

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 524.1.-52

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС TAIGA

© 2020 г. Л. А. Кузьмичев^{a,*}, И. Астапов^b, П. Безъязыков^c, М. Бланк^d, А. Бородин^e, Е. Бонвеч^a, М. Брюкнер^f, Н. Буднев^c, А. Булан^a, А. Вайдянатан^g, Р. Вишневский^{f,e}, П. Волчугов^a, Д. Воронин^h, А. Гафаров^c, О. Гресс^c, Т. Гресс^c, О. Гришин^a, А. Гармаш^{g,i}, В. Гребенюк^{e,j}, А. Гринюк^e, А. Дячок^c, Д. Журов^c, А. Загородников^c, А. Иванова^{i,c}, Н. Калмыков^a, Ю. Казарина^c, В. Киндин^b, В. Кирюхин^c, Р. Кокоулин^b, К. Компаниец^b, Е. Коростелева^a, В. Кожин^a, Е. Кравченко^{g,j}, А. Крюков^a, А. Кьявасса^k, А. Лагутин^l, Ю. Лемешев^c, Б. Лубсандоржиев^h, Н. Лубсандоржиев^a, Р. Миргазов^c, Р. Мирзоян^{m,a}, Р. Монхоев^c, Е. Осипова^a, А. Пахоруков^c, А. Пан^e, М. Панасюк^a, Л. Паньков^c, А. Петрухин^b, Д. Подгрудков^a, В. Полещук^c, М. Попескуⁿ, Е. Попова^h, А. Порелли^{f,e}, Е. Постников^a, В. Просин^a, В. Птускин^o, А. Пушкин^c, Р. Райкин^l, Г. Рубцов^h, Е. Рябов^c, Я. Сагань^{e,j}, В. Самолига^c, А. Силаев^a, А. Силаев (мл.)^a, А. Сидоренков^h, А. Скурихин^a, М. Слунечка^e, А. Соколов^{g,i}, Л. Свешникова^a, Я. Суворкин^c, В. Таболенко^c, А. Танаев^c, Б. Таращанский^c, М. Терновой^c, Л. Ткачев^{e,j}, М. Тлущиконт^d, Н. Ушаков^h, О. Федоров^c, Д. Хорнс^d, Д. Чернов^a, Д. Черных^c, Д. Шипилов^c, И. Яшин^b

^aНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^cНаучно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, 664003 Россия

^dInstitut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Hamburg, D-20148 Deutschland

^eОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

^fDeutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Zeuthen, D-15738 Deutschland

^gНовосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090 Россия

^hИнститут ядерных исследований Российской академии наук, Москва, 117312 Россия

ⁱИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090 Россия

^jГосударственный университет “Дубна”, Дубна, Московская обл., 141982 Россия

^kDipartimento di Fisica Generale Università di Torino e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Torino, 10125 Italia

^lАлтайский государственный университет, Барнаул, 656049 Россия

^mMax-Planck-Institut für Physik, München, D-80805 Deutschland

ⁿInstitute of Space Science, Magurele, Ilfov, 077125 Romania

^oИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, 108840 Россия

*e-mail: kuz@dec1.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 09.06.2020 г.

После доработки 14.06.2020 г.

Принята к публикации 15.06.2020 г.

В статье представлено описание астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy), развертывание первой очереди которого завершается в Тункинской долине в 50 км от озера Байкал. Обсуждается научная программа комплекса, первые результаты и планы по дальнейшему развитию комплекса.

Ключевые слова: космическое гамма-излучение, черенковское излучение, широкий атмосферный ливень, атмосферный черенковский гамма-телескоп (АЧТ)

