

Астрофизический комплекс в Тункинской долине: от установки Тунка–133 к гамма–обсерватории TAIGA

П. А. Волчугов^{1,2} от коллаборации TAIGA*

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно–исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 18.06.2019; Подписана в печать 21.10.2019)

Тункинский астрофизический комплекс, расположенный в Тункинской долине, в 50 км от озера Байкал, начиная с 1993 г. является центром изучения космических лучей сверхвысоких энергий, методом регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Широкоугольная черенковская установка Тунка–133 и ее предшественница Тунка–25 позволили впервые «увидеть» излом в энергетическом спектре космических лучей (при 3×10^{15} эВ) методом регистрации черенковского света ШАЛ. Результаты полученные данными установками привлекли на полигон исследования космических лучей посредством регистрации заряженных частиц и радиоизлучения ШАЛ установками Tunka–Grande и Tunka–REX (Tunka Radio Extension) соответственно. В настоящее время на полигоне ведутся работы по развертыванию первой очереди гамма–обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy), в состав которой входят широкоугольная черенковская установка TAIGA–HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer), атмосферный черенковский телескоп установки TAIGA–IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) а так же сцинтилляционная установка TAIGA–Muon. Совместная работа детекторов нацелена на изучение заряженных космических лучей, поиск диффузного гамма–излучения и исследование локальных источников гамма–квантов с энергиями более 30 ТэВ. По завершении первой очереди, обсерватория будет включать в себя 3 телескопа TAIGA–IACT, 120 станций TAIGA–HiSCORE и 12 станций TAIGA–Muon на площади 1 км².

PACS: 96.50.S

УДК: 53.08.

Ключевые слова: космические лучи, гамма–астрономия, ШАЛ, черенковское излучение, IACT.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в астрофизическом центре в Тункинской долине (в 50 км от озера Байкал), начатые в 1993 г. в течение многих лет были посвящены исследованию космических лучей сверхвысоких энергий методом регистрации черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ). Изначально установка состояла всего из 4-х детекторов атмосферного черенковского света на основе гибридных фотоприемников КВАЗАР-370. Удивительно, но на такой простой установке удалось впервые «увидеть» излом в энергетическом спектре космических лучей (при 3×10^{15} эВ) методом регистрации черенковского света ШАЛ [1].

В настоящее время исследование космических лучей с энергией выше 10^{15} эВ на астрофизическом полигоне продолжается с использованием установок, регистрирующих черенковское излучение ШАЛ — Тунка–133 [2], заряженные частицы ШАЛ — установка Tunka–Grande [3] и радиоизлучение — Tunka–REX [4].

С 2013 г. на астрофизическом полигоне начаты работы по созданию гамма–обсерватории TAIGA, нацеленной на регистрацию гамма–квантов с энергией более 30 ТэВ. В состав последней входят широкоугольная черенковская установка TAIGA–HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) [5, 6], атмосферный черенковский телескоп установки TAIGA–IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) [6], а так же сцинтилляционная установка TAIGA–Muon [7].

В статье достаточно кратко описываются установки для исследования космических лучей, с которых начались работы на астрофизическом полигоне и существенно подробнее гамма–обсерватория TAIGA.

1. Тунка–133, Tunka–REX, Tunka–Grande

Освоение Тункинского астрофизического полигона, как уже упоминалось во введении, началось в 1993 г. с целью изучения широких атмосферных ливней. Одной из первых достаточно крупных установок созданных на астрофизическом полигоне была установка Тунка–25 [8]. В качестве фотоприемников в этой установке использовались фотоприемники КВАЗАР–370, с диаметром фотокатода 37 см [9]. Двадцать пять

