

КАЛИБРОВКА «КВАНТОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ» ТЕЛЕСКОПОВ УСТАНОВКИ TAIGA-IAST

П. А. Волчугов^{1,}, И. И. Астапов², П. А. Безъязыков³,
А. В. Блинов⁴, А. Н. Бородин⁴, Е. А. Бонвеч¹,
Н. М. Буднев³, А. В. Булан¹, Н. В. Волков⁵, Д. М. Воронин⁶,
А. Р. Гафаров³, Е. О. Гресь³, О. А. Гресь³, Т. И. Гресь³,
О. Г. Гришин³, А. Ю. Гармаш^{7,8}, В. М. Гребенюк⁴,
А. А. Гринюк⁴, А. Н. Дячок³, Д. П. Журов³,
А. В. Загородников³, В. Н. Зиракашвили⁹, А. Л. Иванова³,
А. Д. Иванова³, М. А. Илюшин³, Н. Н. Калмыков¹,
В. В. Киндин², С. Н. Кирюхин³, Р. П. Кокоулин²,
Н. И. Колосов³, К. Г. Компаниец², Е. Е. Коростелева¹,
В. А. Кожин¹, Е. А. Кравченко^{7,8}, А. П. Крюков¹,
Л. А. Кузьмичев¹, А. Кьявасса¹⁰, М. В. Лаврова⁴,
А. А. Лагутин⁵, Ю. Е. Лемешев³, Б. К. Лубсандоржиев⁶,
Н. Б. Лубсандоржиев¹, А. Д. Луканов⁶, С. Д. Малахов³,
Р. Р. Миргазов³, Р. Д. Монхоев³, Э. А. Окунева¹,
Э. А. Осипова¹, А. Л. Пахоруков³, А. Пан⁴, А. Д. Панов¹,
Л. В. Паньков³, А. А. Петрухин², Д. А. Подгрудков¹,
И. А. Поддубный³, Е. Г. Попова¹, Е. Б. Постников¹,
В. В. Просин¹, А. А. Пушкин³, А. Ю. Разумов¹,
Р. И. Райкин⁵, Г. И. Рубцов⁶, Е. В. Рябов³, В. С. Самолига³,
И. Сатышев⁴, Л. Г. Свешникова¹, А. А. Силаев¹,
А. А. Силаев (мл.)¹, А. Ю. Сидоренков⁶, А. В. Скурихин¹,
А. В. Соколов^{7,8}, В. А. Таболенко³, А. Б. Танаев³,
М. Ю. Терновой³, Л. Г. Ткачев^{4,11}, Н. А. Ушаков⁶,
Д. В. Чернов¹, А. В. Шайковский⁴, И. И. Яшин²*

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

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

³ Научно-исследовательский институт прикладной физики
Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия

⁴ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

⁵ Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

⁶ Институт ядерных исследований РАН, Москва

⁷ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁸ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

⁹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Троицк, Россия

¹⁰ Национальный институт ядерной физики, INFN, Турин, Италия

¹¹ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Интегральная «квантовая чувствительность» атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) является важной характеристикой детектора, используемой при реконструкции параметров регистрируемых событий. Астрофизический комплекс TAIGA включает в свой состав установки TAIGA-IACT — массив из трех АЧТ и TAIGA-HiSCORE — 120 широкоугольных черенковских детекторов на площади 1 км^2 . Комплекс нацелен на решение актуальных задач гамма-астрономии очень высоких энергий. Установка TAIGA-HiSCORE позволяет проводить восстановление функции пространственного распределения (ФПР) черенковских фотонов широкого атмосферного ливня (ШАЛ). Эта информация позволяет определять число черенковских фотонов, достигающих отражателей АЧТ, и, в конечном счете, определять эффективность их регистрации. В работе описан данный подход к калибровке интегральной «квантовой чувствительности» установки TAIGA-IACT.

The optical throughput of imaging atmospheric Cherenkov telescopes (IACTs) is an important detector characteristic used in the reconstruction of the parameters of detected events. The TAIGA astrophysical complex includes TAIGA-IACT, an array of 3 IACTs, and TAIGA-HiSCORE with 120 wide-angle Cherenkov detectors on an area of 1 км^2 . The complex is aimed at solving urgent problems of very high energy gamma-ray astronomy. The TAIGA-HiSCORE facility allows the reconstruction of the lateral distribution function (LDF) of Cherenkov photons from the extensive air showers (EAS). This information allows us to determine the number of Cherenkov photons reaching the reflectors of the IACT and, eventually, to determine the detection efficiency. The paper describes this approach to calibrating the optical throughput of the TAIGA-IACT facility.

