

Установка TAIGA–IACT: разработка нового метода юстировки зеркал и критерия отбора экспериментальных данных

А. Д. Иванова^{1,2,*}, Д. П. Журов^{1,3,†} от имени коллаборации TAIGA

¹Иркутский государственный университет, Научно-исследовательский институт прикладной физики
Россия, 664003, г. Иркутск, бул. Гагарина, 20

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³Иркутский национальный исследовательский технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

(Поступила в редакцию 07.11.2022; подписана в печать 03.12.2022)

Атмосферные черенковские телескопы (АЧТ) установки TAIGA–IACT входят в состав астрофизического комплекса TAIGA, расположенного в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), в 50 км от озера Байкал. Комплекс представляет собой гибридную систему детекторов и создается для решения широкого круга фундаментальных задач физики космических лучей и гамма-астрономии. В статье приведен результат юстировки первого АЧТ при помощи нового, в рамках установки TAIGA–IACT, метода Боке. Также представлен разработанный критерий отбора экспериментальных данных на основе параметра предельной звездной величины.

PACS: 95.75.-z, 96.50.S-, 96.50.sd

УДК: 524.1.

Ключевые слова: TAIGA–IACT, космические лучи, гамма-астрономия, юстировка зеркал, предельная звездная величина.

ВВЕДЕНИЕ

Астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays physics and Gamma Astronomy) [1] предназначен для проведения исследований в области физики космических лучей и гамма-астрономии методом регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Уникальная особенность комплекса состоит в объединении в единую систему установок с детекторами разного типа. Так, в настоящее время в его состав входят широкоугольная установка TAIGA–HiSCORE [2], сцинтилляционная установка TAIGA–Muon [3] и 3 атмосферных черенковских телескопа (АЧТ) установки TAIGA–IACT [4]. Основными задачами комплекса являются изучение энергетического спектра и массового состава заряженных космических лучей в диапазоне энергий 100 ТэВ–1000 ПэВ, поиск диффузного гамма-излучения свыше 100 ТэВ и исследование локальных источников гамма-квантов с энергиями более 30 ТэВ.

При исследовании локальных источников гамма-квантов используется принципиально новый подход, заключающийся в совместной работе установок TAIGA–HiSCORE и TAIGA–IACT. При этом параметры зарегистрированных ШАЛ и первичного космического излучения с высокой точностью восстанавливаются по экспериментальным данным установки TAIGA–HiSCORE, а выделение гамма-кандидатов из преобладающего фона заряженных частиц (протоны и более тяжелые ядра) основано на работе АЧТ. Процесс гамма-адронного разделения является

весьма нетривиальным и при его реализации необходимо проведение тонкой настройки и калибровки всех систем АЧТ и корректной обработки получаемых экспериментальных данных.

Статья имеет следующую структуру. В разд. 2 кратко описывается установка TAIGA–IACT. В разд. 3 представлен новый для установки TAIGA–IACT метод Боке, с помощью которого апробирована юстировка зеркал первого АЧТ. Приведено сравнение с другими существующими способами юстировки, указаны перспективы использования метода Боке на других АЧТ установки TAIGA–IACT. Разд. 4 содержит описание разработанного метода отбора зарегистрированных событий на основе параметра предельной звездной величины и результаты анализа экспериментальных данных с его использованием.

1. УСТАНОВКА TAIGA–IACT

Телескопы TAIGA–IACT установлены на альтимутальной монтировке и состоят из тарелки сегментированных зеркал дизайна Дэвиса-Коттона [5] и регистрирующей черенковской камеры на основе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) (рис. 1). Диаметр каждого зеркала составляет 60 см, общая площадь тарелки — 9.5 м² и фокусное расстояние телескопа — 4.75 м [6].

Черенковские камеры обеспечивают угловой обзор 9.6° × 9.6° и включают в себя матрицы, состоящие из 560, 595 и 602 ФЭУ (пикселей) соответственно. Каждый пиксель обладает угловым размером 0.36° и оснащен конусом Винстона, увеличивающим площадь светосбора приблизительно в 4 раза [7]. Вся матрица черенковской камеры разделена на кластеры по 28 ФЭУ.

* alexandra.ivanova@astroparticle.online

† sidney28@ya.ru



Рис. 1. Изображения первого АЧТ установки TAIGA-IACT (а) и черенковской камеры (б)

Для контроля положения телескопов во время наблюдений на их тарелках дополнительно установлены CCD-камеры, а по периметру фронтальной стороны каждой черенковской камеры располагаются 8 светодиодных источников света.