DOI: 10.1134/S2079562920010078

1. ВВЕДЕНИЕ

С конца 90-х годов в Тункинской долине в

50 км от юго-западной оконечности озера Байкал

на астрофизическом комплексе ИГУ-МГУ были

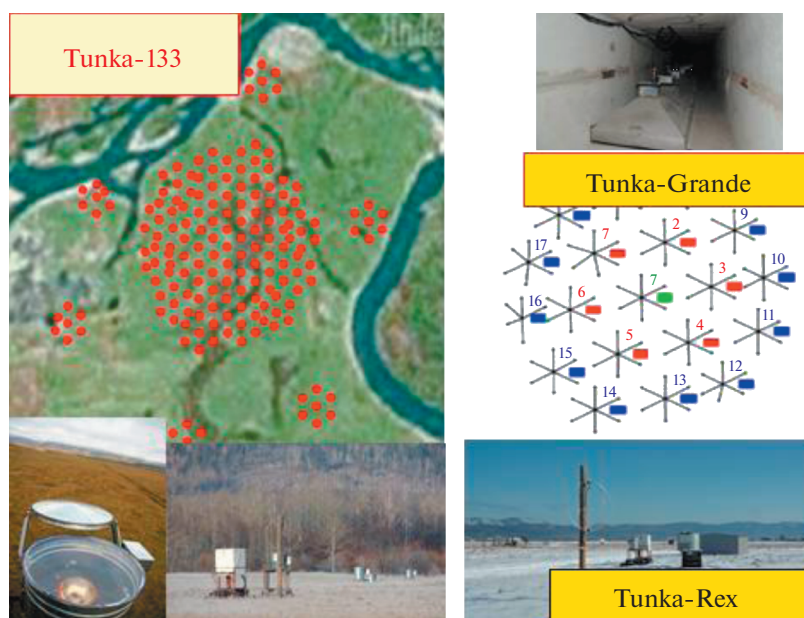


Рис. 1. Установки Тункинского астрофизического комплекса: Тунка-133 (слева), Тунка-Grande (справа верху, фото мюонного детектора и схема расположения сцинтилляционных станций), Тунка-Rex.

созданы установки для исследования космических лучей сверхвысоких энергий методом регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ): черенковские установки Тунка-25 [1] (2000 г.) и Тунка-133 [2, 3] (2011 г.), установка для регистрации заряженных частиц ШАЛ Тунка-Grande [4] (2015 г.), Тунка-Rex [5] (2014 г.) для регистрации радиоизлучения ШАЛ (рис. 1).

По данным этих установок восстановлен энергетический спектр космических лучей, охватывающий диапазон $2 \cdot 10^{14}$ – $2 \cdot 10^{18}$ эВ (рис. 2). На нижнем пороге полученный спектр демонстрирует прекрасное согласие с результатами прямых спутниковых и баллонных экспериментов, а на предельно высоких энергиях — согласие в пределах статистических ошибок с результатами гигантских установок Telescope Array и Pierre Auger Observatory. Таким образом, совместный спектр черенковских установок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE (будет описана далее) перекрывает четыре порядка по энергии единой методикой и демонстрирует прекрасное согласие результатов прямых спутниковых и баллонных экспериментов с результатами гигантских наземных установок.

В 2014 года началось развертывание комплекса установок TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) с гибридной системой детекторов [6]. В 2020 году планируется завершить развертывание пилотного комплекса TAIGA (рис. 3), состоящего из 120 широкоугольных (0.6 ср.) оптических станций TAIGA-HiSCORE на площади 1 км^2 , и 3 атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) с анали-

зом изображения — TAIGA-IACT. Эти установки будут дополнены мюонными детекторами установки TAIGA-Muon, расположенными на площади 1 км^2 . Комплекс TAIGA создается для решения широкого круга задач в области гамма-астрономии высоких энергий, физики заряженных космических лучей (КЛ) и астрофизики элементарных частиц.

2. ГАММА-АСТРОНОМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС TAIGA

Настоящий прорыв в исследовании высокоэнергичного гамма-излучения был достигнут в последнее десятилетие с помощью IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope), черенковских телескопов третьего поколения: H.E.S.S., MAGIC, VERITAS ([7–9]). Эти телескопы ориентированы на исследование энергетического диапазона 50 ГэВ–50 ТэВ.

В наиболее амбиционном современном проекте гамма-обсерватории СТА [10] запланировано размещение около 70 SST (Small Size Telescope) на площади 4.5 км^2 для исследования диапазона энергии выше 10 ТэВ. Помимо черенковских телескопов, важная информация о локальных источниках гамма-квантов в последнее время поступает от высокогорных установок, регистрирующих заряженные частицы широких атмосферных ливней (ШАЛ): Tibet-III, HAWC [11, 12]. К 2022–23 гг. в Тибете войдет в строй уникальная комплексная установка LHAASO [13].

