

УДК 537.531.8,520.2.02,520.82.054

## АТМОСФЕРНЫЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ ОБСЕРВАТОРИИ TAIGA

© 2019 г. А. Н. Бородин<sup>1, \*</sup>, В. М. Гребенюк<sup>1, 2</sup>, А. А. Гринюк<sup>1</sup>, А. Пан<sup>1</sup>,  
Я. И. Сагань<sup>1</sup>, Л. Г. Ткачев<sup>1</sup>, А. Н. Шалюгин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области  
Международный университет природы, общества и человека “Дубна”, Дубна, Россия

\*E-mail: artur\_b@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) предназначен для изучения гамма-лучей и заряженных космических частиц в диапазоне энергий  $10^{13}$ – $10^{18}$  эВ. В ОИЯИ ведется проектирование и изготовление механики для черенковских телескопов (IACT). Поле зрения IACT составляет  $\sim 10^\circ \times 10^\circ$ , оптическая схема Дэвиса–Коттона с 34 зеркалами диаметром 0.60 м с фокусным расстоянием 4.75 м и камерой 560 из XR1911 РМТ. Первый IACT работает с 2016 г. в Тункинской долине Бурятии. Продолжается производство второго IACT. В статье представлены процедура и результаты калибровки РМТ, изготовление зеркала и измерения его оптических параметров. Кроме того, представлен метод юстирования зеркал. Он заменяет существующую визуальную оценку изображения программой распознавания образов, примененной к снимку экрана изображения источника калибровки. Программа точно вычисляет соответствующие повороты регулировочных винтов зеркала для получения правильного изображения.

DOI: 10.1134/S036767651908009X

В последние десятилетия многие астрофизические эксперименты сосредоточены на идентификации источников космических лучей (КЛ) и на понимании механизмов их ускорения и распространения. Ожидается, что Галактика содержит объекты, которые могут ускорить КЛ до энергий выше  $10^{15}$  эВ (“Пэватроны”), хотя сохраняется неопределенность в отношении природы этих объектов. Из-за кинематики ускорения КЛ в адронном сценарии, эти объекты должны также излучать гамма-лучи до энергий 100 ТэВ и их измерения должны приводить к однозначной идентификации источников пэватронов. Вся информация, касающаяся КЛ выше 100 ТэВ, получается в наземных экспериментах по регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Несмотря на большой объем полученных данных, происхождение и распространение КЛ все еще обсуждается. До сих пор источники гамма-излучения выше 100 ТэВ не установлены в основном из-за недостаточной светосилы существующих гамма-обсерваторий. Чтобы решить эту проблему, коллаборацией TAIGA создана гибридная установка, которая содержит различные типы детекторов,

расположенных на площади более 1 км<sup>2</sup>. IACT как часть этого массива улучшит чувствительность всей установки и эффективность разделения гамма и адрон-ядерной компоненты КЛ. Этот гибридный метод позволит повысить эффективность обнаружения Пэватронов.

### 1. ПРОЕКТ TAIGA-IACT

Установки IACT являются современными инструментами для гамма-астрономии в ТэВ-диапазоне и позволяют измерять спектры гамма-излучения. Энергия гамма-лучей определяется из анализа изображений на фотодетекторе IACT. В случае стереоскопических систем из нескольких IACT, которые наблюдают ШАЛ с разных углов обзора, расположение оси ливня и расстояние от данного телескопа до этой оси можно получить простой геометрической реконструкцией. Для одиночных IACT расстояние до оси ливня можно оценить на основе анализа черенковского изображения с помощью массива детекторов HiSCORE, которые являются составной частью установки ТАЙГА.