*E-mail: pv04@yandex.ru

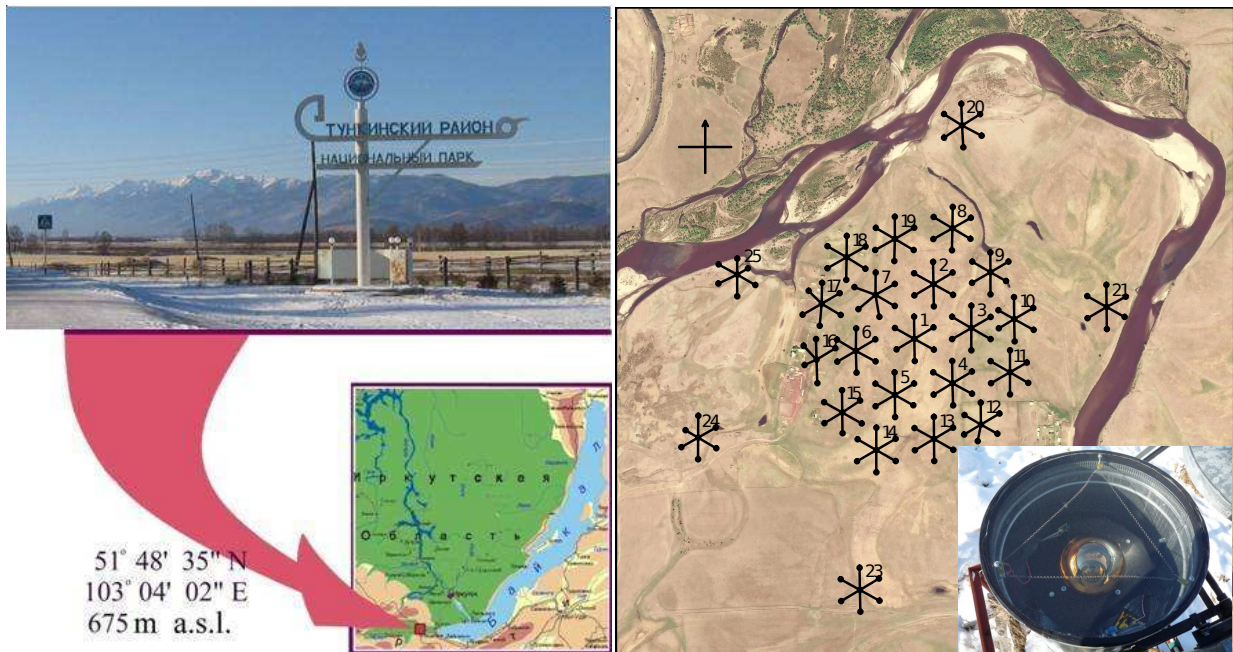


Рис. 1: Местоположение и пространственная конфигурация установки Тунка–133; фронтальная поверхность одного детектора (правый нижний угол)

таких фотоприемников было размещено на площади $0,16 \text{ км}^2$. На установке Тунка–25 были получены важные результаты, как по методике восстановления параметров ШАЛ, так и по энергетическому спектру космических лучей в районе излома спектра (от 10^{15} – 10^{16} эВ) [8]. В 2009 г. начала работать новая установка Тунка–133 состоящая из 175 оптических детекторов регистрирующих черенковское излучение (рис. 1). Тунка–133 расположена на площади около 3 км^2 . Детекторы объединены в 25 кластеров, по 7 детекторов в каждом, с расстоянием между ними 85 м. Каждый детектор содержит 20-ти сантиметровый ФЭУ, сигнал с которого отправляется на центр кластера, где производится его оцифровка 12-битным АЦП с частотой дискретизации 200 МГц [2].

Одним из главных результатов, полученных по данным установки Тунка–133, является доказательство более сложной зависимости интенсивности космических лучей от энергии, чем предполагалось ранее. В спектре наблюдаются две статистически обеспеченные особенности. При энергии 2×10^{16} эВ показатель наклона энергетического спектра уменьшается примерно на 0.2 [10], а при энергии 3×10^{17} эВ значение показателя наклона спектра опять увеличивается примерно на 0.3 (рис. 2). На этом же рисунке приведен спектр, полученный на установке Тунка–25, предшественнице установки Тунка–133. Укручение спектра при энергии 3×10^{17} эВ можно интерпретировать, как «второе колено» в энергетическом спектре, связанное с переходом от галактических к внегалактическим космическим лучам.

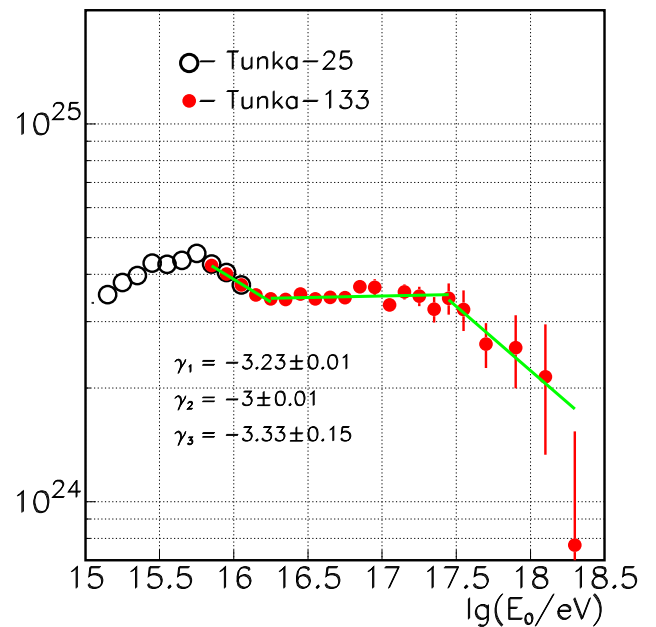


Рис. 2: Энергетический спектр по данным установок Тунка–133 и Тунка–25 [10]

Спустя 3 года после начала работы Тунка–133, на полигоне была развернута сеть радиоприемных антенн Tunka-REX для изучения возможности регистрации ШАЛ по радиоимпульсам [4]. Tunka-REX содержит 64 радиоприемных антенны на площади 3 км^2 . Установка Tunka-Grande так же нацелена на изучение космических лучей и представляет собой сеть из 19 сцинтилляционных

установок на площади 1 км^2 [3]. Каждая станция содержит подземную и наземную часть площадью ~ 5 и 8 м^2 соответственно, что позволяет определять отношение электронной компоненты ШАЛ к мюонной.

Описанные выше установки образуют единый комплекс для регистрации ШАЛ космических лучей с энергиями от 10 до 1000 ПэВ.

2. Гамма-обсерватория TAIGA

Гамма-астрономия в настоящее время является одним из передовых каналов исследования удаленных объектов галактики и метagalктики, представляющих большой интерес для современной астрофизики.