При автономной работе одного АЧТ энергетический порог регистрации гамма-квантов составляет 3 ТэВ. При энергии частиц выше 10 ТэВ возможно применение стереоскопического подхода, в котором черенковский свет ШАЛ детектируется двумя или более телескопами. Область энергий более 40 ТэВ исследуется в гибридном режиме при совместной работе АЧТ и оптических станций установки TAIGA-HiSCORE [8].

2. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА БОКЕ В РАМКАХ УСТАНОВКИ TAIGA-IACT

Для получения четкого изображения в камерах АЧТ и последующей корректной оценки параметров зарегистрированных событий и гамма-адронного разделения крайне важно использовать правильно настроенную оптику телескопа. Для этого при юстировке зеркал необходимо минимизировать PSF (Point spread function, функция расеяния точки) [9].

2.1. Методы юстировки зеркал

Юстировка телескопов может осуществляться несколькими методами, такими как: выравнивание на двойном фокусном расстоянии [10], слежение за звездой [11], использование удаленного источника света [12] и метода Боке [13]. Первый метод не применим на установке TAIGA-IACT, поскольку центральные зеркала телескопов оказываются затенены черенковскими камерами, что не дает возможности поставить их в нужное положение. Метод слежения за звездой также трудно реализуем, потому как требует наличия специального дорогостоящего оборудования для дистанционного управления ориентацией зеркал.

Использование удаленного источника света в качестве метода выравнивания зеркал в настоящее время применяется на установке TAIGA-IACT (рис. 2).

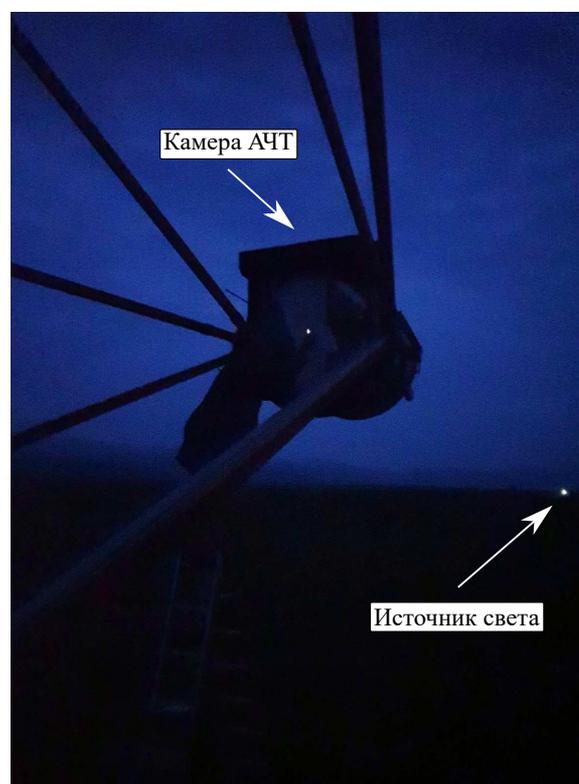


Рис. 2. Процесс юстировки методом наведения на удаленный источник

Для реализации используется процедура, включающая в себя 3 этапа:

- нацеливание телескопа точно на источник, располагающийся на расстоянии порядка 800 метров;
- передвижение камеры для фокусировки на источник света;

- регулирование зеркал для получения точечного изображения.

На крайнем этапе возникает сложность: на экране трудно определить, какому изображению соответствует конкретное зеркало — появляется необходимость обнаруживать местоположение каждого вручную. При отсутствии управляющих приводов и количественной оценки качества установки отдельных сегментов вся эта процедура выполняется по субъективной оценке.

Устройство юстировки по Боке заключается в том, что на небольшом расстоянии от телескопа располагается источник света, а на экране, размещенном не в фокусе, видны изображения каждого сегмента рефлектора. Метод менее геометрически ограничен, чем метод юстировки на двойном фокусном расстоянии: имеет меньше проблем с затенением, не требует большого количества специального оборудования, однако дает информацию об отдельных зеркальных сегментах и его можно проводить даже в ранних сумерках.

2.2. Применение метода Боке на телескопе ФАСТ

Метод Боке был реализован в 2014 году на телескопе ФАСТ [13], находящемся на Канарском острове Ла-Пальма, Испания и построенном по дизайну: 1/2 Дэвис-Коттон, 1/2 парабола.