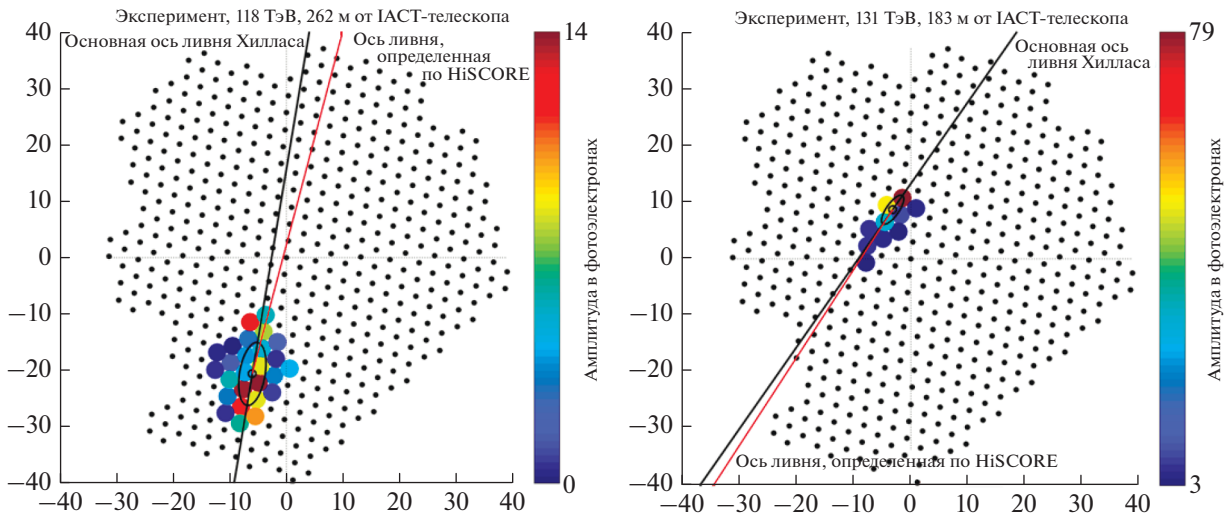


Рис. 1. Примеры изображений ШАЛ на камере IACT с определением положения и направления оси.

Проблема существующих экспериментов с IACT – HESS [1], MAGIC [2] и VERITAS [3] – в недостаточной чувствительности к гамма-излучению с энергией  $E > 15\text{--}20$  ТэВ из-за малой эффективной площади установок ( $0.1 \text{ км}^2$ ). С их помощью невозможно обнаружить поток гамма-излучения с энергией  $\sim 100$  ТэВ. Для решения этой проблемы установка TAIGA включает широкоугольные черенковские детекторы HiSCORE с углом обзора около 0.6 ср и угловым разрешением ШАЛ  $0.1^\circ\text{--}0.2^\circ$ , а также несколько IACT, которые увеличат чувствительность в области энергий  $10^{14}\text{--}10^{15}$  эВ, позволяя сохранить высокое угловое разрешение [4].

Преимущество нескольких IACT, добавленных к массиву детекторов HiSCORE, заключается в их лучшем гамма-адронном разделении по изображению ШАЛ, тогда как положение и направление оси ШАЛ, а также энергия могут быть лучше реконструированы массивом детекторов HiSCORE (рис. 1). Комбинация информации IACT и HiSCORE дает превосходный результат по сравнению с эффективностью каждого отдельного компонента. Этот гибридный метод позволяет подавить фоновые адронные ливни КЛ примерно в 100 раз при энергии 100 ТэВ для точечных источников и увеличить расстояние между IACT до 600 м без потери точности реконструкции ШАЛ.

В 2019 г. количество станций TAIGA-HiSCORE будет увеличено до 100–120 (площадь  $1 \text{ км}^2$ ), а количество IACT (рис. 2) до 3. В отдаленном будущем предполагается расширение установки до  $5 \text{ км}^2$ , так что в диапазоне энергий 30–200 ТэВ чувствительность будет составлять  $10^{-13} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение 500 ч наблюдения [5].

## 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕЛЕСКОПА В ОИЯИ

Механические узлы и система управления гамма-телескопом для эксперимента TAIGA были изготовлены в ОИЯИ на основе конструкции телескопа HEGRA. IACT представляет собой атмосферный черенковский телескоп оптической схемы Дэвиса–Коттона, удовлетворяющий следующим требованиям: альт-азимутальная установка; сферическая форма отдельных зеркальных модулей диаметром 0.6 м и общей площадью зеркала  $9.6 \text{ м}^2$ ; угол обзора  $\pm 5^\circ$ ; поворот вокруг горизонтальной оси (зенитный угол)  $-10^\circ + 95^\circ$ ; поворот вокруг вертикальной оси (азимутальный угол)  $0^\circ\text{--}410^\circ$ ; угловая точность составляет  $0.01^\circ$ ; возможность дистанционного компьютерного управления телескопом; скорость вращения составляет 1–2 град/с; камера фотоприемника с размерами  $750 \times 750 \times 400$  мм представляет собой матрицу ФЭУ с электроникой FE и DAQ. Диаметр одного ФЭУ составляет 15 мм с конусом Винстона 35 мм на входе, что обеспечивает угловое разрешение IACT на уровне  $0.4^\circ$ ; камера весом  $\sim 200$  кг закреплена на фокусном расстоянии  $4750 \pm 1$  мм; условия эксплуатации: температура от минус 40 до плюс  $30^\circ\text{C}$  при высокой влажности.

