

Разработка методики анализа изображений для мониторинга зеркал установки TAIGA-IACT

© А.Д. Иванова,^{1,2} Д.П. Журов^{1,3}

¹Иркутский государственный университет,
Научно-исследовательский институт прикладной физики,
664003 Иркутск, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

³Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074 Иркутск, Россия
e-mail: 2013sasha68@gmail.com

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 5 сентября 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Представлено описание разработанной методики мониторинга положений зеркал атмосферных черенковских телескопов на основе метода Боке. Телескопы входят в состав единого экспериментального комплекса TAIGA, расположенного в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), в 50 km от озера Байкал. Приведены результаты анализа снимков CCD-камеры, установленной на тарелке первого телескопа и используемой для определения положения его сегментов.

Ключевые слова: TAIGA-IACT, метод Боке, гамма-астрономия, мониторинг зеркал.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56828.f238-23

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). Гибридный подход к исследованию первичного космического излучения, объединяющий в единую систему установки с детекторами разного типа, является уникальной особенностью комплекса. В настоящее время в его состав входят широкоугольная установка TAIGA-HiSCORE [2], сцинтилляционная установка TAIGA-Muon [3] и три атмосферных черенковских телескопа (АЧТ) установки TAIGA-IACT [4]. К основным задачам комплекса относятся: изучение энергетического спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий 100 TeV – 1000 PeV, поиск диффузного гамма-излучения свыше 100 TeV и исследование локальных источников гамма-квантов с энергиями более 5 TeV.

1. Телескопы установки TAIGA-IACT

Телескопы установки TAIGA-IACT, имеют на альт-азимутальной монтировке и состоят из сегментированного зеркала дизайна Дэвиса-Коттона и регистрирующей камеры на основе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) (рис. 1).

Для контроля положения телескопа во время наблюдений на тарелке установлена CCD-камера, а для устранения изморози на зеркалах в зимний период време-

ни — система обогрева зеркал. Отражатель состоит из отдельных сферических зеркал диаметром 60 см и имеет общую площадь отражающей поверхности 9.5 m². Фокусное расстояние телескопа составляет 4.75 m. Черенковская камера обеспечивает угловой обзор 9.6 × 9.6° и включает в себя ~ 600 ФЭУ (пикселей). Каждый пиксель обладает угловым размером 0.36°, входным отверстием 30 mm, выходным — 15 mm и оснащен конусом Винстона, увеличивающим площадь светосбора приблизительно в 4 раза. Более детальное описание камеры телескопа и ее характеристики могут быть найдены в [5].

АЧТ регистрируют изображение черенковского излучения, генерируемого каскадами релятивистских заряженных частиц, возникающих при взаимодействии первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы. Для получения четкого изображения в камерах АЧТ и последующей корректной оценки параметров ШАЛ и типа первичной частицы крайне важно использовать правильно настроенную оптику телескопа и проводить мониторинг ее состояния.

2. Использование метода Боке

Экспериментальные данные, на основе которых проводились разработка и тестирование методики мониторинга зеркал, были получены при помощи метода Боке [6]. Метод 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. Главным преимуществом этого метода по сравнению с другими [7,8] является