Для получения шаблона зеркал была сделана фотография тарелки телескопа и, с использованием приближения тонкой оптики, вычислено расстояние до источника g по следующей формуле:

$$\frac{r_b}{r_a} = 1 - d \times \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{g} \right), \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние, b — расстояние от телескопа до изображения, g — расстояние от линзы до источника, r_b — радиус изображения и r_a — радиус апертуры телескопа. Полученный шаблон разместили на экране, который находился перед черенковской камерой, направили телескоп на источник света и получили изображения зеркал. При реализации метода Боке итоговый результат оказался несколько хуже (~5%) по сравнению со способом выравнивания зеркал на двойном фокусном расстоянии.

2.3. Расчет шаблона для телескопов TAIGA–IACT

Оптика Дэвиса-Коттона, используемая на телескопах TAIGA–IACT, является более сложной, чем модель тонкой линзы, поэтому компьютерное моделирование является единственным способом получения более точного шаблона зеркал.

Шаблон был получен с помощью программы имитационного моделирования [14]. Программа учитывает все параметры установки TAIGA–IACT: размеры зеркал, расположение фокальной плоскости для каждого

телескопа, размещение источника света, число фотонов. Шаблон изображения зеркал на фокальной плоскости телескопа представлен на рис. 3.

2.4. Обработка снимков с CCD-камеры

Для применения шаблона использовалась помещенная на тарелке телескопа CCD-камера Prosilica GC1380, которая предназначена для позиционирования телескопа и установлена таким образом, чтобы в поле зрения попадала черенковская камера [2].

Для корректного наложения полученных контуров зеркал на CCD-изображение была проведена ее калибровка благодаря реализации эксперимента с шахматной доской (ШД). Процесс калибровки происходил по следующему алгоритму: были определены мировые координаты точек шаблона ШД, связанные с координатами точек на черенковской камере. Произведено несколько снимков в разных местах CCD-камеры (рис. 4), по которым, используя функции, взятые из библиотек алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений OpenCV [15], вычислены углы и координаты клеток шахматной доски, а затем внутренние параметры камеры и дисторсии [16]. Для дальнейшего анализа брались неискаженные изображения.

Тогда для преобразования контуров на снимок описываются выражением (2):

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \end{pmatrix} + t, \quad (2)$$

где x_c, y_c — координаты в СК камеры, x_w, y_w — в мировой СК, A и t — матрица преобразования и вектор перемещения соответственно [16]. Для нахождения A и t потребовалось сопоставить мировые координаты с координатами на CCD-снимке с помощью линейной регрессии.

2.5. Проведение эксперимента и полученные результаты

Эксперимент по применению метода был выполнен в темное время суток на первом телескопе установки TAIGA–IACT. Источник света устанавливался на расстоянии, рассчитанном по формуле (1), чтобы размер изображения на экране был порядка 800 мм, т.е. приблизительно равен размеру детектора черенковской камеры. Для юстировки центральных зеркал, в силу затенения их черенковской камерой, телескоп опускался и поднимался на 3° от направления на источник. Далее изображения зеркал сопоставлялись под шаблон контуров.

Для того чтобы сравнить существующую юстировку с методом Боке, анализировались изображения CCD-камеры при слежении за звездой с экраном, установленным в фокусе телескопа. В качестве оценки PSF использовался параметр r_{RMS} [9], определяемый по фор-

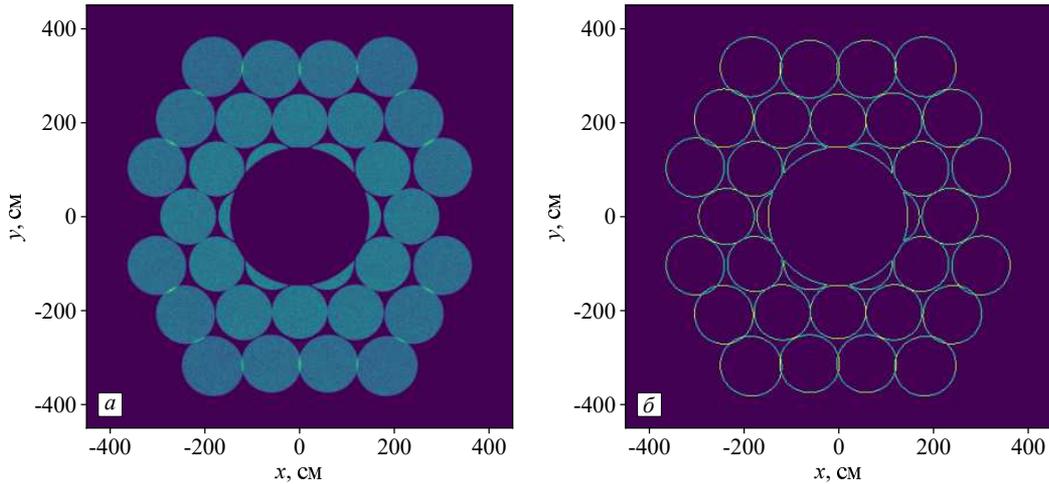


Рис. 3. Изображение зеркал на экране, полученное в результате компьютерного моделирования (а), и извлеченные контуры отдельных сегментов рефлектора (б)