До сих пор основной объем знаний о потоках и источниках гамма-квантов высоких энергий получен с помощью IACT (IACT — Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) гамма-телескопов, состоящих из зеркал и мозаик фотоприемников в их фокусе, в которых создается изображение вспышки черенковского света от широких атмосферных ливней, инициированных первичными гамма-квантами. Уровень чувствительности существующих и проектируемых в настоящее время гамма-телескопов оптимизирован для энергетического диапазона 100 ГэВ–100 ТэВ. Для эффективного подавления фона при работе с IACT телескопами зачастую используется стереоскопический подход — система IACT телескопов, расположенных таким образом, чтобы изображение ШАЛ могло быть зарегистрировано, по меньшей мере, двумя из них. Так в обсерватории MAGIC, с появлением второго IACT телескопа, удалось добиться значительного снижения адронного фона при энергиях ниже 100 ГэВ [11].

Однако, при продвижении в область более высоких энергий количество регистрируемых событий существенно снижается, поэтому, в попытках исследовать область энергии более 100 ТэВ, обсерватории вынуждены масштабировать чувствительную площадь детектора. Так в одном из крупнейших проектов наземной гамма-астрономии СТА [12], для исследования сверхвысоких энергий (от 20 ГэВ до 300 ТэВ) предполагается разместить на площади $4,5 \text{ км}^2$ в южном полушарии 70 черенковских телескопов малого (4 м), 25 среднего (12 м) и 4 большого (23 м) размера, а так же в северном полушарии на площади $0,5 \text{ км}^2$ 4 больших и 15 средних черенковских телескопов [13]. Эта задача достаточно сложная не только с финансовой точки зрения, но и с точки зрения эксплуатации такого количества телескопов, поскольку до сих пор во всех гамма-обсерваториях число телескопов не превышало пяти экземпляров.

Другим важным подходом к гамма-астрономии высоких энергий являются высокогорные установки регистрирующие заряженные частицы. В частности, на установках Milagro [14, 15], HAWC [16] и Tibet [17] получены впечатляющие результаты.

Весьма важным подходом, расширяющим возможности традиционных IACT гамма-телескопов в области высоких энергий, является их совместное использование с широкоугольными черенковскими детекторами. Широугольная черенковская установка ШАЛ представляет из себя сеть черенковских детекторов распределенных в пространстве. При хорошей точности временной синхронизации (порядка 1 нс) между детекторами, такая установка позволяет восстановить направление прихода ШАЛ с высокой точностью (вплоть до 0.1°), положение оси ШАЛ, энергию и глубину максимума развития. Предварительные расчеты показывают, что эта информация, объединенная с формой изображения ШАЛ, существенно подавляет уровень фоновых событий от космических лучей. При совместной работе телескопа с широкоугольной установкой не требуется одновременной регистрации ШАЛ несколькими телескопами, в силу чего расстояние между телескопами может быть увеличено до 600 м. Это позволяет существенно меньшим числом телескопов контролировать большую площадь, необходимую для набора статистики при высоких энергиях. Такой гибридный подход развивается в гамма-обсерватории TAIGA [18, 19].

3. TAIGA-HiSCORE

TAIGA-HiSCORE — это сеть широкоугольных оптических станций (ОС) для детектирования черенковского излучения ШАЛ, в настоящее время расположенная на площади 0.5 км^2 . Ожидается, что к концу первого этапа строительства гамма-обсерватории TAIGA площадь установки TAIGA-HiSCORE составит 1 км^2 . ОС представляет собой металлический контейнер с дистанционно-управляемыми крышками для защиты от солнечного света, атмосферных осадков и пыли (рис. 3). В ОС размещаются 4 оптических модуля, каждый из которых включает в себя ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см, оснащенный конусом Винстона с диаметром входного окна 40 см. Конус Винстона концентрирует весь свет, падающий на входное отверстие под углами $\theta < \theta_{cone}$, в область выходного отверстия с меньшим радиусом, где размещается фотокатод ФЭУ, и отражает все лучи, приходящие под большими углами. Угол θ_{cone} определяется размерами входного и выходного окна конуса. Таким образом конус Винстона выполняет две важные функции:

- увеличивает площадь светосбора;
- ограничивает угол обзора, тем самым снижая фоновую засветку ночного неба.

Телесный угол оптического модуля (ОМ) и, соответственно, ОС составляет 0.6 ср. Основная электроника оптической станции, ответственная за сбор и оцифровку данных, вынесена в расположенный рядом отдельный подогреваемый контейнер, что позволяет уменьшить наводки на ФЭУ и предусилителях. Для по-