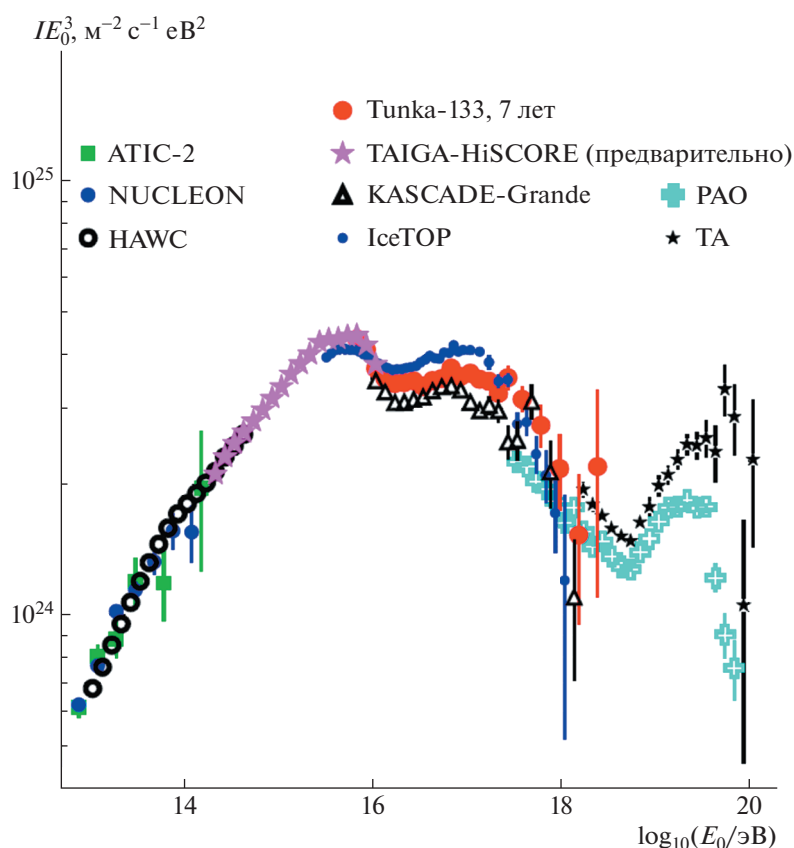


Рис. 2. Энергетический спектр по данным установок TAIGA-HiSCORE и Тунка-133 в сравнении с результатами других экспериментов.

С завершением развертывания первой очереди Астрофизического комплекса TAIGA [6, 14] площадью 1 км^2 в России возобновляются прерванные в начале 90-х годов исследования по гамма-астрономии на мировом уровне. Комплекс TAIGA создан для решения широкого круга задач в области гамма-астрономии высоких энергий, физики заряженных космических лучей и астрофизики элементарных частиц. Ожидаемая интегральная чувствительность пилотного комплекса TAIGA за 300 ч наблюдения источника при энергии 100 ТэВ составляет примерно $2.5 \cdot 10^{-13} \text{ ТэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и превосходит чувствительность эксплуатируемых установок в области энергий выше 40 ТэВ, но уступает будущей чувствительности LHAASO. Площадь полномасштабной гамма-обсерватории TAIGA будет в 10 раз больше — 10 км^2 , примерно на порядок вырастет и его чувствительность. Астрономический комплекс TAIGA будет самой северной гамма-обсерваторией и это расположение обеспечивает определенные преимущества для наблюдения источников с большими склонениями. Так, источник гамма-излучения в остатке сверхновой Тихо Браге, практически недоступный для установок HAWC и LHAASO, будет в поле зрения детекторов TAIGA в течение 500 ч в год.

В настоящее время видится следующая научная программа астрофизического комплекса:

1. Поиск предела ускорения частиц в известных остатках сверхновых и пульсарных туманностях. С использованием уникальных возможностей регистрации гамма-квантов высоких энергий астрофизическим комплексом TAIGA будут проведены длительные наблюдения и восстановлены энергетические спектры ряда источников, важных для понимания происхождения космических лучей: Крабовидная туманность и Boomerang (пульсарные туманности), Тихо Браге и Кассиопея А (остатки сверхновых), Dragonfly Nebula (Cygnus region) ARGO J2031+4157 (Cygnus Cocoon) (Superbubble). Детальные наблюдения этих источников гамма-обсерваторией TAIGA позволят ограничить вклады лептонных и адронных компонент и оценить максимальные энергии ускоренных частиц.

