>, А. П. Крюков<sup>1</sup>, Л. А. Кузьмичев<sup>1</sup>,  
А. А. Лагутин<sup>8</sup>, М. В. Лаврова<sup>4</sup>, Ю. Е. Лемешев<sup>3</sup>,  
Б. К. Лубсандоржиев<sup>9</sup>, Н. Б. Лубсандоржиев<sup>1</sup>,  
А. Д. Луканов<sup>9</sup>, С. Д. Малахов<sup>3</sup>, Р. Р. Миргазов<sup>3</sup>,  
Р. Д. Монхоев<sup>3</sup>, Э. А. Окунева<sup>1</sup>, Э. А. Осипова<sup>1</sup>,  
А. Л. Пахорук<sup>3</sup>, А. Пан<sup>4</sup>, А. Д. Панов<sup>1</sup>, Л. В. Паньков<sup>3</sup>,  
А. А. Петрухин<sup>2</sup>, И. А. Поддубный<sup>3</sup>, Д. А. Подгрудков<sup>1</sup>,  
Е. Г. Попова<sup>1</sup>, В. В. Просин<sup>1</sup>, В. С. Птускин<sup>10</sup>,  
А. А. Пушкин<sup>3</sup>, Р. И. Райкин<sup>8</sup>, А. В. Разумов<sup>1</sup>, Е. В. Рябов<sup>3</sup>,  
Г. И. Рубцов<sup>9</sup>, В. С. Самолига<sup>3</sup>, И. Сатышев<sup>4</sup>,  
А. В. Шайковский<sup>4</sup>, А. Ю. Сидоренков<sup>9</sup>, А. А. Силаев<sup>1</sup>,  
А. А. Силаев (мл.)<sup>1</sup>, А. В. Скурихин<sup>1</sup>, А. В. Соколов<sup>6,7</sup>,  
Л. Г. Свешникова<sup>1</sup>, В. А. Таболенко<sup>3</sup>, А. Б. Танаев<sup>3</sup>,  
М. Ю. Терновой<sup>3</sup>, Л. Г. Ткачев<sup>4,11</sup>, Н. А. Ушаков<sup>9</sup>,  
П. А. Волчуг<sup>1</sup>, Н. В. Волков<sup>8</sup>, Д. М. Воронин<sup>9</sup>,  
И. И. Яшин<sup>2</sup>, А. В. Загородников<sup>3</sup>, Д. П. Журов<sup>3</sup>,  
В. Н. Зиракашвили<sup>10</sup>*

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

\* E-mail: evgeny.post@gmail.com

- <sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва  
<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия  
<sup>4</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна  
<sup>5</sup> Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия  
<sup>6</sup> Новосибирский государственный университет — национальный исследовательский университет, Новосибирск, Россия  
<sup>7</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия  
<sup>8</sup> Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия  
<sup>9</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва  
<sup>10</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Москва  
<sup>11</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Астрофизический эксперимент TAIGA-10 (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) планируется расширить новыми телескопами с улучшенными параметрами: меньшим размером пикселя камеры либо большим диаметром зеркала. Было проведено моделирование новых и уже установленных телескопов и количественно оценено ожидаемое улучшение режекции адронного фона при переходе к меньшим размерам пикселя и большему диаметру зеркала.

New telescopes are to be installed for the TAIGA-10 astrophysical experiment (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy). These telescopes will have better hadron rejection power, because they will be equipped either with larger mirror dish or camera with smaller pixel size. New telescopes were simulated with Monte Carlo as well as those already installed and working. As a result, estimations were made for the predicted improvement in hadron rejection.

PACS: 95.55.Ка

## ВВЕДЕНИЕ

Гамма-обсерватории TAIGA [1] уже успешно регистрируют каскады частиц (широкие атмосферные ливни, ШАЛ), порожденные гамма-квантами и адронами. Последние представляют собой гораздо более интенсивный поток, от которого в ходе обработки данных следует избавляться как от фона, т. е. осуществлять его режекцию.