Рис. 4. Пример изображения, использующегося для калибровки камеры

муле (3):

$$r_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i N_i r_i^2}{\sum_i N_i}}, \quad (3)$$

где N_i — интенсивность i -ого пикселя изображения пятна на экране, а r_i — расстояние от центра масс изображения до i -ого пикселя. Расчет r_{RMS} был выполнен по данным наведения на Капеллу — самую яркую звезду в созвездии Возничего, до и после юстировки (рис. 5).

Окончательный результат показал, что изображение пятна ухудшилось на 15% по сравнению с методом наведения на удаленный источник. В связи с этим были выдвинуты следующие гипотезы, которые могли повлиять на итог:

- Принятие решения о правильности установки

зеркала принималось на основе субъективной оценки;

- Реальные положения сегментов зеркал сильно отличаются от расчетных;
- Погрешность в измерении расстояний, использованных при расчетах.

В настоящее время продолжают работы по улучшению точности метода.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сеансы наблюдений АЧТ для получения качественных данных должны проводиться в ясные безлунные ночи. На установке TAIGA-IACST по снимкам CCD возможно выполнять оценку прозрачности атмосферы, поскольку в поле зрения CCD-камеры попадает звездное небо, и использовать ее в качестве отбора событий при анализе данных.

3.1. Режим наблюдений

Для наблюдения за источником гамма-квантов на телескопах TAIGA-IACST применяется «гуляющий» (англ. Wobble) режим [17, 18]. Телескоп TAIGA-IACST отслеживает источник, но наводится не прямо на него, а со смещением по RA (англ. right ascension - прямое восхождение) в $1.2 \text{ sec(Dec)}^\circ$ в обе стороны, перенаводясь каждые 20 мин. Таким образом источник оказывается не в центре камеры, а перемещается по окружности с радиусом 1.2° .

Для оценки фона космических лучей вводится антиисточник (или антиисточники), который находится на той же окружности, но с противоположной стороны от источника. При обработке данных анализируются

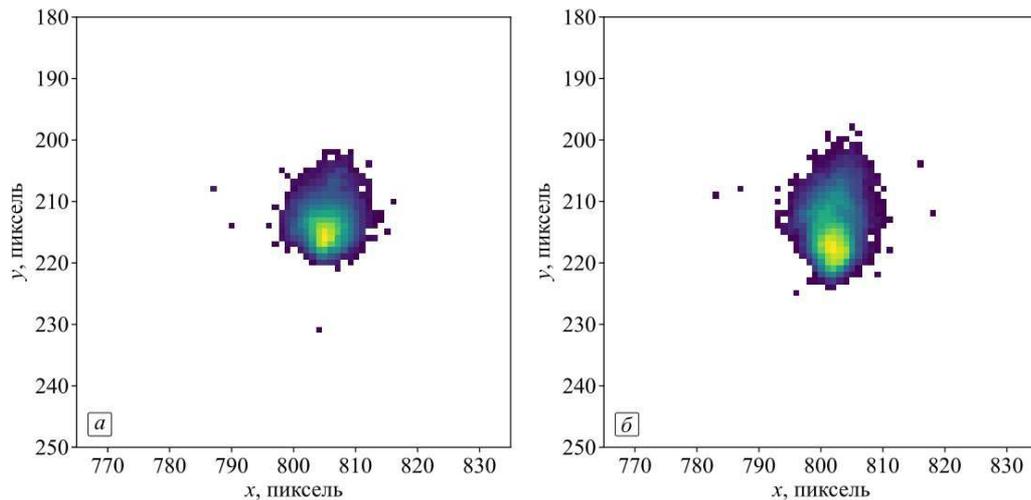


Рис. 5. Анализ результатов: изображение Капеллы на экране до (а) и после (б) юстировки

отобранные гамма-кандидаты относительно источника (on) и антиисточника (off). Превышение количества событий от источника свидетельствует о наличии гамма-излучения.

В отличие от других методов в «гуляющем» режиме источник всегда находится в поле видимости телескопа (т.е. не требуется тратить дополнительное время наблюдений для оценки фона космических лучей), измерения фона и сигнала проводятся в близких условиях, а периодические перенаведения позволяют минимизировать систематику, вызванную положением источника на камере [18].

