

Калибровка регистрирующей камеры атмосферного черенковского телескопа эксперимента TAIGA-IACT с помощью наносекундного источника света

А. Т. Панферова^{1,*}, Н. Б. Лубсандоржиев^{2,†}, Е. Е. Коростелева^{2,‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 10.06.2025; подписана в печать 16.03.2026)

Атмосферные черенковские телескопы эксперимента TAIGA-IACT входят в состав астрофизического комплекса TAIGA. Каждый телескоп TAIGA-IACT оснащен составным зеркалом конструкции Дэвиса-Коттона с диаметром 4.3 м. В фокальной плоскости телескопа установлена регистрирующая камера, состоящая приблизительно из 600 вакуумных фотоумножителей с диаметром фотокатода 15 мм. Регистрирующие камеры атмосферных черенковских телескопов нуждаются в регулярной калибровке параметров фотоумножителей и измерительных трактов для получения надежных экспериментальных данных. В настоящей работе описываются методы калибровки фотоумножителей и измерительных каналов в регистрирующей камере третьего атмосферного черенковского телескопа TAIGA-IACT. Коэффициенты для преобразования кодов АЦП в количество фотоэлектронов, а также коэффициенты относительной квантовой чувствительности фотоумножителей были получены путем калибровки с использованием наносекундного источника света, проведенной в марте 2024 г.

PACS: 95.55.Ка, 29.40.Ка УДК: 53.089.6.

Ключевые слова: калибровка фотоумножителей, IACT.

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные черенковские телескопы являются одним из основных инструментов для регистрации гамма-квантов высоких энергий. С помощью анализа изображения широких атмосферных ливней атмосферные черенковские телескопы позволяют выделять гамма-кванты из преобладающего фона космических лучей (протонов и более тяжелых ядер) [1].

В Тункинском районе Республики Бурятия ведется строительство массива атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT в составе астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) [2]. Основной задачей эксперимента TAIGA-IACT является поиск галактических и внегалактических источников гамма-квантов высоких энергий. Для детектирования гамма-квантов используются три подхода. Гамма-кванты относительно низких энергий (более 2 ТэВ) регистрируются с помощью одиночных телескопов. При энергиях более 8 ТэВ становится возможной регистрация гамма-квантов несколькими телескопами одновременно. Совместная работа телескопов и оптических станций установки TAIGA-HiSCORE становится возможной при энергии гамма-квантов более 40 ТэВ.

В эксперименте TAIGA-IACT будут задействованы пять атмосферных черенковских телескопов. Три телескопа были введены в эксплуатацию в 2016, 2019

и 2022 гг. и установлены в вершинах треугольника со сторонами приблизительно 300, 400 и 500 м (см. рис. 1). В 2025 г. был введен в эксплуатацию четвертый телескоп.

Каждый телескоп оснащен составным зеркалом конструкции Дэвиса-Коттона диаметром 4.3 м и фокусным расстоянием 4.75 м. В фокальной плоскости телескопа установлена регистрирующая камера, содержащая около 600 фотоумножителей (ФЭУ) с диаметром фотокатода 15 мм. Угол обзора камеры составляет 9.6°, угловой размер пикселя — 0.36° [3].

Камеры телескопов TAIGA-IACT требуют регулярной калибровки фотоумножителей и измерительных трактов для получения надежных экспериментальных данных. После окончательной сборки и установки камеры на телескоп калибровка фотоумножителей и измерительных каналов электроники вносится в общее расписание наблюдений за источниками и проводится несколько раз в месяц для получения коэффициентов преобразования из кодов АЦП в количество фотоэлектронов (ф.э.) и коэффициентов относительной квантовой чувствительности фотоумножителей и мониторинга общего состояния камеры.

В настоящей работе описываются методы калибровки фотоумножителей и измерительных каналов в регистрирующей камере третьего атмосферного черенковского телескопа TAIGA-IACT. Коэффициенты для преобразования кодов АЦП в количество фотоэлектронов, а также коэффициенты относительной квантовой чувствительности фотоумножителей были получены путем калибровки, проведенной в марте 2024 г., с использованием наносекундного источника света.