2. Длительный мониторинг и исследование края энергетического спектра ярких блазаров как метод поиска аномалий в распространении гамма-квантов во Вселенной и поиска аксионо-подобных частиц. Будет проведен длительный мониторинг, восстановлен энергетический спектр (или поставлен предел на поток) в диапазоне 3–

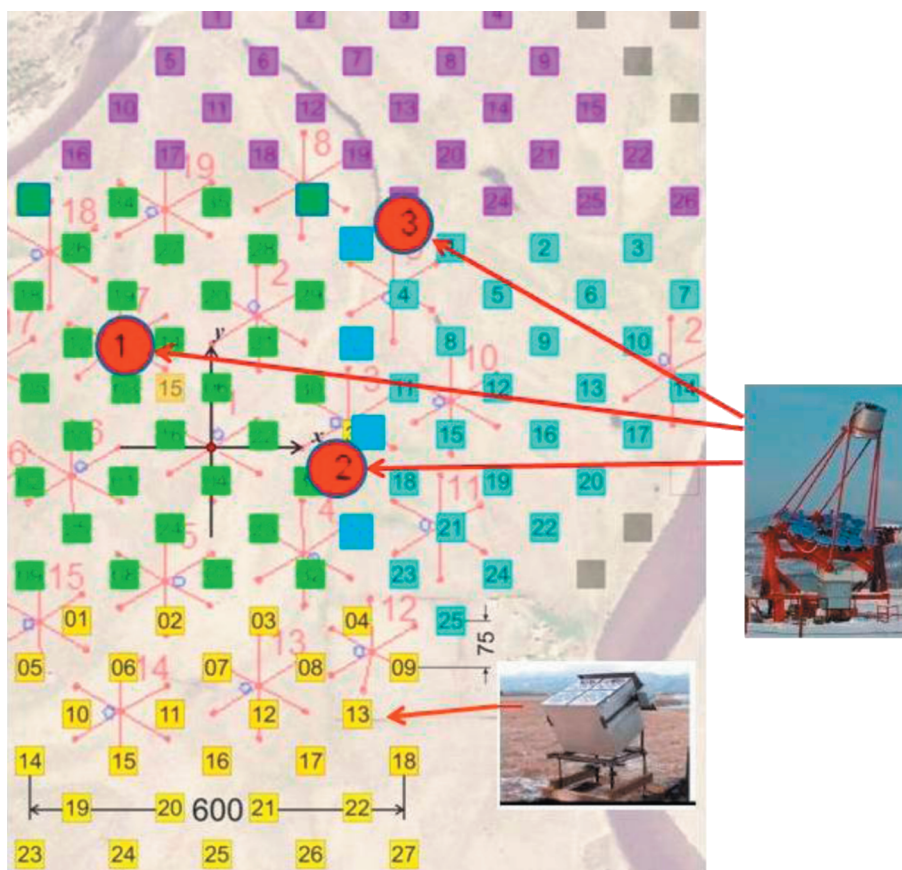


Рис. 3. Схема расположения оптических станций широкоугольной черенковской установки TAIGA-HiSCORE и трех АЧТ установки TAIGA-IACT астрофизического комплекса TAIGA.

40 ТэВ для близких внегалактических источников гамма-излучения — блазаров и галактик с высоким темпом звездообразования: 1ES 0229+200, 1ES 1959+650, Mrk501, Mrk421, Apg 220, M82.

3. Исследование массового состава и энергетического спектра космических лучей в области энергий пока недоступных прямым измерениям.

4. Поиск избыточного диффузного излучения гамма-квантов с энергией в диапазоне энергий 10^{14} – 10^{15} эВ, и области энергии выше 10^{17} эВ. Поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10^{14} – 10^{15} эВ позволит обнаружить избыточный поток гамма-квантов, сопровождающих астрофизические нейтрино, или поставить верхний предел на поток, тем самым подтвердив или опровергнув галактическое происхождение существенной доли астрофизических нейтрино, зарегистрированных телескопом IceCube.