Все ФЭУ камеры были прокальброваны для разных режимов работы. Измерены темновые токи и коэффициенты усиления для различных питающих напряжений. ФЭУ сгруппированы в камере в кластеры по 28 ФЭУ с близкими характеристиками, что позволит упростить процедуру формирования настроек камеры и восстановления сигнала.

Для производства фокусирующих зеркал в ОИЯИ используют метод моллирования. Стальную сферическую форму и стеклянную заготовку



Рис. 2. Первый (а) и второй (б) телескопы IACT (сентябрь 2018 г.).

контролируемым образом нагревают в печи в течение 48 ч. Стеклообразный диск деформируется и принимает сферическую форму под действием силы тяжести. Специальный режим изменения температуры позволяет достичь достаточно гладкой поверхности. Текущие эксперименты направлены на повышение гладкости конечного продукта, чтобы избежать последующей полировки стекла и минимизировать ошибки кривизны до пределов, допустимых для TAIGA–IACT, чтобы диаметр фокального пятна не превышал 3 мм. Для этого предложен переход от выпуклой поверхности формы к вогнутой. При этом поверхность будущего зеркала вообще не соприкасается с поверхностью формы. Качество стеклянных заготовок (однородность по толщине составляет около 0.02 мм на диаметре 600 мм) позволяет предполагать, что моллированные поверхности зеркал позволят минимизировать дальнейшую обработку.

### 3. СИСТЕМА ГИДИРОВАНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Вращение вокруг каждой оси выполняется шаговыми двигателями Phytron ZSH107/4.200.12.5. Каждый из них оснащен планетарной коробкой передач (передаточное отношение 40, максимальный люфт 16', максимальный крутящий момент 17 Н·м) и червячный редуктор (передаточное отношение 50, номинальный крутящий момент 1450 Н·м). Двигатель выполняет полный поворот за 200 шагов в полномасштабном режиме. Таким образом, телескоп выполняет полный оборот в 400000 шагов. Контроль углового положения осей выполняется с помощью абсолютных энкодеров Hengstler (разрешение 17 бит, обмен данны-

ми по коду SSI Grey). Каждая ось оснащена также двумя концевыми выключателями. Шаговые двигатели, энкодеры и концевые выключатели подключаются к контроллеру шагового двигателя PHY-MOTION. В дополнение к другим функциям контроллер поддерживает режим дробления шага до 1/512 полного шага, который можно использовать для сглаживания слежения телескопом. Удаленный доступ к контроллеру осуществляется через Ethernet.

Чтобы определить точную ориентацию телескопа в небе, используется CCD-камера Prosilica GC1380. Поле зрения CCD-камеры составляет  $\sim 30^\circ \times 20^\circ$ , а угловое разрешение  $\sim 83$  угловых секунд, что позволяет захватывать изображение неба с наблюдаемым источником, а также камерой телескопа. Таким образом, можно одновременно установить соответствие небесной системы координат и положение черенковской камеры. CCD-камера имеет разрешение  $1360 \times 1024$  пикселей и содержит 12-битный АЦП. Камера может работать до 20 кадров в секунду, а время экспозиции может быть установлено от микросекунд до одной минуты. Для управления и сбора данных с удаленного доступа камеры можно получить через Ethernet [6].

### 4. СИСТЕМА ЮСТИРОВКИ ЗЕРКАЛ

Зеркала в телескопе расположены на отдельных фланцах с механизмом ориентации. Юстировка зеркал осуществляется вручную. Для повышения точности юстировки была разработана модификация стандартной процедуры, состоящая из двух этапов. Сначала изображение точечного источника, создаваемое отдельным зеркалом, вы-

водится далеко от фокуса, для того чтобы его можно было соотнести с определенным зеркалом. Затем фокальная картина фиксируется черенковской камерой и специальной программой даются рекомендации по ориентации зеркала для осуществления точной юстировки.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первый ИАСТ успешно работает в составе установки ТАЙГА. Механика второго гамма-телескопа изготовлена и испытана в ОИЯИ. В настоящее время с ним проводятся полевые испытания в Тунке. В ОИЯИ разработана технология производства и контроля зеркал. Начато изготовление третьего телескопа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Förster A., Abramowski A., Aharonian F. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2014. V. 7661. P. 69.
2. *Rico J.* // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273–275. P. 328.
3. *Rajotte J.-F.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. V. 766. 2014. P. 61.
4. *Budnev N., Astapov I., Bar N. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 718. Art. № 052006.
5. *Postnikov E., Astapov I., Bezyazeev P. et al.* // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 756.
6. *Zhurov D., Gress O., Astapov I. et al.* // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 797.