* alexandra.panfiorova@hotmail.com

† nima.lubsandorzhev@yandex.ru

‡ elkr@yandex.ru

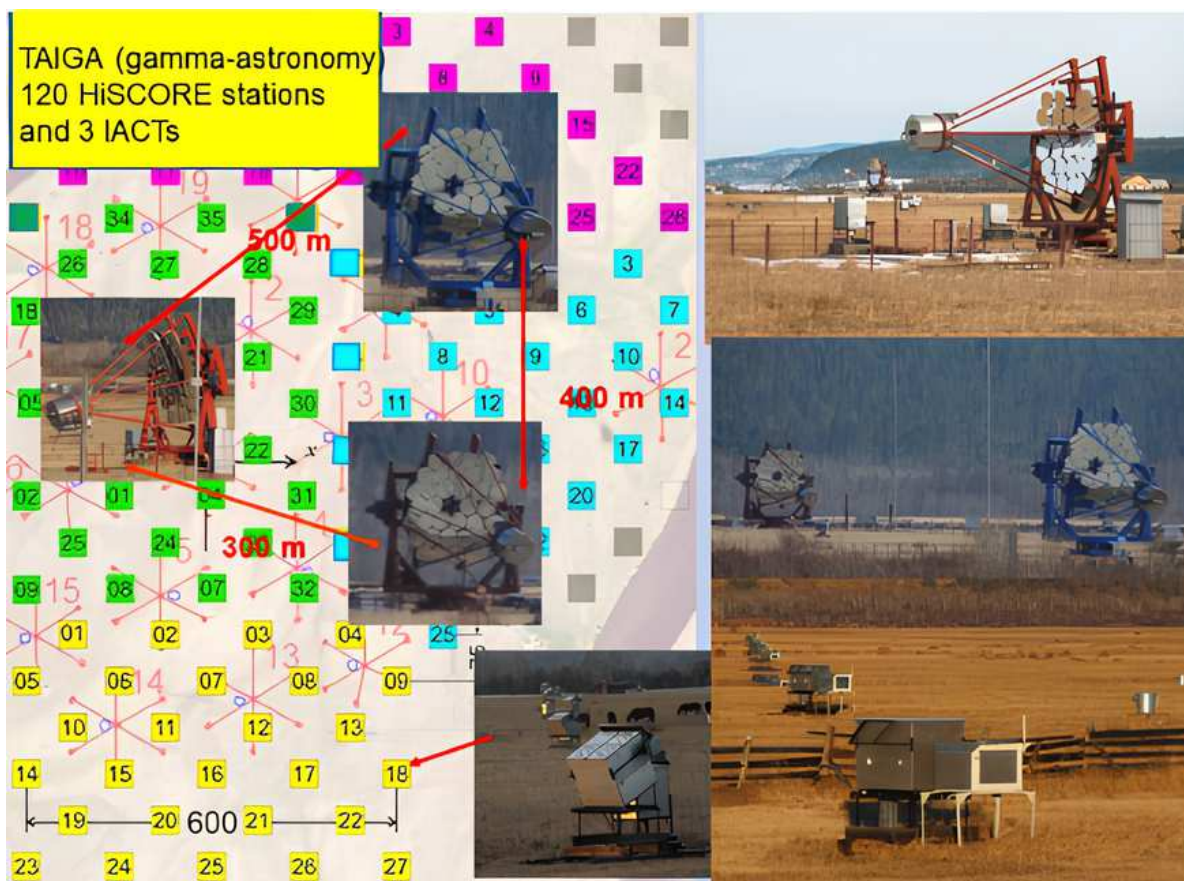


Рис. 1. Расположение детекторов комплекса TAIGA. Цветными квадратами обо значены станции TAIGA-HiSCORE

1. РЕГИСТРИРУЮЩАЯ КАМЕРА TAIGA-IACT

Камера черенковского телескопа TAIGA-IACT [4] состоит из 600 фотоумножителей с диаметром фотокатода 15 мм и коэффициентом усиления приблизительно $1 \cdot 10^5$. Фотоумножители оснащены конусами Винстона для увеличения эффективной площади фотокатода в 4 раза и снижения влияния фоновой паразитной засветки. Геометрия конуса обеспечивает угол обзора пикселя приблизительно 27° , что соответствует охвату всей поверхности зеркала телескопа.