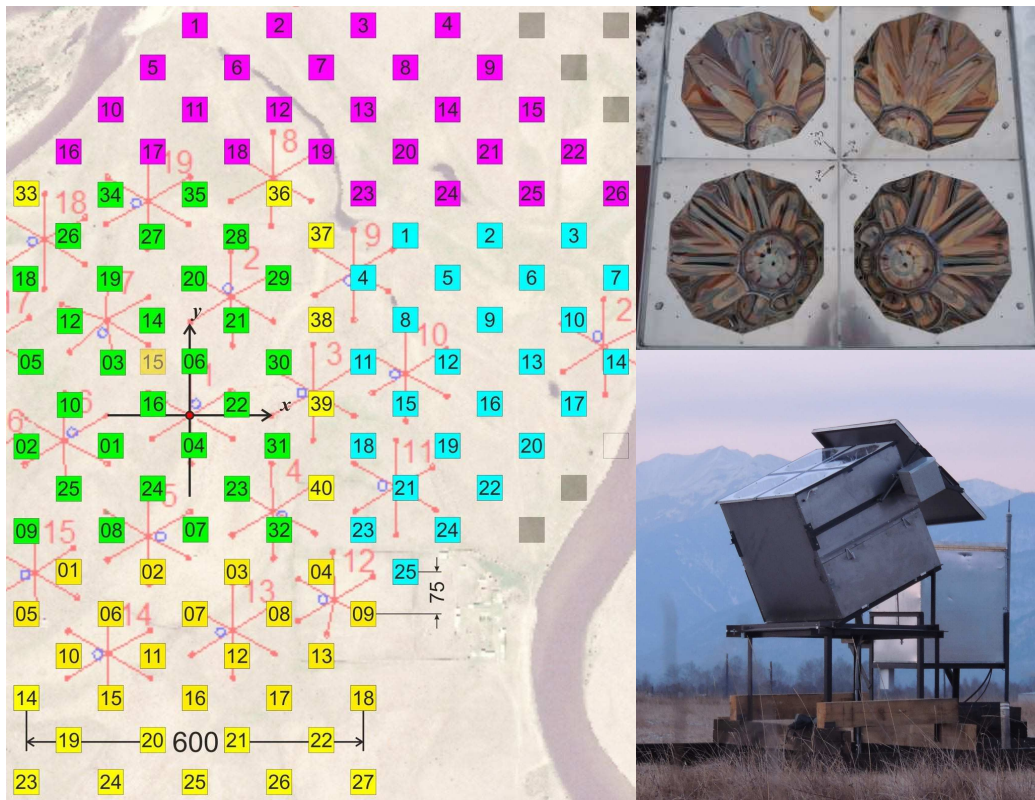


Рис. 3: Расположение детекторов установки TAIGA-HiSCORE (слева), цветом отмечены разные кластеры; конструкция одного детектора (правый нижний рисунок); фронтальная поверхность детектора, содержащая 4 ФЭУ, установленные в конусы Винстона (правый верхний рисунок)

нижения энергетического порога регистрации гамма-квантов до десятков ТэВ, сигналы с анодов четырех ФЭУ суммируются, и суммарный сигнал поступает на вход компаратора системы выработки локального триггера. Сигналы с анодов и промежуточных диодов оцифровываются с шагом 0.5 нс с помощью 8-канального модуля на основе микросхемы DRS-4. Более подробное описание системы сбора и синхронизации приведена в [20]. Восстановление параметров ШАЛ по данным установки TAIGA-HiSCORE производится с помощью методик и алгоритмов, разработанных для обработки данных установки Тунка-133 [10]. Направление прихода ШАЛ определяется по относительной задержке времени регистрации черенковского импульса каждой ОС. Энергия первичной частицы восстанавливается по плотности потока черенковского света на расстоянии 200 м от оси ШАЛ с точностью около 15% [8]. Угловое разрешение составляет 0.4–0.5° для событий с 4–5 сработавшими станциями и около 0.1° для событий с более чем 10 сработавшими станциями [21, 22].

4. TAIGA-IACT

Для наземной гамма-астрономии является существенно важным умение отличать ШАЛ порожденные гамма-квантами от ШАЛ космических лучей, которые в данном случае становятся фоном. Наиболее эффективно данную проблему решают атмосферные черенковские телескопы (IACTs — Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes), создающие компактный образ ливня в угловом пространстве, по которому и производится отбор кандидатов в гамма-кванты.

Так при регистрации ШАЛ стереоскопическим методом, достигается более чем 100-кратное подавление событий от заряженных космических лучей при энергии около 1 ТэВ [23].

Выделение первичных гамма-квантов из адронного фона возможно также путем анализа распределения заряженных частиц ШАЛ в пространстве. Так на высокогорной установке HAWC, регистрирующей заряженные частицы ШАЛ, достигают 100-кратного подавления адронного фона при энергии 10 ТэВ [24]. Таким образом в черенковских телескопах события от гамма-квантов дают «компактный образ» в угловом пространстве, а методика HAWC позволяет отбирать события от гамма-квантов по «компактности» распределения заряженных частиц.

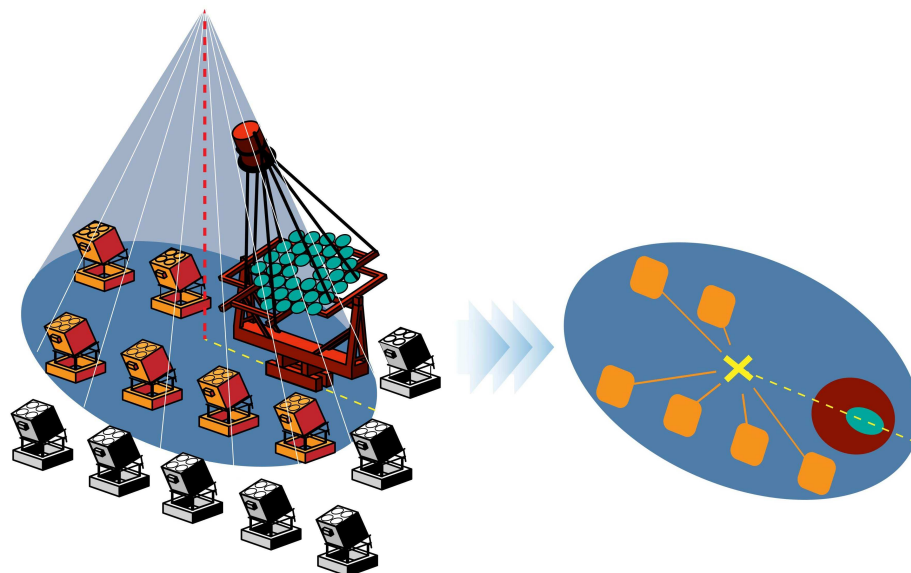


Рис. 4: Регистрация ШАЛ гибридным методом (слева) и результирующее изображение ливня в детекторах (справа)[33]

В общем случае IACT представляет собой многоканальную камеру для регистрации изображения ШАЛ, которая расположена в фокусе составного зеркала диаметром от 4 до 28 м. [25–30]. Наибольшее зеркало, диаметром 28 м, у одного из телескопов обсерватории HESS [31].