3.2. Методика анализа данных

Как правило, процедура выделения гамма-квантов от адронов по данным телескопа, включает в себя следующие шаги [19]:

1. Качественный отбор: погодные условия, сбои в работе телескопа и т.д.

2. Вычет пьедесталов.

3. Очистка изображений (англ. image cleaning). Проводится для получения несмещенных оценок параметров изображений. В результате процедуры из дальнейшего анализа исключаются пиксели, зашумленные фоном ночного неба и не содержащие изображения ливня. Алгоритм проводит поиск всех пикселей со значением выше порога 14 ф.е. (фотоэлектрон). Кроме того, все пиксели выше порога 7 ф.е., соседствующие с пикселем выше порога 14 ф.е., остаются после очистки. Далее исключаются все одиночные пиксели, оставшиеся после первой итерации очистки.

4. Вычисление параметров изображения. Параметры Хилласа [20], введенные им в 1985 г. для анализа данных ИАСТ телескопа Уиппл [21], позволяют охарактеризовать изображение ШАЛ, которое, в первом

приближении, может быть аппроксимировано эллипсом на камере телескопа (рис. 6). К основным параметрам можно отнести: size — суммарное число фотоэлектронов в событии, length — большая полуось эллипса, width — малая полуось и azimuth — азимутальная ширина, dist — расстояние между центром изображения и источником, α — угол между главной осью эллипса и направлением на источник (антиисточник).

5. Гамма-адронное разделение (решение задач классификации первичной частицы).

3.3. Отбор качественных данных

Для отбора данных по погодным условиям предложен объективный критерий — предельная звездная величина (L). Для снимка CCD в качестве значения L была взята такая звездная величина m , что выполняется условие (4):

$$\frac{N_{ccd}(m)}{N_{catalog}(m)} = 0.4, \quad (4)$$

где $N_{ccd}(m)$ — количество звезд, обнаруженных на заданной области неба на снимке CCD и соответствующих каталогу со звездной величиной меньше m , $N_{catalog}(m)$ — количество звезд в каталоге со звездной величиной меньше m , попадающих в ту же область неба.

Для анализа экспериментальных данных в качестве источника гамма-квантов был выбран пульсар PSR B0531+21 в Крабовидной туманности и рассмотрен промежуток времени с октября 2019 по февраль 2020 г. (~ 170 ч наблюдений). Исключены данные с известными техническими проблемами. Рассчитан темп счета событий, прошедших условия по очистке изображений и имеющих параметр $size > 125$, за 2 мин CR (count

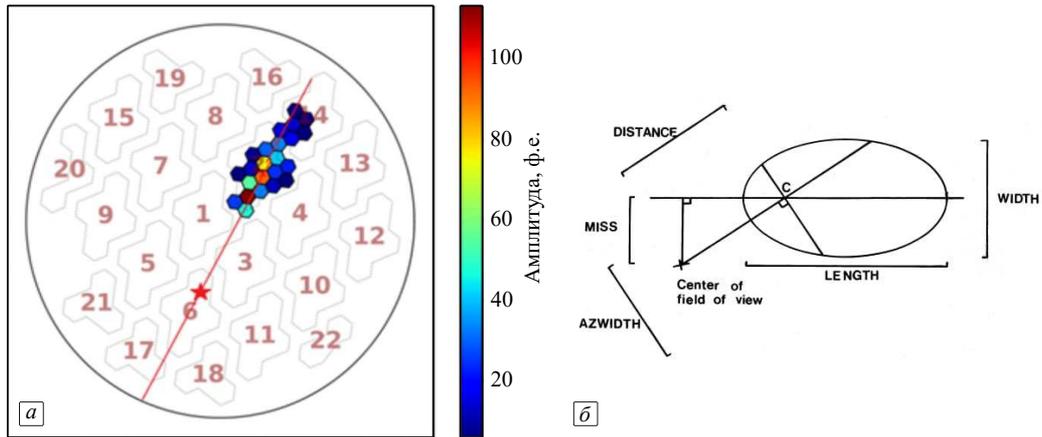


Рис. 6. Пример события от гамма-кванта на первом АЧТ установки TAIGA-IACT [22] (а) и графическое отображение параметров Хилласа [23] (б)