Фотоумножители группируются в кластеры по 28 штук. Регистрация сигналов осуществляется кластерной электроникой на базе микросхем ASIC MAROC3 [5]. Для расширения динамического диапазона сигнал каждого фотоумножителя измеряется двумя каналами с различными коэффициентами усиления. Канал с высоким усилением регистрирует сигналы амплитудой до 150 фотоэлектронов, а канал с низким усилением охватывает диапазон от 150 до 3000 фотоэлектронов.

2. КАЛИБРОВКА ФЭУ С ПОМОЩЬЮ НАНОСЕКУНДНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА

При анализе изображений ШАЛ, полученных в регистрирующей камере атмосферного черенковского телескопа, амплитуда сигнала фотоумножителей рассчитывается в единицах фотоэлектронов. Поэтому необходимо определить коэффициенты преобразования кодов АЦП в количество фотоэлектронов для каждого фотоумножителя. Кроме того, существует различие как в квантовой эффективности фотокатодов, так и в эффективности сбора конусов Уинстона, которое приводит к неоднородности отклика фотоумножителей в единицах фотоэлектронов на равномерную засветку [6]. Чтобы более корректно оценивать общее количество фотоэлектронов в событии, или сайз, важно учитывать различия в чувствительности пикселей.

Для этой задачи используются калибровочные источники света наносекундной длительности, которые устанавливаются в центре зеркал телескопов и с равномерностью не хуже 2% засвечивают всю камеру.



Рис. 2. Кластер из 28 фотоумножителей (слева) и микросхема MAROC (справа)

2.1. Анализ калибровочных данных F-методом

Анализ калибровочных данных, полученных при срабатывании камеры от импульсного источника света, производится с помощью так называемого F-метода [7, 8]. В данном методе для каждого фотоумножителя находится среднее значение и среднеквадратичное отклонение величины заряда по светодиодным ($\bar{\mu}$ и $\bar{\sigma}$) и по пьедестальным событиям (\overline{ped} и $\bar{\sigma}_{ped}$). Среднее количество фотоэлектронов оценивается по следующей формуле:

$$N_{ph.e} = \frac{(\bar{\mu} - \overline{ped})^2}{\bar{\sigma}^2 - \bar{\sigma}_{ped}^2} \cdot F^2, \tag{1}$$

где $F^2 = 1 + \bar{\sigma}_{spe}^2 / \bar{\mu}_{spe}^2$ — это коэффициент excess noise factor, $\bar{\mu}_{spe}$ и $\bar{\sigma}_{spe}$ — среднее значение и среднеквадратичное отклонение величины заряда, производимого одним фотоэлектроном [9]. По результатам лабораторных измерений средняя величина коэффициента F^2 для фотоумножителей TAIGA-IACST составляет приблизительно 1.3.

Распределение заряда по светодиодным событиям для HG-канала показано на рис. 3.

Число родившихся фотоэлектронов на фотокатодe при фиксированном числе фотонов есть случайная величина, подчиняющаяся закону Пуассона. При большом пуассоновском среднем распределение приобретает симметричную форму, и довольно точно аппроксимируется функцией Гаусса ($\bar{\mu}$ и $\bar{\sigma}$ — параметры аппроксимации).

Фоновая засветка от ночного неба вызывает дополнительные флуктуации сигнала фотоумножителей.

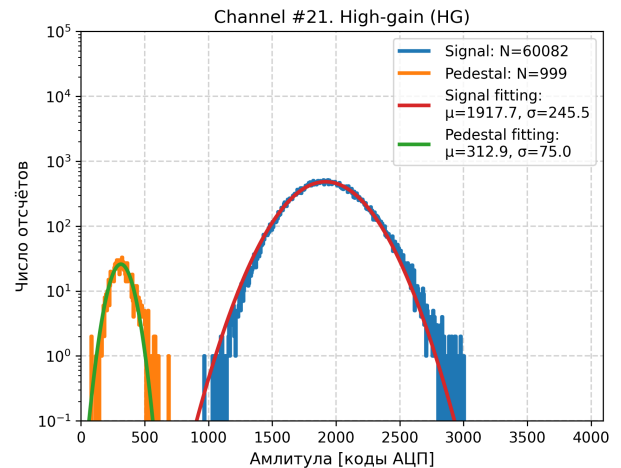


Рис. 3. Распределение заряда для канала с высоким коэффициентом усиления

Чтобы оценить вклад фона ночного неба в распределение сигнала фотоумножителя от светодиода, проводятся специальные пьедестальные измерения. С помощью генератора, встроенного в MAROC, запускается схема измерения заряда при выключенном светодиоде. Полученное распределение также аппроксимируется функцией Гаусса, по которой определяются параметры \overline{ped} и $\bar{\sigma}_{ped}$, используемые далее в расчёте числа фотоэлектронов.