Гамма-обсерватория TAIGA использует гибридный подход к регистрации ШАЛ. Основная особенность данного проекта состоит в том, что восстановление энергии, положения и направления оси ШАЛ осуществляется по данным широкоугольной черенковской установки TAIGA-HiSCORE. Для определения вида частицы породившей ШАЛ будут в основном использоваться данные, получаемые с помощью установки TAIGA-IACT (рис. 4). Чтобы определить тип первичной частицы при наличии информации об энергии, положении и направлении оси ливня, полученной из анализа данных HiSCORE, достаточно, чтобы черенковское излучение ШАЛ было зарегистрировано только одним телескопом, то есть в моно-режиме, что позволяет увеличить расстояние между атмосферными черенковскими телескопами до 600 м.

TAIGA-IACT имеет альт-азимутальное крепление и отражатель, состоящий из 29 сферических зеркал диаметром 60 см (рис. 5). Полный диаметр зеркала составляет 4.3 м, а общая площадь отражающей поверхности составляет 8.5 м^2 . Фокусное расстояние телескопа равно 4.75 м. Камера TAIGA-IACT обеспечивает угловой обзор $9.6 \times 9.6^\circ$ и включает в себя матрицу из 560 ФЭУ (пикселей) с угловым размером 0.36° , каждый из которых также оснащен конусом Винстона [19].

Площадь зеркала данного телескопа примерно равна площади телескопов HEGRA [25] и площади малых телескопов СТА (SST) [32], нацеленных на вы-

сокие энергии (выше 5 ТэВ). Энергетический порог TAIGA-IACT составляет 1.5 ТэВ, что примерно в 2 раза выше чем порог телескопа HEGRA, во-первых, из-за большего углового размера пикселя (0.36° у TAIGA-IACT, 0.24° у HEGRA) и, во-вторых, из-за разности в высотах расположения телескопов (670 м у TAIGA-IACT и 2200 м у HEGRA). Угол обзора TAIGA-IACT составляет 9.6° , что в 2.2 раза больше угла обзора телескопа HEGRA. Такой угол обзора позволяет регистрировать без искажения изображения ШАЛ с расстояний до 600 м.

Кроме того, камера включает в себя систему подачи высокого напряжения, систему обработки сигналов и считывания, а так же контроллер питания. Все пиксели сгруппированы в 22 кластера, каждый из которых вырабатывает локальный триггер и производит первичную обработку и сбор данных с помощью специализированной интегральной микросхемы ASIC MAROC-3. В рамках данной микросхемы каждый ФЭУ подключен к двум измерительным каналам для увеличения измеряемого динамического диапазона сигналов черенковского излучения [34]. Так же телескоп оснащен CCD камерой для контроля положения телескопа во время наблюдений [35].

Измерения с помощью атмосферного черенковского телескопа TAIGA-IACT начались в конце января 2017 г. Полный темп счета триггеров телескопа составлял около 0.5 кГц и выше (до 2 кГц) при наличии облаков, а темп счета ШАЛ 10 Гц. Будет проведена модернизация триггерной системы для уменьшения общего темпа счета триггеров камеры при сохранении эффективности регистрации ШАЛ.

Темп счета совместных событий с TAIGA-HiSCORE составлял 0.3 Гц [36]. Для совместных событий на-

правление положения оси ШАЛ хорошо согласуется с направлением главных осей эллипсов изображений ШАЛ в камере TAIGA-IACT (рис. 5).



Событие №6281867
Npix = 23, Size = 709 ф.э.
Width = 1.6 см, $\alpha = 8.8$ град

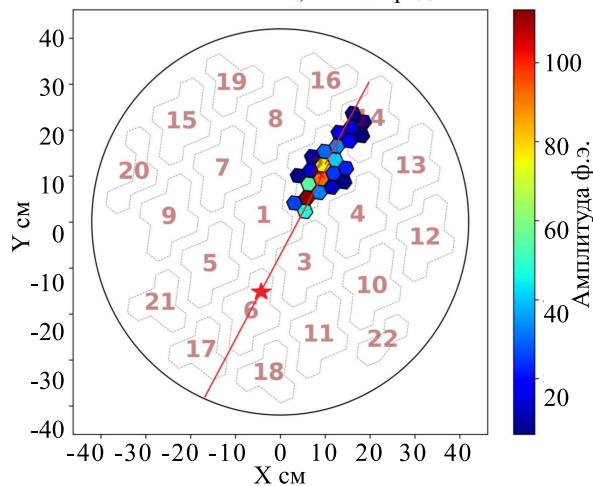


Рис. 5: Атмосферный черенковский телескоп TAIGA-IACT и пример зарегистрированного события TAIGA-HiSCORE и TAIGA-IACT в камере телескопа

В настоящее время идет сборка и тестирование камеры второго телескопа TAIGA-IACT. В отличие от камеры TAIGA-IACT1 она будет содержать 600 ФЭУ и модифицированный вариант кросс-платы для каждого кластера.