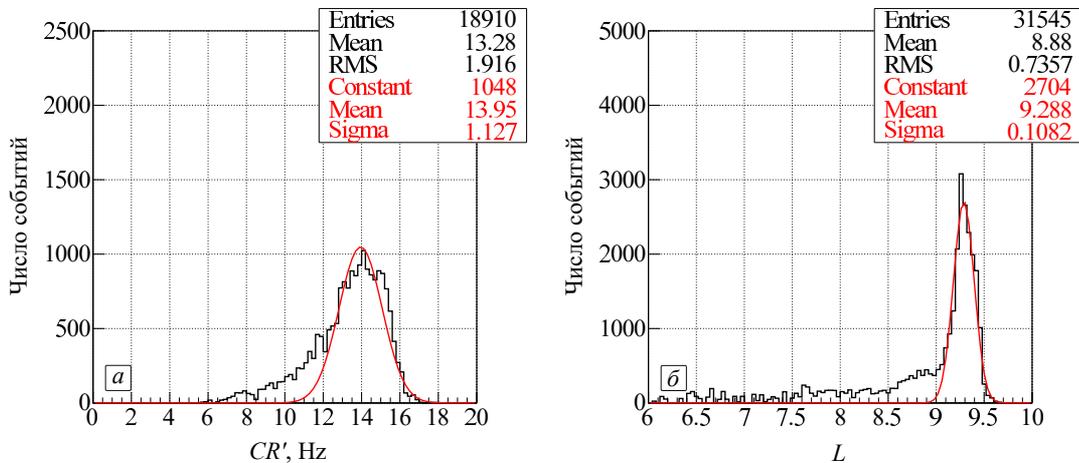


Рис. 7. Распределения нормированного темпа счета (а) и предельной звездной величины (б)

rate — темп счета), нормированный на зенитный угол Θ направления телескопа ($CR' = CR / \cos(\Theta)$).

Предполагая, что при одинаковых погодных условиях и состоянии аппаратуры нормированный параметр CR' и предельная звездная величина L распределены по нормальному закону, а большинство данных набраны при ясной погоде, были определены пороговые значения этих параметров, являющиеся критериями отбора событий. Распределения L и CR' представлены на рис. 7.

Исходя из полученных распределений выбраны условия на отбор событий, которые заключаются в нахождении значений параметров L и CR' в пределах 2σ относительно среднего значения (Mean) фитирующих функций: $10.9 < CR' < 16.7$, $9 < L < 9.5$. События, находящиеся за указанными пределами, могут быть отнесены к некорректной работе АЧТ либо низкой прозрачности атмосферы.

3.4. Анализ данных Крабовидной туманности

Простейшим способом оценки сигнала является распределение по углу α . Для Крабовидной туманности на вычисленные параметры Хилласа накладываются оптимальные условия, приведенные в статье [24]. На рис. 8 показаны распределения по α событий N_{on} (от источника) и N_{off} (от антиисточника) с шагом 2.5° .

В результате количество событий для данных, отобранных с ясными ночами по стандартному подходу в TAIGA [24], составило: $N_{on} = 409$ — направление на источник, $N_{off} = 259$ — направление на антиисточник.

Значимость, вычисленная по формуле из [25] (5)

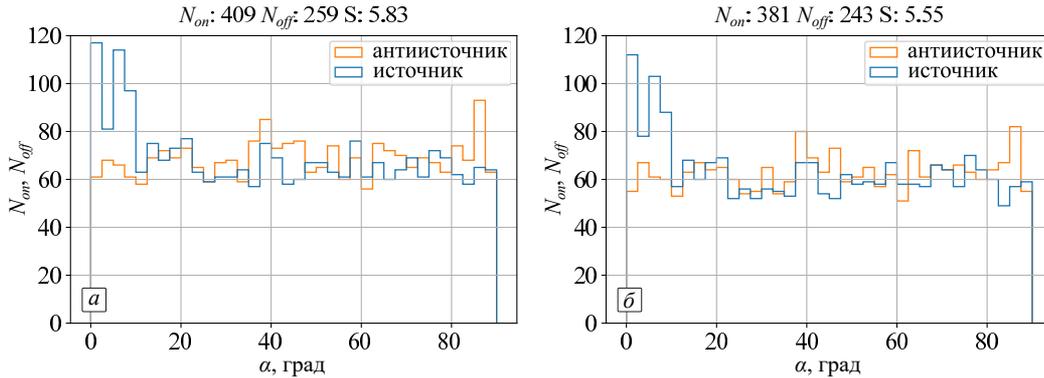


Рис. 8. Распределение по α для событий, отобранных по субъективной оценке прозрачности атмосферы (а), и с применением порогов на L (б)