3. СТАТУС КОМПЛЕКСА TAIGA

3.1. Широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE.

Широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays

and gamma Explorer) [15] представляет собой сеть из распределенных на площади около 1 км^2 с шагом 106 м оптических станций, которые разбиты на кластеры, примерно по 30 станций в каждом. В настоящее время установка TAIGA-HiSCORE состоит из 86 оптических станций. Все станции наклонены в южном направлении на 25° для увеличения времени наблюдения за источником гамма-квантов в Крабовидной туманности. Каждая оптическая станция содержит по четыре фотумножителя (ФЭУ) с диаметром фотокатода 20 или 25 см (ET9352, R5912 и R7081). Площадь каждого ФЭУ увеличена в 4 раза с помощью конуса Винстона, изготовленного из 10 сегментов зеркального материала Alanod 4300 UD. Угол обзора конуса $\pm 30^\circ$ (0.6 ср). Сигналы с анодов и промежуточных динодов оцифрованы с шагом 0.5 нс с помощью 8-канального модуля на основе микросхемы DRS-4. Станция соединена с центром сбора данных по волоконно-оптическому кабелю для передачи данных и синхронизации. Стабильность синхронизации оптических станций достигает около 0.2 нс.

Установка TAIGA-HiSCORE позволяет восстановить основные параметры ШАЛ (энергию и направления прихода). Энергетический порог

установки около 80 ТэВ для протонов и ядер и около 40 ТэВ для ШАЛ от гамма-квантов. Угловое разрешение — около 0.1 градуса для событий с числом сработавших станции больше 10, для событий с 4–5-ю сработавшими станциями угловое разрешение составляет 0.4° – 0.5° .

3.2. Атмосферные черенковские телескопы

Атмосферные черенковские телескопы установки TAIGA-IACT имеют составные зеркала системы Дэвиса–Коттона площадью $\sim 10 \text{ м}^2$ из 34 сегментов каждое, фокусное расстояние 4.75 м [14]. В фокусе зеркал установлены регистрирующие камеры из 560 фотоумножителей (ФЭУ) с диаметром фотокатода 2 см каждый (XP1911). Диаметр камер около 110 см. Угол обзора камеры 9.6° , угловой обзор одного пикселя 0.36° , $\text{PSF} = 0.07^{\circ}$. [16].

ПЗС-камера Prosilica GC1380 установлена на расстояние 1 м от оптической оси телескопа. ПЗС-камера используется для проверки наведения телескопа направление. Он имеет разрешение 1360×1024 пикселей на поле зрения $31.4^{\circ} \times 23.6^{\circ}$. Каждая ось телескопа оснащена шаговым двигателем Phytron, 17-битным датчиком положения вала и концевым выключателем, которые подключены к блоку управления PhyMOTION. Система сбора данных камеры достаточно подробно описана в работах [14, 17].

Камера собирается из однотипных кластеров по 28 ФЭУ в каждом. Кластер состоит из четырех групп по семь ФЭУ, имеющих единую плату делителей и единый высоковольтный источник питания и 64 канальный блок на основе специализированной интегральной микросхемы ASIC MAROC-3. Блок позволяет оцифровывать амплитуды сигналов с ФЭУ и вырабатывать локальный триггер кластера. Условием выработки локального триггера является превышение заданной амплитуды сигнала от заданного числа ФЭУ (обычно 2–4 ФЭУ) во временном окне 15 нс. Пороговая амплитуда выбиралась в диапазоне 8–10 фотоэлектронов (ф. э.). Локальный триггер кластера передается в центральный контроллер сбора данных камеры для формирования глобального триггера камеры. При формировании локального триггера камеры, считываются данные с АЦП кластеров. В 2019 в условие выработки глобального триггера камеры было добавлено требование того, чтобы локальный триггер вырабатывался от соседних ФЭУ кластера. Такой триггер был назван “топологическим”. Общий темп счета камеры снизился почти на порядок — с 1.5–2 кГц до 150–200 Гц. После выработки глобального триггера система выработки триггера блокируется на время необходимое для оцифровки сигналов и передачи данных из кластеров в центральный контроллер. Время блокировки равно 180 мкс.