По диапазону с высоким коэффициентом усиления HG можно с хорошей точностью оценить число фотоэлектронов по формуле (1), в то время как спектр по

LG получается сильно узким, и оценка числа ф.э. по такой методике не представляется возможной.

Амплитуда в кодах, соответствующая одному фотоэлектрону, определяется следующим образом:

$$G_{HG/LG} = \frac{(\bar{\mu} - \overline{ped})_{HG/LG}}{N_{ph.e}}, \quad (2)$$

это и есть калибровочный коэффициент, который позволяет перейти от кодов АЦП к числу ф.э. Амплитудное распределение коэффициентов пересчёта представлено на рис. 4.

2.2. Относительная чувствительность ФЭУ

Коэффициенты пересчёта из кодов АЦП в число фотоэлектронов, полученные в предыдущем разделе, обеспечивают калибровку коэффициентов усиления измерительных каналов. Однако при анализе изображений широких атмосферных ливней необходимо учитывать, что различные пиксели камеры могут регистрировать различное число фотоэлектронов при одной и той же плотности потока фотонов. Это обусловлено разбросом квантовой эффективности фотокатодов фотоумножителей и эффективностью светосбора конусов Винстона. Поскольку коэффициенты пересчёта из кодов АЦП в фотоэлектроны компенсируют только разброс коэффициентов усиления фотоумножителей и электронной части измерительного тракта, для выравнивания отклика пикселей камеры (flat-fielding) [10] вводится поправка на относительную чувствительность пикселей.

Исключая неисправные по разным причинам пиксели: отсутствие сигнала или нестабильность ФЭУ — рассчитывается среднее значение числа фотоэлектронов по камере. Отношению числа фотоэлектронов в каждом пикселе к этому среднему значению характеризует относительную чувствительность пикселя:

$$sense = \frac{N_{ph.e}}{\langle N_{ph.e} \rangle}, \quad (3)$$

Относительная чувствительность обеспечивает переход к скорректированному числу фотоэлектронов:

$$N_{corr} = \frac{N_{ph.e}}{sense}, \quad (4)$$

Распределение чувствительности (см. рис. 5) даёт оценку однородности регистрирующей камеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена калибровка камеры TAIGA-IACST по данным засветки наносекундным импульсным

источником света. С использованием F-метода получены коэффициенты пересчёта зарядов из кодов АЦП

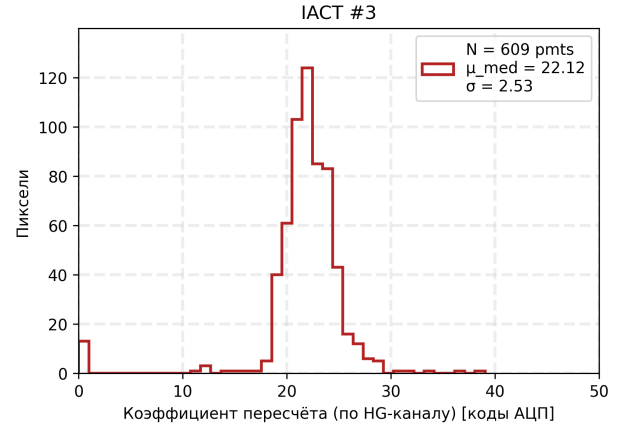


Рис. 4. Гистограмма коэффициентов пересчёта из кодов АЦП в число фотоэлектронов для HG-каналов по всей камере