PACS: 06.20.fb; 96.50.sd; 07.85.Fv

ВВЕДЕНИЕ

Астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and γ -ray Astronomy) включает ряд детекторов ШАЛ, расположенных в Тункинской долине Республики Бурятия, на площади 1 км^2 [1, 2]. Детекторы предназначены для проведения исследований в области гамма-астрономии и физики космических лучей в энергетической области ТэВ–ПэВ. Уникальность комплекса состоит в комбинированном подходе к регистрации ШАЛ. В частности, ливни, порожденные гамма-квантами с энергиями выше 40 ТэВ, могут быть зарегистрированы

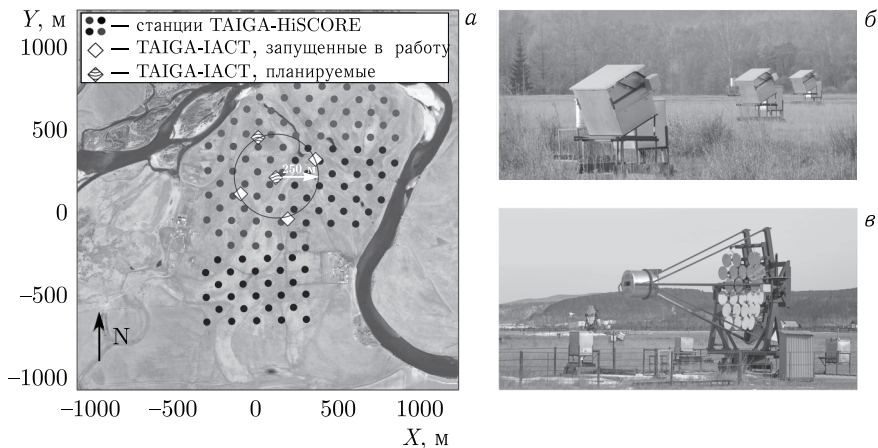


Рис. 1. Астрофизический комплекс TAIGA. *а)* Взаимное расположение детекторов установки TAIGA-HiSCORE и телескопов TAIGA-IACF. Расстояние между двумя ближайшими станциями TAIGA-HiSCORE составляет 106 м, расстояние от периферийных АЧТ TAIGA-IACF до центрального составляет 250 м. *б)* Широкоугольные черенковские детекторы установки TAIGA-HiSCORE. *в)* Первые два АЧТ установки TAIGA-IACF

совместно установками TAIGA-IACF и TAIGA-HiSCORE (рис. 1, *а*), что позволяет с высокой точностью определять как тип частицы, так и ее характеристики, такие как энергия и направление прихода. В области более низких энергий ($> 2-3$ ТэВ) регистрация и восстановление параметров первичной частицы также возможны на основе данных отдельных телескопов установки TAIGA-IACF. Для корректного восстановления характеристик регистрируемых гамма-квантов необходимо учитывать эффективность регистрации черенковских фотонов, определяемую свойствами установки. Статья посвящена подходу, реализуемому для определения эффективности регистрации черенковских фотонов или интегральной «квантовой чувствительности» установки TAIGA-IACF.

1. АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС TAIGA

Астрофизический комплекс TAIGA в настоящее время включает в свой состав ряд установок. Их подробное описание представлено в [3]. Поскольку данная работа посвящена калибровке интегральной «квантовой чувствительности» установки TAIGA-IACF по данным установки TAIGA-HiSCORE, в данном разделе приведены основные характеристики и возможности этих детекторов.

1.1. TAIGA-HiSCORE представляет собой сеть широкоугольных детекторов, регистрирующих черенковское излучение ШАЛ. Установка состоит из 120 оптических станций на площади 1 км^2 (см. рис. 1, *б*) [4].

На основе распределения амплитуд и временных задержек прихода ШАЛ в детекторах возможно восстановление ФПР черенковских фотонов ливня. По ФПР возможно определение других характеристик ШАЛ, таких как направление прихода, положение оси и глубины максимума развития ливня ($X_{\max}$) [5]. Энергетический порог TAIGA-HiSCORE при регистрации гамма-квантов составляет 40 ТэВ.