5. TAIGA-Muon

В отличие от черенковских детекторов ШАЛ, используемых лишь в ясные безлунные ночи, сцинтилляционные детекторы могут работать вне зависимости от

времени суток. Помимо этого они позволяют получать информацию об отношении электронной компоненты ШАЛ к мюонной, что так же позволяет отделять ШАЛ порожденные гамма-квантами от ШАЛ порожденных космическими лучами. Кроме того, в отличие от атмосферных черенковских телескопов, сцинтилляционные детекторы имеют широкий угол обзора, что позволяет производить поиск диффузного гамма-излучения. Работа установки TAIGA-Muon в большом диапазоне углов прихода гамма-квантов позволит выделить локальные области с избытком гамма-квантов, которые, впоследствии, могут быть детально изучены с помощью атмосферных черенковских телескопов установки TAIGA-IACT. В связи с этим планируется развертывание сцинтилляционной установки TAIGA-Muon общей площадью 2–3 тыс м². Установка будет состоять из отдельных станций, каждая из которых будет включать в себя 8 наземных и 40 подземных детекторов, установленных на глубине 2 м, что позволит отдельно регистрировать мюонную и электронно-фотонную компоненты [37]. Отдельный детектор установки TAIGA-Muon площадью 1 м² содержит пластиковый сцинтиллятор и световод для эффективной транспортировки света к фотоумножителю. Для выравнивания величины сигнала, в дальней от ФЭУ-85 части устанавливается сборка из двух пластин толщиной 10 мм, а в средней и ближней частях используются одиночные пластины толщиной 10 мм [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент сделаны первые значимые шаги в направлении завершения первого этапа строительства гамма-обсерватории TAIGA. Первые сезоны эксплуатации TAIGA-HiSCORE и атмосферного черенковского телескопа TAIGA-IACT продемонстрировали хорошие характеристики установки и показали предварительные результаты. По завершении первого этапа строительства гамма-обсерватория TAIGA позволит:

- изучать спектры уже известных высокоэнергичных галактических источников гамма-квантов;
- применять новый гибридный метод для изучения массового состава космических лучей в области колена (0.1 ПэВ–10 ПэВ);
- проводить поиск локальных источников гамма-квантов с энергией более 30 ТэВ [19].

В течение следующего года планируется завершить развертывание первой очереди TAIGA с 120 станциями TAIGA-HiSCORE, 3 телескопами TAIGA-IACT и 12 станциями TAIGA-Muon на площади 1 км².