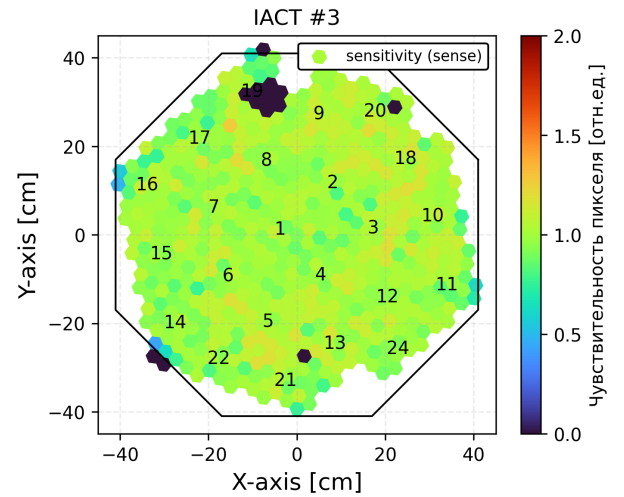


Рис. 5. Распределение относительной чувствительности по положению пикселя

в число фотоэлектронов для каналов с высоким и низким коэффициентами усиления, а также рассчитаны коэффициенты относительной чувствительности пикселей, компенсирующие разброс квантовой эффективности фотокатодов и эффективности светосбора конусов Винстона. Полученный набор калибровочных коэффициентов используется при обработке экспериментальных данных для перевода сигналов в фотоэлектроны и определения суммарного числа фотоэлектронов в событии.

Дальнейшая работа будет направлена на регулярный мониторинг временной стабильности калибровочных коэффициентов, формализацию критериев исключения нестабильных пикселей и калибровку интегральной чувствительности телескопов.

- [1] *Hillas A.* // Proc. 19th Int. Cosmic Ray Conf. **3**. 445 (1985).
- [2] *Свешникова Л.Г.* и др. // Изв. РАН. Сер. физ. **87**, № 7. 966 (2023).
- [3] *Kuzmichev L.* et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. **952**. 161830 (2020).
- [4] *Lubsandorzhev N.* et al. // Proc. 35th Int. Cosmic Ray Conf. **301**. 0757 (2017).
- [5] *Kompaniets K.*, *TAIGA Collaboration.* Development of front-end electronics of TAIGA-IACT. М., 2019. https://iscra2019.mephi.ru/content/public/files/posters/Poster_4_07_KompanietsK.pdf.
- [6] *Свешникова Л.Г.* и др. // Изв. РАН. Сер. физ. **83**, № 8. 1061 (2019).
- [7] *Mirzoyan R.* // Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf. **7**. 265 (1997).
- [8] *Kobayashi Y.* et al. // Proc. 37th Int. Cosmic Ray Conf. **395**. 0720 (2021).
- [9] *Hao W.* et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. **315**. 349 (1992).
- [10] *Aharonian F.* et al. // Astropart. Phys. **22**, N 2. 109 (2004).

Calibration of the TAIGA-IACT imaging Camera with a nanosecond pulsed LED light source

A. T. Panfiorova^{1a}, N. B. Lubsandorzhev^{2b}, E. E. Korosteleva^{2c}

¹*Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University.*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^a*alexandra.panfiorova@hotmail.com*, ^b*nima.lubsandorzhev@yandex.ru*, ^c*elkrs@yandex.ru*

The imaging atmospheric Cherenkov telescopes of the TAIGA-IACT experiment are part of the TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) astrophysical complex. Each TAIGA-IACT telescope is equipped with a segmented mirror in the Davis-Cotton design with a diameter of 4.3 m. An imaging camera is installed in the focal plane of the telescope, consisting of approximately 600 photomultiplier tubes (PMTs) with a photocathode diameter of 15 mm. The imaging cameras of the atmospheric Cherenkov telescopes require regular calibration of the PMT parameters and the electronic readout chains to ensure the reliability of experimental data. This work describes the methods used to calibrate the PMTs and the readout channels of the imaging camera of the third TAIGA-IACT atmospheric Cherenkov telescope. The conversion factors from ADC counts to the number of photoelectrons, as well as the relative quantum sensitivity coefficients of the PMTs, were obtained using a nanosecond light source during a calibration carried out in March 2024.

PACS: 95.55.Ka, 29.40.Ka

Keywords: calibration of PMTs, IACT.

Received 10 June 2025.

Сведения об авторах

1. Панфиорова Александра Тимуровна — студентка; e-mail: alexandra.panfiorova@hotmail.com.
2. Лубсандоржиев Нима Булатович — науч сотрудник лаборатории наземной гамма-астрономии; e-mail: nima.lubsandorzhev@yandex.ru.
3. Коростелева Елена Евгеньевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории наземной гамма-астрономии; e-mail: elkrs@yandex.ru.