1.2. TAIGA-IACT включает в свой состав 5 АЧТ на расстоянии 250 м друг от друга (см. рис. 1, в) [6]. В настоящее время в работу запущено 3 АЧТ. Ожидается, что в ближайшие два года еще два телескопа будут введены в эксплуатацию. АЧТ представляет собой отражатель диаметром 4,3 м на альт-азимутальной монтировке, что позволяет проводить слежение за источниками гамма-излучения. В фокусе отражателя расположена регистрирующая камера с полем зрения $10 \times 10^\circ$ [7], состоящая из фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) XP1911. Таким образом, АЧТ создает угловое изображение ШАЛ, которое позволяет определять параметры ливней, в частности, тип первичной частицы. При регистрации гамма-квантов энергетический порог установки составляет 2–3 ТэВ*.

2. ИНТЕГРАЛЬНАЯ «КВАНТОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ» ТЕЛЕСКОПОВ TAIGA-IACT

Одним из важнейших параметров регистрируемых ШАЛ является энергия первичной частицы. При фиксированном расстоянии до оси ливня, направлении прихода первичной частицы и $X_{\max}$ энергия прямо пропорционально связана с числом черенковских фотонов, зарегистрированных детектором. Однако любой детектор обладает ограниченной чувствительностью, и при восстановлении энергии необходимо учитывать эффективность регистрации фотонов, определяемую свойствами установки. Поскольку TAIGA-HiSCORE позволяет определять ФПР черенковского света ШАЛ (процедура описана в [5]), поток фотонов (Q) может быть оценен в точках расположения телескопов TAIGA-IACT (рис. 2). Далее, с учетом полной площади отражателей телескопов, каждый из которых состоит из 34 сегментов диаметром 60 см, было рассчитано число черенковских фотонов (QS_{mir}), относительно которых определяется эффективность их регистрации. Число зарегистрированных телескопом фотонов (size) определяется суммой амплитуд пикселей изображения, формируемого регистрирующей камерой телескопа. Пересчет кодов АЦП в фотоэлектроны выполняется на основе регулярно проводимой относительной светодиодной калибровки амплитуд ФЭУ [7].

* Энергетический порог регистрации ШАЛ зависит от зенитного угла наблюдения. Для околорезервальных источников порог составляет 2 ТэВ, в то время как при зенитных углах $30\text{--}40^\circ$ порог регистрации гамма-квантов составляет 3 ТэВ.

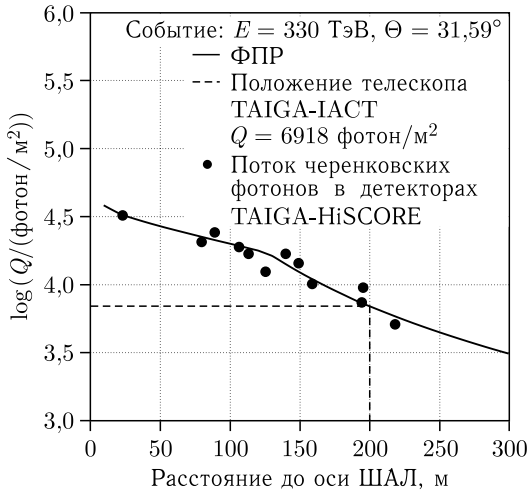


Рис. 2. ФПР черенковского излучения ШАЛ по данным TAIGA-HiSCORE. Поток черенковских фотонов в положении телескопа TAIGA-IACST определяется на основе данного распределения

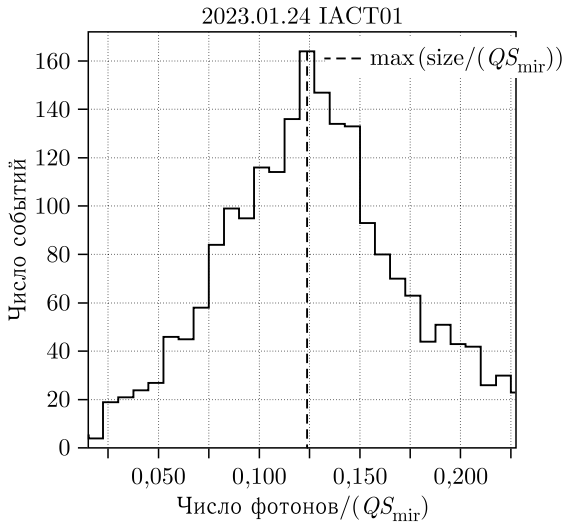


Рис. 3. Распределение отношений числа зарегистрированных телескопом фотоэлектронов к числу достигших отражателя черенковских фотонов за один сеанс наблюдений для TAIGA-IACST01. В качестве характеристики одного сеанса наблюдений используется значение $size/(QS_{mir})$ в максимуме распределения