- [1] Bryanski S. V., Vasilchenko Y. V., Gress O. A., Gress T. I., Dudkin G. N., Klimov A. I., Khlytchieva V. S., Kuzmichev L. A., Lubsandorzhev B. K., Osipova E. A. et al. // Proc. 24th ICRC, 1995, Roma, **2**, P. 724.
- [2] Berezhnev S. F., Besson D., Budnev N. M., Chiavassa A., Chvalaev O. A., Gress O. A., Dyachok A. N., Epimakhov S. N., Haungs A., Karpov N. I. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2012. **692**. P. 98.
- [3] Monkhoev R. D., Budnev N. M., Chiavassa A., Dyachok A. N., Gafarov A. R., Gress O. A., Gress T. I., Grishin O. G., Ivanova A. L., Kalmykov N. N. et al. // JINST. 2017. **12**, 06. P. C06019.
- [4] Fedorov O., Bezyazeev P. A., Budnev N. M., Chernykh D., Gress O. A., Haungs A., Hiller R., Huege T., Kazarina Y., Kleifges M. et al. // PoS. (ICRC 2017). P. 387.
- [5] Tluczykont M., Hampf D., Horns D., Spitschan D., Kuzmichev L., Prosin V., Spiering C., Wischnewski R. // Astroparticle Physics. 2014. **56**. P. 42.
- [6] Yashin I. I., Astapov I. I., Barbashina N. S., Bogdanov A. G., Boreyko V., Budnev N. M., Büker M., Brückner M., Chiavassa A., Chvalaev O. B. et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. **675**. 032037.
- [7] Astapov I., Bezyazeev P., Borodin A., Brueckner M., Budnev N., Chiavassa A., Dyachok A., Fedorov O., Gafarov A., Garmash A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. 2019. **A936**. P. 254.
- [8] Budnev N., Chernov D., Gress O., Korosteleva E., Kuzmichev L., Lubsandorzhev B., Navarra G., Pankov L., Prosin V., Semenev Yu. et al. // Astropart. Phys. 2013. **50-52**. P. 18.
- [9] Bagduev R. I., Balkanov V., Belolaptikov I. A., Bezrukov L. B., Budnev N. M., Borisovets B. A., Domogatsky G. V., Donskich L. A., Doroshenko A. A., Garus A. A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. 1999. **A420**. P. 138.
- [10] Prosin V. V., Berezhnev S. F., Budnev N. M., Chiavassa A., Chvalaev O. A., Gress O. A., Dyachok A. N., Epimakhov S. N., Karpov N. I., Kalmykov N. N. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2014. **A756**. P. 94.
- [11] Carmona E., Majumdar P., Moralejo A., Vitale V., Sobczynska D., Haffke M., Bigongiari C., Otte N., Cabras G., De Maria M. et al. // 2007. C07-07-03, **3**(OG part 2), P. 1373.
- [12] Acharya B. S., Actis M., Aghajani T., Agnetta G., Aguilar J., Aharonian F., Ajello M., Akhperjanian A., Alcubierre M., Aleksic J. et al. // Astroparticle Physics. 2013. **43**. P. 3.
- [13] Hassan T., Arrabito L., Bernlör K., Bregeon J., Hinton J., Jogler T., Maier G., Moralejo A., Di Pierro F., Wood M. et al. // 2015. C15-07-30 [arXiv:1508.06075]
- [14] Abdo A. A., Allen B., Berley D., Casanova S., Chen C., Coyne D. G., Dingus B. L., Ellsworth R. W., Fleysher L., Fleysher R. et al. // ApJ. 2007. **664**. P. L91
- [15] Abdo A. A., Abeysekara A. U., Allen B. T., Aune T., Barber A. S., Berley D., Braun J., Chen C., Christopher G. E., DeYoung T. et al. // Astropart. Phys. 2014. **57-58**. P. 16.
- [16] Gus Sinnis on behalf of the Milagro and HAWC Collaborations // Nucl. Instrum. Meth. 2010. **A623**. P. 410.
- [17] Amenomori M., Bi X. J., Chen D., Cui S. W., Danzengluobu, Ding L. K., Ding X. H., Fan C., Feng C. F., Zhaoyang Feng et al. // Astrophys. J. 2009. **692**. P. 61.
- [18] Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P., Boreyko V., Borodin A., Brückner M., Chiavassa A., Gafarov A., Grebenyuk V., Gress O. et al. // Journal of Instrumentation. 2017. **12**. N8. C08018.
- [19] Кузьмичев Л. А., Астапов И. И., Безъязыков П. А., Боре́йко В., Бородин А. Н., Буднев Н. М., Вишне́вский Р., Гармаиш А. Ю., Гафаров А. Р., Горбунов Н. В. и др. // Ядерная физика. 2018. **81**, № 4. С. 469.
- [20] Gress O., Astapov I., Budnev N., Bezyazeev P., Bogdanov A., Boreyko V., Brückner M., Chiavassa A., Chvalaev O., Dyachok A. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2017. **845**. P. 367.
- [21] Kuzmichev L., Astapov I., Bezyazeev P., Boreyko V., Borodin A., Brückner M., Budnev N., Chiavassa A., Gress O., Gress T. et al. // EPJ Web Conf. 2017. **145**. 01001.
- [22] Tluczykont M., Budnev N., Astapov I., Barbashina N., Bogdanov A., Boreyko V., Brückner M., Chiavassa A., Chvalaev O., Gress O. et al. // Proceedings of RICAP 6th EPJ Web of Conferences. **136**. P. 03008.
- [23] Rieger F. M., de Ona-Wilhelmi E., Aharonian F. A. // Frontiers of Physics. 2013. **8**. P. 714. 1302.5603.
- [24] Abeysekara A. U., Alfaro R., Alvarez C., Álvarez J. D., Arceo R., Arteaga-Velázquez J. C., Ayala Solares H. A., Barber A. S., Baughman B. M., Bautista-Elivar N. et al. // Astropart. Phys. 2013. **50-52**. P. 26. arXiv:1306.5800 [astro-ph.HE].
- [25] Pühlhofer G., Bolz O., Götting N., Heusler A., Horns D., Kohnle A., Lampeitl H., Panter M., Tluczykont M., Aharonian F. et al. // Astroparticle Physics. 2003. **20**. P. 267.
- [26] Bretz T., Anderhub H., Backes M., Biland A., Boccone V., Braun I., Bretz T., Buss J., Cadoux F., Commichau V. et al. // FACT-ICRC2013-682
- [27] Chandra P., Singh K. K., Rannot R. C., Yadav K. K., Bhatt H., Tickoo A. K., Ghosal B., Kothari M., Gaur K. K., Goyal A. et al. // New Astronomy. 2017. **54**. P. 42.
- [28] Acciari V. A., Aliu E., Arlen T., Aune T., Beilicke M., Benbow W., Bradbury S. M., Buckley J. H., Bugaev V., Byrum K. et al. // ApJ Letters. 2011. **730**. L20.
- [29] Albert J., Aliu E., Anderhub H., Antoranz P., Armada A., Asensio M., Baixeras C., Barrio J. A., Bartko H., Bastieri D. et al. // Astrophys. J. 2006. **639**. P. 761.
- [30] Aharonian F., Abramowski A., Acero F., Akhperjanian A. G., Anton G., Barnacka A., Barres de Almeida U., Bazer-Bachi A. R., Becherini Y. et al. // Astroparticle Physics. 2011. **34**. P. 738.
- [31] Giebels B. for the H.E.S.S. collaboration // Fermi Symposium proceedings 2012. ArXiv: 1303.2850.
- [32] Aguilar J. A., Bilnik W., Blocki J., Bogacz L., Borkowski J., Bulik T., Cadoux F., Christov A., Curylo M., della Volpe, D. et al. // NIMA. 2017. **845**. P. 350.
- [33] Postnikov E. on behalf of the TAIGA collaboration // PoS (IFS2017). P. 107.
- [34] Lubsandorzhev N., Astapov I., Bezyazeev P., Boreyko V., Borodin A., Brueckner M., Budnev N., Chiavassa A., Dyachok A., Fedorov O. et al. // PoS (ICRC2017). P. 757.