Определение относительной чувствительности пикселей камеры и коэффициента пересчета от кода АЦП к числу фотоэлектронов выполнялась с помощью импульсного светодиода установленного вблизи оси телескопа [17].

По своим характеристикам наши телескопы соответствуют параметрам малых телескопов (SST) проекта СТА [10]. Угол обзора телескопов более чем в два раза превышает угол обзора телескопов предыдущего поколения. Это позволяет регистрировать ШАЛ с положением оси до 500 м от телескопа.

3.3. Сцинтилляционные установки в составе комплекса TAIGA

Недостатком черенковских детекторов для решения задач физики КЛ и гамма-астрономии является то, что они могут работать только в безлунные ночи при хорошей погоде, что, как минимум, на порядок сокращает время набора статистики. Сцинтилляционные детекторы частиц позволяют сделать наблюдения круглосуточными и всепогодными. В этой связи, в 2013–2015 гг. была построена установка Tunka-Grande в составе 19 сцинтилляционных станций, распределенных на площади 1 км^2 [4]. По данным установки Tunka-Grande за период 2015–2017 гг. был получен предварительный предел на поток диффузных гамма-квантов с энергией порядка 100 ПэВ. Дальнейшее развитие мы связываем с созданием установки TAIGA-Muon с общей площадью мюонных детекторов 2–3 тысячи м^2 . Для этой установки разработаны новые сцинтилляционные счетчики площадью 1 м^2 [18]. Средняя амплитуда сигнала при прохождении мюона для этих счетчиков составляет 20–25 ф. э., неоднородность сигналов в зависимости от места прохождения частицы $\pm 15\%$, временное разрешение не хуже 5 нс. Счетчики работают, закопанными в мокрый грунт без дополнительной защиты. В 2019 г. развернуто три первых кластера установки TAIGA-Muon. Каждый кластер в своем составе имеет 8 наземных и столько же подземных счетчиков. Счетчики расположены парами: наземные строго над подземными. Все восемь пар размещены по периметру квадрата со стороной 5 м. Расстояние между соседним парами составляет 1 м.

4. ПЕРВЫЕ СОБЫТИЯ ОТ ГАММА-КВАНТОВ

В течение сезона 2019–2020 гг. проводились наблюдения источников гамма-квантов в пульсарных туманностях Boomerang, Крабовидная туманность и блазарах Мрк-421 и Мрк-501. В сезоне наблюдения 2019–2020 применялась вобблинг-методика [19]. Она заключается в том, что источник при наблюдении попадает не в центр камеры, а несколько отстоит от него, в нашем случае на

1.2°. Спустя 20 мин положение источника меняется на диаметрально противоположное. События, параметры которых рассчитываются относительно направления на источник, называются ON-события, а относительно диаметрально противоположной точки считаются фоновыми — OFF-события. Такой подход позволяет не тратить дополнительное время на набор данных из области неба, где источник отсутствует, что необходимо для оценки статистической значимости наблюдений, а также исключает влияние систематических ошибок, связанных с конкретной областью камеры.

Полная обработка данных этого сезона не завершена, тем не менее можно заключить, что телескопы комплекса сдали “первый экзамен” — выделены гамма-кванты от Крабовидной туманности на уровне значимости больше шести сигм [20] и на уровне значимости пяти сигм от блазара Мрк-421 [21].

Кратко опишем процедуру обработки данных. Данные камеры телескопа содержат амплитуду сигналов с пикселей и время выработки локального триггера. Данные приходящие в течение двух минут записываются в один файл. На первом этапе данные с различных кластеров объединяются в одно событие по времени локального триггера. Далее по данным восстанавливается пьедестал АЦП для данного пикселя и RMS размытия пьедестала для данного двухминутного интервала. После вычитания значения пьедестала амплитуда данного пикселя с использованием данных калибровки переводилась в фотоэлектроны (ф.э.). Величина RMS (σ) пьедестала зависит от уровня фоновой засветки и находится в интервале от 1.5 до 3 ф.э. Следующим этапом является процедура очистки (cleaning) пикселей, в которых амплитуды сигналов определяются числом фотонов черенковского света ШАЛ от пикселей, в которых сигналы формировались за счет флуктуация светового фона. Для этого использовался следующий подход: все пиксели с амплитудой выше 6σ относились к пикселям от ШАЛ, так же как и пиксели с амплитудой выше 3σ , если имелся соседний пиксель с амплитудой выше 6σ . После проведения процедуры очистки, дополненной ограничением снизу на число пикселей в событии ($N_{\text{pix}} \geq 4$), темп счета событий уменьшался до ~ 10 Гц в условиях отличной погоды. В анализ были включены периоды наблюдения с темпом счета выше 6 Гц. Время наблюдения источника с таким темпом счета за безлунные периоды с начала ноября по 6 декабря составило 40.5 ч.