Работу осуществляют 3 атмосферных черенковских гамма-телескопа (АЧТ, в английской версии IACT) с анализом изображений ливней. Все они имеют примерно одинаковые параметры: диаметр зеркала 4,3 м и апертуру  $9,6 \times 9,6^\circ$ , количество пикселей камеры около 600, диаметр каждого пикселя 3 см. Они являются теми самыми «малыми телескопами» согласно терминологии проекта СТА [2]: малые телескопы (SST) имеют диаметр зеркала 4 м, средние телескопы (MST) обладают зеркалом 12 м в диаметре, диаметр зеркала больших телескопов (LST) составляет 23 м.

В дополнение, еще два телескопа с теми же параметрами уже установлены на астрофизическом полигоне TAIGA и будут введены в строй в 2024–2025 гг.

В 2026 г. обсерватория, в рамках перехода к проекту TAIGA-10 (т. е. установки общей площадью  $10 \text{ км}^2$ ), планирует создание и размещение телескопа с улучшенными параметрами для более эффективной режекции адронного фона. Планируется выбрать один из двух вариантов: камеру с уменьшенным размером пикселя либо зеркало большей площади. В данной работе осуществлено моделирование методом Монте-Карло всех вариантов телескопа, включая существующие конфигурации, и проведено сравнение выигрыша в процессе улучшения режекции фона для каждого из них.

### ВАРИАНТ 1: ТЕЛЕСКОП С БОЛЬШИМ ДИАМЕТРОМ ЗЕРКАЛА

Телескопы TAIGA используют состоящие из сегментов зеркала системы Дэвиса–Коттона [3]: совокупность зеркал, после установки на тарелку телескопа, образует сферическую поверхность с радиусом  $4,75 \text{ м}$ . Для того чтобы при увеличении диаметра зеркала апертура телескопа осталась неизменной —  $9,6 \times 9,6^\circ$ , необходимо соответствующее увеличение и площади камеры телескопа, находящейся в его фокусе и регистрирующей отраженные от зеркала сигналы ШАЛ. При увеличении диаметра зеркала с текущего значения  $4,3 \text{ м}$  до планируемых  $6 \text{ м}$  диаметр (линейный размер) камеры телескопа должен увеличиться в такое же количество раз, т. е. приблизительно в  $1,5$  раза. Поэтому необходимо такое увеличение размеров камеры, как представлено на рис. 1.

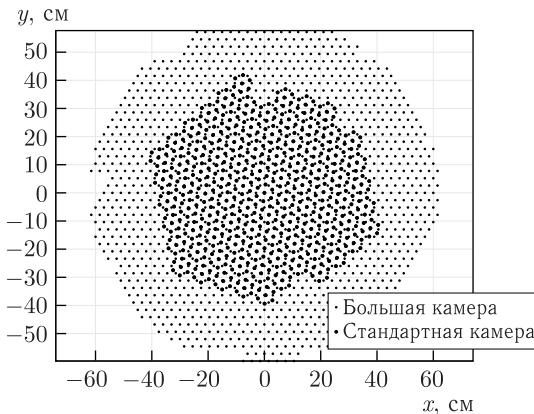


Рис. 1. Сравнение размеров текущей камеры телескопа и планируемой для телескопа с большим зеркалом

Размер пикселя камеры в варианте телескопа с большим зеркалом останется неизменным и составит 3 см в диаметре. Количество пикселей при этом должно стать порядка 1500, т. е. возрасти почти в 3 раза.

## **ВАРИАНТ 2: ТЕЛЕСКОП С КАМЕРОЙ С МАЛЫМИ ПИКСЕЛЯМИ**

Альтернативным вариантом повышения чувствительности телескопа является использование камеры с пикселями меньшего размера. Само зеркало при этом предполагается неизменным, т. е. прежнего диаметра 4,3 м.

Размер пикселя в моделировании был уменьшен с 3 до 2 см. Так как диаметр зеркала не поменялся, то для сохранения апертуры телескопа физические размеры камеры необходимо было оставить неизменными, что, естественно, привело к увеличению общего числа пикселей. Поскольку размер пикселя уменьшен в 1,5 раза, то при неизменном размере камеры число пикселей увеличилось тоже в 1,5 раза вдоль каждой из осей, в итоге на всей плоскости камеры их число увеличилось более чем в 2 раза.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

Для сравнения обоих вариантов более чувствительного телескопа друг с другом и с существующей конфигурацией было проведено моделирование всех этих вариантов. Для этого использовалось стандартное моделирование методом Монте-Карло телескопа TAIGA-IACT [4, 5].