Для каждого дня наблюдений, содержащего не менее чем 250 совместных событий TAIGA-IACST и TAIGA-HiSCORE, было построено распределение отношений $size/(QS_{mir})$, максимум которого оценивался как



Рис. 4. Изменение интегральной «квантовой чувствительности» трех телескопов установки TAIGA-IACF в период 2020–2023 гг. Каждая точка характеризует ошибку среднего значения эффективности регистрации черенковских фотонов телескопом за один сеанс наблюдений, содержащий не менее 250 совместных событий TAIGA-IACF и TAIGA-HiSCORE

среднее значение интегральной «квантовой чувствительности» телескопов (рис. 3).

В результате проведенного исследования были получены значения интегральной квантовой чувствительности телескопов установки TAIGA-IACF в период с 2020 по 2023 г. (рис. 4). Рост чувствительности TAIGA-IACF01 в сезоне 2022–2023 гг. связан с заменой летом 2022 г. конусов светосбора (конусов Винстона) камеры на новые, площадь светосбора которых в 2,17 раза больше, чем у прежних. Регистрирующая камера TAIGA-IACF03 содержит ФЭУ XR1911UV, более чувствительные к ультрафиолетовой части спектра черенковского излучения, и тоже содержит обновленные конусы Винстона. TAIGA-IACF02 не подвергался изменениям в течение трех сезонов. Основной рабочей гипотезой причин падения эффективности регистрации черенковского излучения на 20 % на данном этапе рассматривается деградация отражательной способности зеркал TAIGA-IACF02.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная по оценке интегральной «квантовой чувствительности» телескопов установки TAIGA-IACF работа позволила косвенно оценить степень деградации отражательной способности зеркал, а также заложить корректную связь между size и энергией первичных гамма-квантов в моделирование методом Монте-Карло, что в конечном счете позволит получать энергетические спектры источников гамма-излучения с меньшей погрешностью. В дальнейшем планируется провести независимую оценку интегральной «квантовой чувствительности» путем детектирования одиночных мюонов в камерах телескопов TAIGA-IACF.

Финансирование. Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ–ИГУ». Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 23-72-00016, разд. 2, 23-72-00019, разд. 3) и государственными заданиями Минобрнауки (FZZE-2023-0004, FZZE-2024-0005).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буднев Н. М. и др. (колл. TAIGA). TAIGA — гибридный комплекс для многоканальной астрономии высоких энергий // ЖТФ. 2023. Т. 93, № 12. С. 1794; <https://dx.doi.org/10.61011/JTF.2023.12.56824.f234-23>.
2. Kuzmichev L. A. et al. (TAIGA Collab.). TAIGA Gamma Observatory: Status and Prospects // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81, No. 4. P. 497–507.
3. Астапов И. И. и др. (колл. TAIGA). Изучение космических лучей на Астрофизическом комплексе TAIGA: результаты и планы // ЖЭТФ. 2022. Т. 161, № 4. С. 548–559.
4. Gress O. A. et al. (TAIGA Collab.). The Wide-Aperture Gamma-Ray Telescope TAIGA-HiSCORE in the Tunka Valley: Design, Composition and Commissioning // Nucl. Instr. Meth. A. 2017. V. 845. P. 367–372.
5. Prosin V. V. et al. Tunka-133: Results of 3 Year Operation // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 756. P. 94–101; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213012527>.
6. Volchugov P. A. et al. (TAIGA Collab.). γ -Ray Detection with the TAIGA-IAC T Installation in the Stereo Mode of Observation // Instrum. Exp. Tech. 2024. V. 67, No. 1. P. 143–152.
7. Lubsandorzhev N. B. et al. (TAIGA Collab.). Camera of the First TAIGA-IAC T: Construction and Calibration // PoS. 2017. V. ICRC2017. P. 757.