Дальнейший анализ проводился с использованием параметров Хилласа [22]: WIDTH, LENGTH, DIST, ALPHA (рис. 4). Угол ALFA — угол между большой осью эллипса Хилласа и линией, соединяющий центр тяжести изображения и точку ка-

меры, в которую попадет в данный момент источник. Другой важный для анализа параметр SIZE — сумма всех фотоэлектронов в изображении ШАЛ после процедуры очистки. Параметр SIZE является хорошей оценкой энергии ШАЛ при условии, что ось ШАЛ находится на расстоянии не больше 120 м от телескопа. SIZE ~ 100 ф.э. примерно соответствует энергии ШАЛ от гамма-кванта с энергий 3 ТэВ. Для выделения сигнала от гамма-квантов надо подавить число адронных событий в 10^4 раз. Для нашей камеры это становится возможным при подборе оптимальных катов сверху на параметры Хилласа при условии, что SIZE > 100 ф.э. и ALFA $< 10^\circ$. Моделирование показывает, что для ШАЛ от гамма-квантов от источника величина угла ALFA меньше 15° , а для фоновых ШАЛ от космических лучей ALFA распределено равномерно от 0° до 90° . На рис. 5 приведены распределения по углу ALFA для ON- и OFF-событий при подобранных катах на параметры Хилласа, при параметре SIZE > 130 ф.э. Разность между числом ON- и OFF-событий при ALFA $< 10^\circ$ равна 164. Статистическая значимость этого избытка событий составляет 6.3σ по методике Li и Ma [24].

При энергии гамма-квантов выше 10 ТэВ становится возможным использовать стереоскопический подход — ШАЛ от гамма-квантов регистрируется двумя и большим числом телескопов. Такой подход показал свою эффективность в современных гамма-обсерваториях (MAGIC, H.E.S.S., VERITAS) при расстоянии между телескопами до 100 м. Стереоскопический подход будет использован и в СТА, малые телескопы будут расположены на расстоянии 250 м. Пример имиджа ШАЛ, зарегистрированного нашими двумя телескопами, показан на рис. 6.

При энергиях выше 40 ТэВ становится возможным новый “гибридный” подход к регистрации гамма-квантов — регистрация ШАЛ как телескопами, так и установкой TAIGA-HiSCORE. Главным преимуществом работы АЧТ в сети широкоугольных черенковских станций является более эффективное выделение событий от гамма-квантов из фона ШАЛ от заряженных космических лучей. Информация о параметрах имиджа ШАЛ (параметрах Хилласа) дополняется параметрами ШАЛ (положение оси, направление прихода ШАЛ, энергия), которые хорошо восстанавливаются широкоугольной установкой TAIGA-HiSCORE. Первые “гибридные” события от гамма-квантов с энергий 45–60 ТэВ уже выделены [25].

5. ШИРОКОУГОЛЬНАЯ КАМЕРА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

Для выделения событий от гамма-квантов на фоне ШАЛ от заряженных КЛ данные от установ-