Моделирование состоит из трех этапов. На первом этапе моделируются ШАЛ программой CORSIKA [6]. На втором этапе проводится моделирование оптической системы телескопа программой TAIGA.OPTICS [5]. И на последнем этапе моделируется электроника и отклик детектора, система преобразования и считывания сигнала и все необходимые параметры [4, 5].

Спектр первичных фоновых частиц адронов (протонов) был найгран в диапазоне от 1 до 100 ТэВ с равномерным по логарифму энергии распределением и использованием в последующих расчетах весов, нормирующих к реальному спектральному показателю 2,6. Спектр первичных гамма-квантов был найгран с тем же спектральным показателем в диапазоне от 0,5 до 50 ТэВ. Для генерации адронных взаимодействий использовалась модель QGSJET-II-04. Общая статистика найгранных протонов превысила 2 млн событий, гамма-квантов — 700 тыс.

### **МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ**

Сравним оба варианта более чувствительного телескопа. Будем сравнивать три характеристики работы гамма-телескопа: качество выделения гамма-квантов из адронного фона, энергетический порог регистрации гамма-квантов и эффективную (триггерную) площадь телескопа.

Качество выделения гамма-квантов характеризуем одним числовым показателем, называемым «фактором качества» (английское Quality factor) или просто  $Q$ -фактором [7]. Он показывает, во сколько раз статистическая значимость  $S$  регистрации гамма-источника увеличивается после процедуры выделения гамма-квантов:

$$Q = \frac{S_{\text{после выделения}}}{S_{\text{до выделения}}}.$$

Тем самым для пуассоновской статистики флуктуаций адронного фона:

$$Q = \frac{\frac{N_{\gamma, \text{отнесенных к } \gamma}}{N_{\gamma}}}{\sqrt{\frac{N_{\text{адронов, отнесенных к } \gamma}}{N_{\text{адронов}}}}}.$$

Если

$$\frac{N_{\gamma, \text{отнесенных к } \gamma}}{N_{\gamma}} = 50\%,$$

то

$$\frac{N_{\text{адронов}}}{N_{\text{адронов, отнесенных к } \gamma}} = 4Q^2.$$

Это означает, что адроны будут подавляться для  $Q = 3$  в 36 раз, для  $Q = 4$  — в 64 раза, для  $Q = 5$  — в 100 раз, для  $Q = 10$  — в 400, а для  $Q = 15$  — в 900 раз (доля подавления определяется квадратом  $Q$ -фактора).

Обработка данных моделирования заключалась, помимо стандартных этапов обработки изображений гамма-телескопов [8], в оптимизации выделения гамма-квантов для каждого варианта телескопа по отдельности, включая текущий. В качестве метода выделения гамма-квантов было избрано последовательное применение оптимальных пороговых значений для таких параметров изображения, как ширина, длина, размер (size) — суммарная амплитуда сигнала всех пикселей изображения, минимальное и максимальное расстояние центра изображения от положения источника, минимальное количество пикселей после «очистки изображения» (image cleaning), максимальный угол между осью изображения и направлением на положение источника. Большинство этих параметров являются стандартными для гамма-астрономии «параметрами Хилласа» [9], традиционно использующимися в анализе данных в этой сфере.

Критерием оптимизации выступало условие максимизации  $Q$ -фактора при условии сохранения не менее 50% гамма-квантов. В качестве промежуточного результата были получены оптимальные значения каждого из перечисленных параметров для каждого варианта телескопа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Основной результат работы сведен в таблицу, в которой представлены полученные данные по качеству выделения гамма-квантов из адронного фона и пороговым энергиям регистрации гамма-квантов.

Эффективная площадь телескопа в зависимости от энергии гамма-квантов приведена на рис. 2.