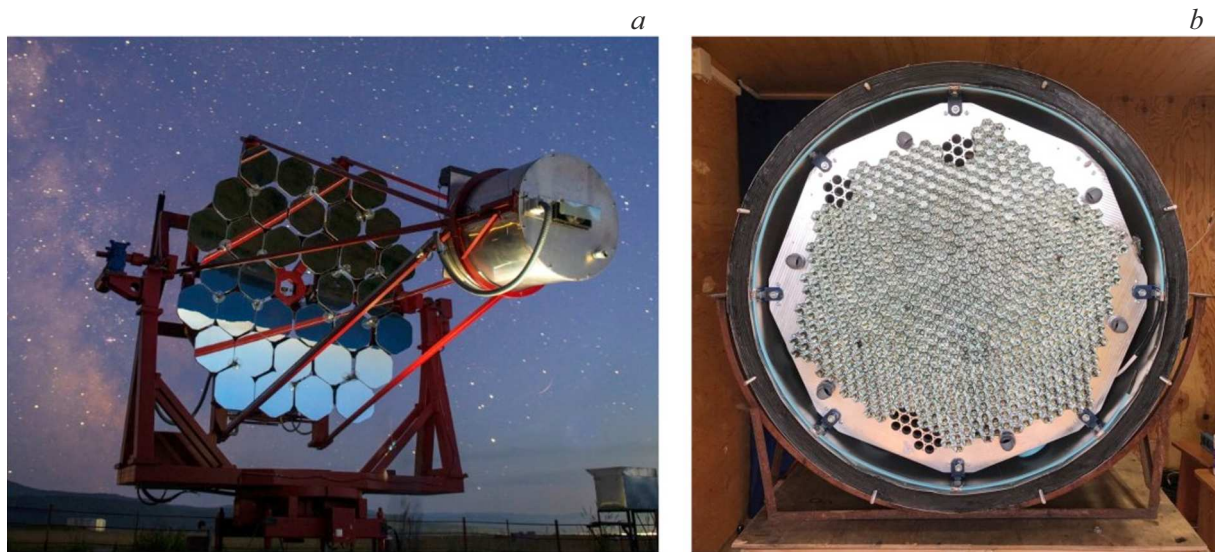


Рис. 1. Изображения второго АЧТ установки TAIGA-IACT (*a*) и черенковской камеры (*b*).

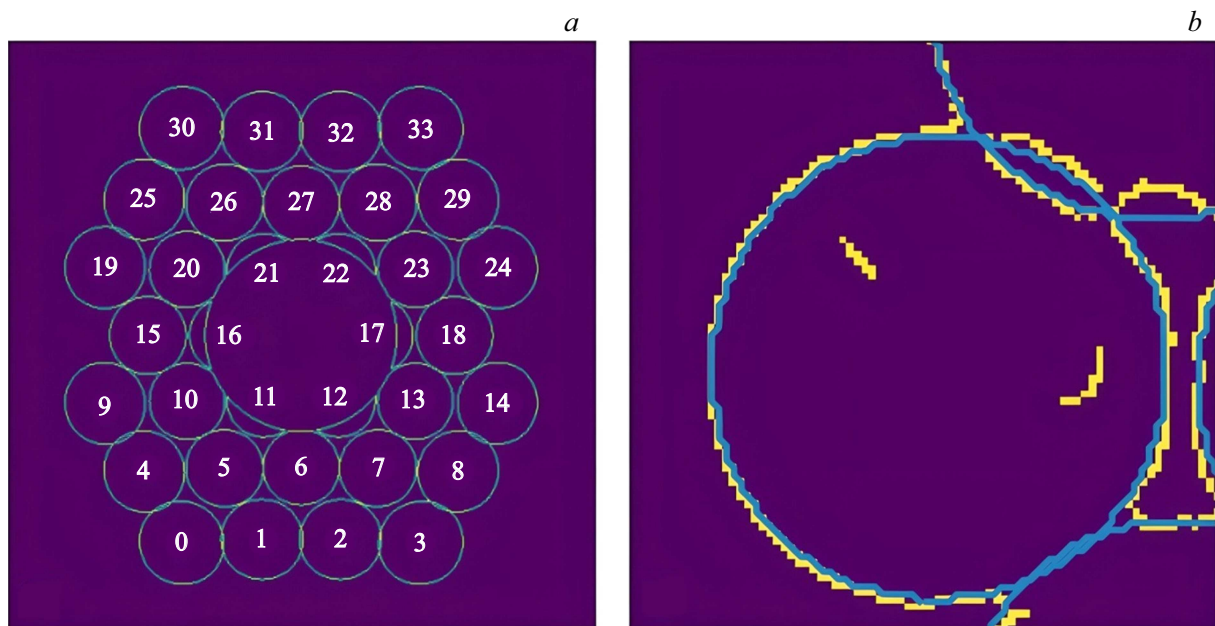


Рис. 2. *a* — изображение контуров зеркал, полученных в результате компьютерного моделирования; *b* — контур 9-го сегмента зеркал, полученный по CCD-камере (желтым цветом (в онлайн версии)) и рассчитанный по моделированию с поправками (синим цветом (в онлайн версии)).