оказалась равной 5.83σ :

$$S = \left(2N_{on} \ln \left[\frac{2N_{on}}{N_{on} + N_{off}} \right] + 2N_{off} \ln \left[\frac{2N_{off}}{N_{on} + N_{off}} \right] \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Для данных, отобранных с использованием порогов на L , количество: $N_{on} = 381$, $N_{off} = 243$, значимость составила 5.55σ . Видно, что разница в конечном результате оказалась незначительной $\sim 5\%$. Обработка с помощью применения порогов может использоваться при анализе данных и требует рассмотрения на других временных промежутках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе первой части работы проделан обзор существующих методов юстировки и выбран наиболее оптимальный для применения на установке TAIGA-IACT. С помощью имитационного моделирования получен шаблон зеркал, проведен эксперимент на первом АЧТ и сделан следующий вывод: для повышения точности юстировки по методу Боке дополнительно проводить количественную оценку отклонения положения зеркала от шаблона по снимкам ССД. Процедура юстировки методом Боке менее ресурсозатратна, чем выравнивание методом на удаленный источник, поэтому в дальнейших планах усовершенствовать шаблон и разработать данную методику на остальных телескопах установки TAIGA-IACT.

Предложенный параметр предельной звездной величины во второй части работы является объективным критерием отбора экспериментальных данных установки TAIGA-IACT на первом этапе их анализа. Проведено исследование с выбором пороговых условий для конкретного временного интервала, а также получены результаты по их применению. В процессе реализации гамма-адронного разделения при построении распреде-

ления по параметру α выяснено, что найденные критерии отбора позволяют с достаточной точностью обнаружить поток гамма-квантов от точечного источника и требуют дальнейшего рассмотрения на других временных промежутках.

Авторы хотели бы упомянуть всех членов коллаборации TAIGA, которые внесли вклад в проведенные исследования:

И.И. Астапов⁴, П.А. Безъязыков¹, Е.А. Бонвеч², А.Н. Бородин³, Н.М. Буднев¹, А.В. Булан², А. Вайдянатан⁵, Н.В. Волков⁹, П.А. Волчугов², Д.М. Воронин⁶, А.Р. Гафаров¹, Е.О. Гресь¹, О.А. Гресь¹, Т.И. Гресь¹, О.Г. Гришин¹, А.Ю. Гармаш^{5,8}, В.М. Гребенюк^{3,10}, А.А. Гринюк³, А.Н. Дячок¹, А.В. Загородников¹, А.Л. Иванова^{1,5}, М.А. Илюшин¹, Н.Н. Калмыков², В.В. Киндин⁴, С.Н. Кирюхин¹, Р.П. Кокоулин⁴, Н.И. Колосов¹, К.Г. Компаниец⁴, Е.Е. Коростелева², В.А. Кожин², Е.А. Кравченко^{5,8}, А.П. Крюков², Л.А. Кузьмичев², А. Кьявасса¹¹, А.А. Лагутин⁹, М.В. Лаврова³, Ю.Е. Лемешев¹, Б.К. Лубсандоржиев⁶, Н.Б. Лубсандоржиев², С.Д. Малахов¹, Р.Р. Миргазов¹, Р.Д. Монхоев¹, Э.А. Окунева², Э.А. Осипова², А.Л. Пахоруков¹, А. Пан³, А.Д. Панов², Л.В. Паньков¹, А.А. Петрухин⁴, Д.А. Подгрудков², Е.Г. Попова², Е.Б. Постников², В.В. Просин², В.С. Птускин⁷, А.А. Пушнин¹, А.Ю. Разумов², Р.И. Райкин⁹, Г.И. Рубцов⁶, Е.В. Рябов¹, В.С. Самолига¹, И. Сатышев³, А.А. Силаев², А.А. Силаев(мл.)², А.Ю. Сидоренков⁶, А.В. Скурихин², А.В. Соколов^{5,8}, Л.Г. Свешникова², В.А. Таболенко¹, А.Б. Танаев¹, Б.А. Таращанский¹, М.Ю. Терновой¹, Л.Г. Ткачев^{3,10}, Н.А. Ушаков⁶, Д.В. Чернов² и И.И. Яшин⁴

¹Иркутский государственный университет, Научно-исследовательский институт прикладной физики. Россия, 664003, г. Иркутск, бул. Гагарина, 20.

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. Россия,

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

³Объединенный институт ядерных исследований. Россия, 141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6.

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31.

⁵Новосибирский национальный исследовательский государственный университет. Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

⁶Институт ядерных исследований Российской академии наук. Россия, 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

⁷Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН. Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4.

⁸Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН. Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

⁹Алтайский государственный университет. Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

¹⁰Университет «Дубна». Россия, 141980, г. Дубна ,

ул. Университетская, 19.