- [35] Zhurov D., Gress O., Sidorov D., Astapov I., Bezyazeev P., Boreyko V., Borodin A., Budnev N., Brueckner M., Chiavassa A. et al. // J. Phys. Conf. Series. 2019. **1181**. 012045.
- [36] Sveshnikova L. G., Astapov I. I., Bezyazeev P. A., Boreyko V., Borodin A. N., Brueckner M., Budnev N. M., Chiavassa A., Dyachok A. N., Fedorov O. L. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019.
- [37] Astapov I., Bezyazeev P., Boreyko V., Borodin A., Brueckner M., Budnev N., Chiavassa A., Dyachok A., Fedorov O., Gafarov A. et al. // NIMA. 10.1016/j.nima.2018.12.045.

Astrophysical complex in the Tunka Valley: from the Tunka-133 installation to the gamma-observatory TAIGA

P. Volchugov^{1,a}, I. Astapov⁹, P. Bezyazeev², A. Borodin¹⁰, M. Brückner⁸, N. Budnev², D. Chernykh², A. Chiavassa⁴, O. Gress², T. Gress², O. Grishin², A. Dyachok², O. Fedorov², A. Gafarov², A. Garmash¹¹, V. Grebenyuk^{10,15}, A. Grinyuk¹⁰, D. Horns⁶, N. Kalmykov¹, Y. Kazarina², V. Kindin⁹, V. Kiryuhin², R. Kokoulin⁹, K. Kompaniets⁹, E. Korosteleva¹, V. Kozhin¹, E. Kravchenko^{11,12}, A. Kryukov¹, L. Kuzmichev¹, A. Lagutin¹⁴, V. Lenok², B. Lubsandorzhev³, N. Lubsandorzhev¹, R. Mirgazov², R. Mirzoyan^{5,2}, R. Monkhoev², E. Osipova¹, A. Pakharukov², A. Pan¹⁰, M. Panasyuk¹, L. Pankov², A. Petrukhin⁹, V. Poleschuk², M. Popescu¹³, E. Popova¹, A. Porelli⁸, E. Postnikov¹, V. Prosin¹, V. Ptuskin⁷, A. Pushnin², R. Raikin¹⁴, G. Rubtsov³, E. Rybov², Y. Sagan^{10,15}, V. Samoliga¹, N. Shipniagov², A. Silaev¹, A. Silaev(junior)¹, A. Sidorenkov³, A. Skurikhin¹, M. Slunecka¹⁰, A. Sokolov^{11,12}, C. Spiering⁸, L. Sveshnikova¹, Y. Suvorkin², V. Tabolenko², B. Tarashansky², M. Ternovoy², L. Tkachev^{10,15}, M. Tluczykont⁶, N. Ushakov³, K. Ustinov², A. Vaidyanathan¹², V. Volkov¹⁴, D. Voronin³, R. Wischnewski⁸, A. Zagorodnikov², D. Zhurov², Ig. Yashin⁹

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

²Institute of Applied Physics ISU, Irkutsk, Russia

³Institute for Nuclear Research of RAN, Moscow, Russia

⁴Dipartimento di Fisica Generale Universiteta di Torino and INFN, Torino, Italy

⁵Max-Planck-Institute for Physics, Munich, Germany

⁶Institut fuer Experimentalphysik, University of Hamburg, Germany

⁷IZMIRAN, Moscow, Russia

⁸DESY, Zeuthen, Germany

⁹NRNU MEPhI, Moscow, Russia

¹⁰JINR, Dubna, Russia

¹¹Novosibirsk State University, NSU, Novosibirsk, Russia

¹²Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹³ISS, Bucharest, Romania

¹⁴Altai State University, Barnaul, Russia

¹⁵Dubna State University, Dubna, Russia

^aE-mail: pvol4@ya.ru

The Tunka astrophysical complex, located in the Tunka valley, 50 km from Lake Baikal, has been a center for the study of ultrahigh-energy cosmic rays since 1993, by registering extensive air showers (EAS). The wide-angle Cherenkov installation Tunka-133 and its predecessor Tunka-25 made it possible for the first time to «see» the fracture in the energy spectrum of cosmic rays (at 3×10^{15} eV) by registering Cherenkov light of EAS. The results obtained by these installations attracted cosmic ray studies there by means of the detection of charged particles and radio emission from EAS by installations Tunka-Grande and Tunka-REX (Tunka Radio Extension), respectively. The current construction of the first stage of the TAIGA gamma-observatory (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy), which includes the wide-angle Cherenkov installation TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer), the atmospheric Cherenkov telescope of the TAIGA-IACT installation (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) as well as scintillator installation TAIGA-Muon. The joint work of the detectors is aimed at studying charged cosmic rays, searching for diffuse gamma radiation and studying local sources of gamma rays with energies above 30 TeV. Upon completion of the first stage, the observatory will include 3 TAIGA-IACTs, 120 TAIGA-HiSCORE stations and 12 TAIGA-Muon stations on an area of 1 km².

PACS: 96.50.S.

Keywords: cosmic rays, gamma astronomy, EAS, Cherenkov light, IACT.

Received 18 June 2019.

Сведения об авторах

Волчугов Павел Андреевич — студент 2 курса магистратуры; e-mail: pvol4@yandex.ru.