наличие информации об отдельных зеркалах, а также возможность проведения измерений в ранних сумерках. Процедура набора экспериментальных данных состоит из нескольких этапов. На первом, телескоп направляется на источник света. Далее при помощи специально изготовленного экрана, находящегося не в фокусе телескопа и размещенного на фронтальной стороне черенковской камеры, фиксируются изображения зеркал. На тарелке телескопа располагается CCD-камера Prosilica GT1380, которая установлена таким образом, чтобы в поле зрения попадала вся черенковская камера. В качестве экспе-

риментальных данных служат изображения, полученные CCD-камерой при разных направлениях телескопа (для юстировки центральных зеркал, в силу затенения их черенковской камерой, телескоп опускался и поднимался на 4° от направления на источник).

3. Процедура мониторинга зеркал

Шаблон точного положения зеркал был получен с помощью компьютерного моделирования [9] и представлен на рис. 2, *a*. Программа учитывает все параметры

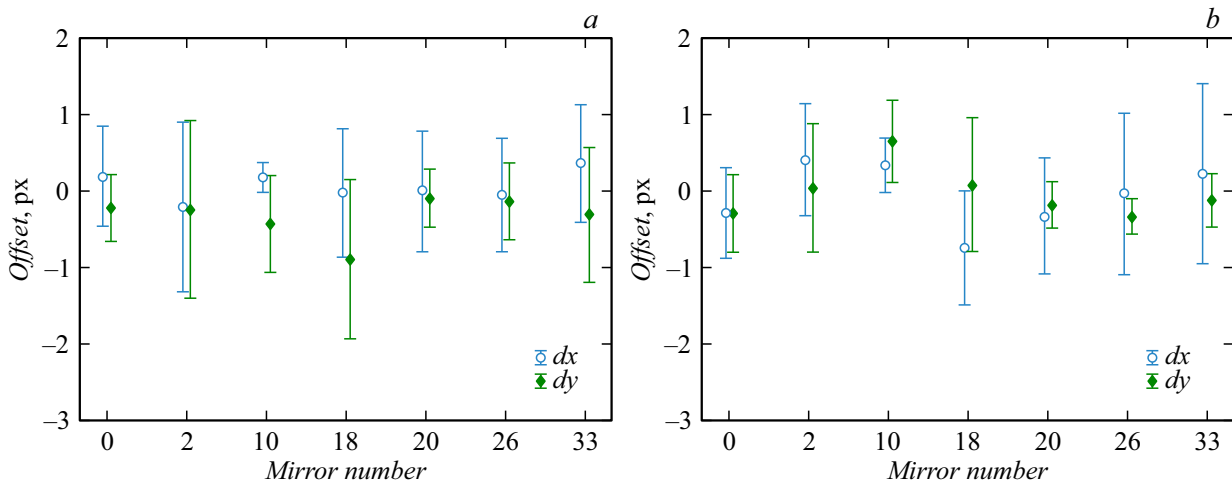


Рис. 3. Средние значения смещений по двум координатам за январь (a) и февраль (b) 2023 г. относительно декабря 2022 г.

установки TAIGA-IACT: размеры зеркал, расположение фокальной плоскости для каждого телескопа, размещение источника света, число фотонов. Программа, определяющая смещения зеркал, включает наложение идеального шаблона на CCD-изображение, из которого извлекаются контуры. Далее определяется сдвиг реального положения зеркала по сравнению с шаблоном. На рис. 2, b приведен контур зеркала с CCD-камеры, его выделенные контуры, а также контур, рассчитанный с помощью компьютерного моделирования с поправками, полученными численными методами. Поправки вычисляются на основании опорных измерений при правильно съюстированной оптике и необходимы в связи с тем, что в моделировании не учтены реальные небольшие смещения положений зеркал относительно идеальной конфигурации.