¹¹Физический факультет университета Турина и Национальный институт ядерной физики. Италия, г. Турин.

¹²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). Россия, 141701, г. Долгопрудный. Институтский пер., 9..

¹³Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Благодарности

Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ» (соглашение 13.УНУ.21.0007), поддержана Минобрнауки России (соглашение ЕВ-075-15-2021-675, гос. задание FZZE-2020-0024). Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Иркутского государственного университета для молодых ученых № 091-22-306.

-
- [1] *Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // Physics of Atomic Nuclei. 2021. 84. P. 362.*
- [2] *Zhurov D., Gress O., Sidorov D. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. 1181. P. 012045.*
- [3] *Pluczykont M., Astapov I., Barbashina N. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2015. 632. P. 012042.*
- [4] *Astapov I., Bezyazeev P., Borodin A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2019. 936. P. 254.*
- [5] *Tayabaly K., Spiga D., Canestrari R. et al. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2015. 9603. P. 43.*
- [6] *Lubsandorzhiyev N., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // PoS. 2018. ICRC2017. P. 757.*
- [7] *Budnev N., Kuzmichev L., Mirzoyan R. et al. // PoS. 2021. ICRC2021. P. 731.*
- [8] *Kuzmichev L., Astapov I., Bezyazykov P. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2020. 83. P. 1375.*
- [9] *Mirzoyan R., Arcaro C., Kellermann H., Garczarczyk M. // Astropart. Phys. 2019. 105. P. 1.*
- [10] *Toner J., Acciari V., Cesarini A. et al. // 30th International Cosmic Ray Conference. 2007. 3 P. 1401.*
- [11] *Cornils R., Gillessen S., Jung I. et al. // Astropart. Phys. 2003. 20. P. 129.*
- [12] *Pühlhofer G., Bolz O., Götting N. et al. // Astropart. Phys. 2003. 20. P.267..*
- [13] *Ahnen M., Baack D., Balbo M. et al. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2016. 9908. P. 99084O.*
- [14] *Grinyuk A., Postnikov E., Sveshnikova L. // Phys. Atom. Nucl. 2020. 83. P. 262.*
- [15] *Zhang B. // Adv.Mater.Res. 2011. 230 P. 723.*
- [16] *Strat T. // Readings in Computer Vision. 1987. P. 93.*
- [17] *Fomin V., Stepanian A., Lamb R. et al. // Astropart. Phys. 1994. 2. P. 137.*
- [18] *Bretz T., Dorner D., Riegel B. et al. // 29th International Cosmic Ray Conference. 2005. 8. P. 11.*
- [19] *Bretz T. // 29th International Cosmic Ray Conference. 2005. 4. P. 315.*
- [20] *Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // JINST. 2020. 15. P. C09031.*
- [21] *Reynolds P., Akerlof C., Cawley M. et al. // Astrophys. J. 1993. 404. P. 206.*
- [22] *Hillas A. // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1984. 22. P. 425.*
- [23] *Weekes T., Cawley M., Fegan D. et al. // Astrophys. J. 1989. 342. P. 379..*
- [24] *Sveshnikova L., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. 85. P. 398.*
- [25] *Li T., Ma Y. // Astrophys. J. 1983. 272. P. 317.*

TAIGA–IACT: development of a new mirror alignment method and selection criterion of experimental data

A. D. Ivanova^{1,2,a} and D. P. Zhurov^{1,3,b} (on behalf of the TAIGA collaboration)

¹*Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia*

³*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

E-mail: ^aalexandra.ivanova@astroparticle.online, ^bsidney28@ya.ru.

Atmospheric Cherenkov telescopes (IACT) of the TAIGA–IACT are part of the TAIGA astrophysical complex located in the Tunka Valley (Republic of Buryatia, Russia), 50 km from Lake Baikal. The complex is a hybrid system of detectors and is being created to solve a wide range of fundamental problems of cosmic ray physics and gamma-ray astronomy.

The report presents the result of the mirror alignment of the first TAIGA–IACT using a new, within the framework of the TAIGA–IACT, the Boke method. A criterion for selecting experimental data based on the limiting magnitude parameter is developed and present.

PACS: 95.75.-z, 96.50.S-, 96.50.sd.

Keywords: TAIGA–IACT, cosmic rays, gamma-astronomy, mirror alignment, limiting magnitude.

07 November 2022.

Сведения об авторах

1. Иванова Александра Денисовна — инженер-исследователь; e-mail: alexandra.ivanova@astroparticle.online.
2. Журов Дмитрий Павлович — мл. науч. сотрудник; e-mail: sidney28@ya.ru.