### Результаты оптимизации

$\varnothing$ телескопа, м	$\varnothing$ пикселя, см	$Q$	Порог $E$ , ТэВ	Порог $E$ после выделения $\gamma$ , ТэВ
4,3	3	5,7	1,9	3
4,3	2	7,8	1,4	2,7
6	3	11,6	0,5	0,7

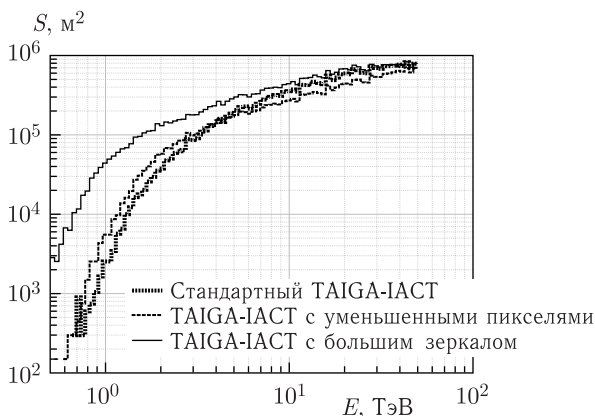


Рис. 2. Зависимость эффективной (триггерной) площади телескопа от энергии гамма-квантов

## ВЫВОДЫ

Все определенные в работе параметры (см. таблицу, рис. 2) указывают на гораздо более высокую чувствительность и лучшее качество телескопа с большим зеркалом. У него существенно выше  $Q$ -фактор, а значит, качество выделения гамма-квантов, и существенно ниже энергетические пороги регистрации гамма-квантов как до, так и после процедуры их выделения. Это означает гораздо большую ожидаемую статистику по регистрируемым гамма-квантам.

Эффективная площадь подтверждает этот вывод и является существенно большей для телескопа с большим зеркалом, особенно при низких (близких к пороговой области) энергиях гамма-квантов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал несомненное преимущество гамма-телескопа с большим зеркалом перед зеркалом меньшего диаметра. Это касается всех исследованных аспектов работы телескопа: подавления адронного фона, порога регистрации гамма-квантов и эффективной площади регистрации.

Альтернативный вариант с меньшим размером пикселя продемонстрировал значительно худшие результаты.

Результаты анализа получают практическое применение и будут использованы при планировании развития установки TAIGA.

**Финансирование работы.** Работа поддержана Российским научным фондом (грант 23-72-00019).

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Astapov I. et al. (TAIGA Collab.). The TAIGA — A Hybrid Detector Complex in Tunka Valley for Astroparticle Physics, Cosmic Ray Physics and Gamma-Ray Astronomy // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86, No. 4. P. 471–477.*
2. *La Palombara N., Sironi G., Giro E., Scuderi S., Canestrari R., Iovenitti S., Garczarczyk M., Krause M., Diebold S., Millul R., Marioni F., Missaglia N., Redaelli M., Valsecchi G., Zocchi F., Zanoni A., Pareschi G. Mirror Production for the Cherenkov Telescopes of the ASTRI Mini-Array and the MST Project for the Cherenkov Telescope Array // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 2022. V. 8, No. 1. P. 014005.*
3. *Davies J. M., Cotton E. S. Design of the Quartermaster Solar Furnace // J. Sol. Energy Sci. Eng. 1957. V. 1. P. 16.*
4. *Grinyuk A., Postnikov E., Sveshnikova L. Monte Carlo Simulation of the TAIGA Hybrid Gamma-Ray Experiment // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83, No. 2. P. 262–267.*
5. *Postnikov E. B. et al. (TAIGA Collab.). Monte Carlo Simulation of the TAIGA Experiment // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2019. V. 83, No. 8. P. 1016–1019.*
6. *Heck D., Knapp J., Capdevielle J. N., Schatz G., Thouw T. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. Rep. FZKA 6019. Forschungszentrum Karlsruhe. 1998; <https://web.iap.kit.edu/corsika/>.*
7. *Atkins R. et al. (MILAGRO Collab.). Observation of TeV Gamma Rays from the Crab Nebula with Milagro Using a New Background Rejection Technique // Astrophys. J. 2003. V. 595. P. 803–811.*
8. *Postnikov E. B. et al. (TAIGA Collab.). First Detection of Gamma-Ray Sources at TeV Energies with the First Imaging Air Cherenkov Telescope of the TAIGA Installation // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1690. P. 012023.*
9. *Hillas A. M. Cherenkov Light Images of EAS Produced by Primary Gamma Rays and by Nuclei // Proc. of the 19th Intern. Cosmic Ray Conf. 1985. V. 3. P. 445–448.*