Для тестирования методики мониторинга зеркал были проанализированы изображения за декабрь 2022, январь и февраль 2023 года, которые содержат данные с пяти различных ракурсов телескопа по три изображения в каждом. На рис. 3 приведены средние значения смещений по двум координатам для семи зеркал, выбранных с разных сторон на тарелке телескопа, за январь и февраль 2023 года по сравнению с декабрем 2022 года. Во всех случаях погрешность измерений находится в пределах размера одного пикселя, а смещения в течение двух месяцев не превышают ошибок измерений.

Заключение

В ходе работы была разработана методика мониторинга положения зеркал по изображению с CCD-камеры с использованием метода Боке на телескопах TAIGA-IACT. Проведен ряд измерений и анализ экспериментальных данных для оценки смещений направлений зеркал. В дальнейшем планируется использовать полученную процедуру мониторинга сдвига зеркал на всех телеско-

пах установки TAIGA-IACT с целью их своевременной юстировки и изучения причин отклонений.

Финансирование работы

Работа выполнена на УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“ (соглашение ЕВ-075-15-2021-675), поддержана Министерством науки и высшего образования (проекты FZZE-2020-0024, FZZE-2023-0004), Российским научным фондом (грант 23-72-00019 (разд. 3)).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] И.И. Астапов, П.А. Безъязыков, М. Бланк, Е.А. Бонвеч, А.Н. Бородин, М. Брюкнер, Н.М. Буднев, А.В. Булан, А. Вайдянтаган, Р. Вишневецкий, Н.В. Волков, П.А. Волчуг, Д.М. Воронин, А.Р. Гафаров, О.А. Гресс, Т.И. Гресс, О.Г. Гришин, А.Ю. Гармаш, В.М. Гребенюк, А.А. Гринюк, А.Н. Дячок, Д.П.Журов, А.В. Загородников, А.Л. Иванова, Н.Н. Калмыков, В.В. Киндин, С.Н. Кирюхин, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, Е.Е. Коростелева, В.А. Кожин, Е.А. Кравченко, А.П. Крюков, Л.А. Кузьмичев, А. Кьявасса, А.А. Лагутин, М.В. Лаврова, Ю.Е. Лемешев, Б.К. Лубсандоржиев, Н.Б. Лубсандоржиев, Р.Р. Миргазов, Р. Мирзоян, Р.Д. Монхоев, Е.А. Осипова, А.Л. Пахоруков, А. Пан, М.И. Панасюк, Л.В. Паньков, А.А. Петрухин, Д.А. Подгрудков, В.А. Полещук, Е.Г. Попова, А. Порелли, Е.Б. Постников, В.В. Просин, В.С. Птускин, А.А. Пушкин, А.В. Разумов, Р.И. Райкин, Г.И. Рубцов, Е.В. Рябов, Я.И. Сагань, В.С. Самолига, И. Сатышев, А.А. Силаев, А.А. Силаев (мл.), А.Ю. Сидоренков, А.В. Скурихин, А.В. Соколов, Л.Г. Свешникова, Я.В. Суворкин, В.А.Таболенько, А.Б. Танаев, Б.А. Тарашанский, М.Ю. Терновой, Л.Г. Ткачев, М. Тлужиконт, Н.А. Ушаков, Д. Хорнс, Д.В. Чернов, И.И. Яшин. ЖЭТФ, **161** (4), 548 (2022). DOI: 10.31857/S0044451022040095

- [2] V. Prosin, I. Astapov, P. Bezyazeev, A. Borodin, M. Brückner, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Grinyuk, D. Horns, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, S. Kiryuhin, P. Kirilenko, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, L. Kuzmichev, A. Lagutin, Yu. Lemeshev, V. Lenok, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, E. Rjabov, G. Rubtsov, Y. Sagan, V. Samoliga, Yu. Semeny, A. Sidorenkov, A. Silaev, A. Silaev, A. Skurikhin, M. Slunicka, A. Sokolov, C. Spiering, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashansky, L. Tkachev, M. Tluczykont, N. Ushakov, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, V. Zurbanov, I. Yashin. EPJ Web Conf., **210** (6), 01003 (2019). DOI: 10.1051/epjconf/201921001003
- [3] I. Astapov, P. Bezyazeev, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Grinyuk, D. Horns, A. Ivanova, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, P. Kirilenko, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, M. Kunas, L. Kuzmichev, M. Lavrova, Y. Lemeshev, V. Lenok, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, R. Nachtigall, E. Osipova, A. Pakhorukov, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, E. Rjabov, G. Rubtsov, A. Pushnin, Y. Sagan, B. Sabirov, V. Samoliga, Y. Semeny, A. Silaev, J. Silaev, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, V. Slunicka, A. Sokolov, C. Spiering, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashansky, L. Tkachev, M. Tluczykont, A. Vaidyanathan, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, V. Zurbanov, I. Yashin. Nucl. Instrum. Meth. A, **936**, 254 (2019). DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.081
- [4] D. Zhurov, O. Gress, D. Sidorov, I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko, A. Borodin, N. Budnev, M. Brueckner, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, T. Gress, O. Grishin, A. Grinyuk, D. Horns, A. Ivanova, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, P. Kirilenko, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, M. Kunas, L. Kuzmichev, Yu. Lemeshev, V. Lenok, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, R. Nachtigall, E. Osipova, A. Pakhorukov, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, E. Rjabov, G. Rubtsov, A. Pushnin, Y. Sagan, B. Sabirov, V. Samoliga, Yu. Semeny, A. Silaev, A. Silaev junior, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, V. Slunicka, A. Sokolov, C. Spiering, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashansky, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Tluczykont, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, V. Zurbanov, I. Yashin. J. Phys.: Conf. Series, **1181** (1), 012045 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1181/1/012045
- [5] N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonvech, V. Boreyko, A. Borodin, M. Brückner, A. Bulan, D. Chernov, D. Chernykh, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, D. Horns, A. Ivanova, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, D. Kostunin, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, Yu. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, D. Podgrudkov, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Petrukhin, A. Pushnin, R. Raikin, E. Rjabov, G. Rubtsov, Y. Sagan, V. Samoliga, A. Sidorenkov, A. Silaev, A. Silaev (junior), A. Skurikhin, M. Slunicka, A. Sokolov, L. Sveshnikova, Y. Suvorkin, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashansky, L.M.Ternovoy, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Tluczykont, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, D. Voronin, R. Wischnewski, I. Yashin, A. Zagorodnikov, D. Zhurov. J. Instrum., **15** (9), C09031 (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/C09031
- [6] M.L. Ahnen, D. Baack, M. Balbo, M. Bergmann, A. Biland, M. Blank, T. Bretz, K.A. Bruegge, J. Buss, M. Domke, D. Dorner, S. Einecke, C. Hempfling, D. Hildebrand, G. Hughes, W. Luster, K. Mannheim, S.A. Mueller, D. Neise, A. Neronov, M. Noethe, A.-K. Overkemping, A. Paravac, F. Pauss, W. Rhode, A. Shukla, F. Temme, J. Thaele, S. Toscano, P. Vogler, R. Walter, A. Wilbert. *Astropart. Phys.*, **82**, 1 (2016). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2016.05.003
- [7] J. Toner, V. Acciari, A. Cesarini, G. Gillanders, D. Hanna, G. Kenny, J. Kildea, A. Mccann, M. Mccutcheon, M. Lang, P.T. Reynolds, M. Schroedter, A.W. Smith, J.T. Ward, T.C. Weeks, B. Zitzer. *Proceed. 30th Intern. Cosmic Ray Conf.*, **3**, 1401 (2007).
- [8] R. Cornils, S. Gillessen, I. Jung, W. Hofmann, M. Beilicke, K. Bernlöhr, O. Carrol, S. Elfahem, G. Heinzelmann, G. Hermann, D. Horns, R. Kankanyan, A. Katona, H. Krawczynski, M. Panter, S. Rayner, G. Rowell, M. Tluczykont, R. van Staa. *Astropart. Phys.*, **20** (2), 129 (2003). DOI: 10.1016/S0927-6505(03)00172-5
- [9] A. Grinyuk, E. Postnikov, L. Sveshnikova. *Phys. Atom. Nucl.*, **83** (2), 262 (2020). DOI: 10.1134/S106377882002012X