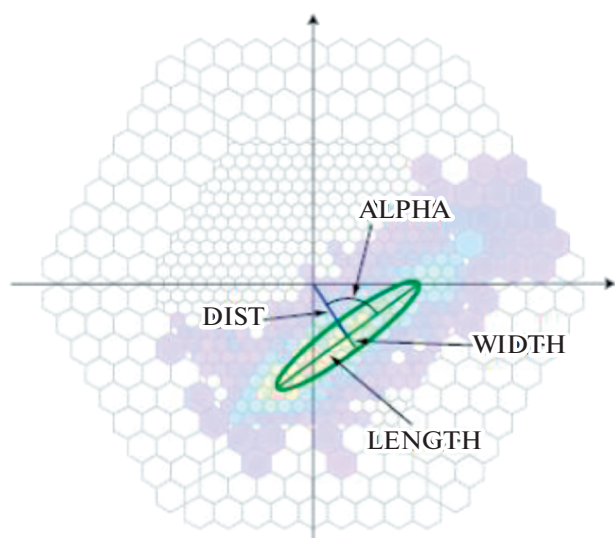


Рис. 4. Параметризация изображения ШАЛ с помощью параметров Хилласа [23].

ки TAIGA-HiSCORE объединяются с данными об изображениях ШАЛ, получаемых АЧТ установки TAIGA-IACT. Главный недостаток сочетания этих установок — существенное отличие в их апертурах. При диаметре поля зрения камеры около десяти градусов телесный угол АЧТ установки TAIGA-IACT в 25 раз меньше, чем телесный угол установки TAIGA-HiSCORE, и только 4% событий, зарегистрированных установкой TAIGA-HiSCORE, попадают в поле зрения АЧТ.

Для исправления этого недостатка разрабатываются телескопы с диаметром поля зрения 15° и

эффективной площадью 1 м^2 . Энергетический порог этих телескопов составит примерно 10 ТэВ. В перспективе диаметр поля зрения новых телескопов может быть доведен до шестидесяти градусов и сравняться с апертурой установки TAIGA-HiSCORE. В качестве фотодетекторов в новой камере будет использовано около 1200 кремниевых фотоумножителей (SiPM). Камера на основе SiPM имеет ряд преимуществ: SiPM не деградируют от сильного светового фона, имеют одинаковые параметры, требуют напряжения питания только в несколько десятков вольт, компактны, легки и потребляют мало энергии. Оптическая система телескопа разрабатывается с использованием линз Френеля.

Для проведения длительных испытаний SIPM и измерительной системы на их основе разработан экспериментальный образец телескопа SIT (Small Imaging Telescope) на базе 49 SIPM типа MicroFC-SMTPA-60035 и установлен для совместной работы с установкой TAIGA-HiSCORE. В телескопе использована оптическая система Шмидта с углом обзора $\pm$ десять градусов и площадью входного окна 0.1 м^2 . SIT установлен в стандартный оптический контейнер установки TAIGA-HiSCORE и подключен к системе сбора данных этой установки. По данным установки TAIGA-HiSCORE можно восстановить направление прихода, энергию и положение оси ШАЛ, вызвавшего срабатывания телескопа SIT и тем самым изучить эффективность регистрации ШАЛ этим телескопом.

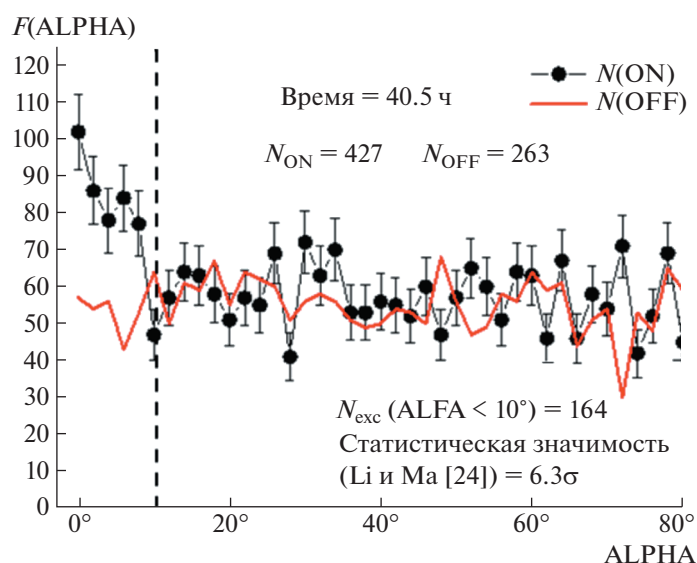


Рис. 5. Распределения по параметру ALFA, для ON и OFF событий (красная линия) после применения системы ограничения на параметры Хилласа, SIZE > 130 ф.э. Избыток событий для ALFA < 10° равен 164.

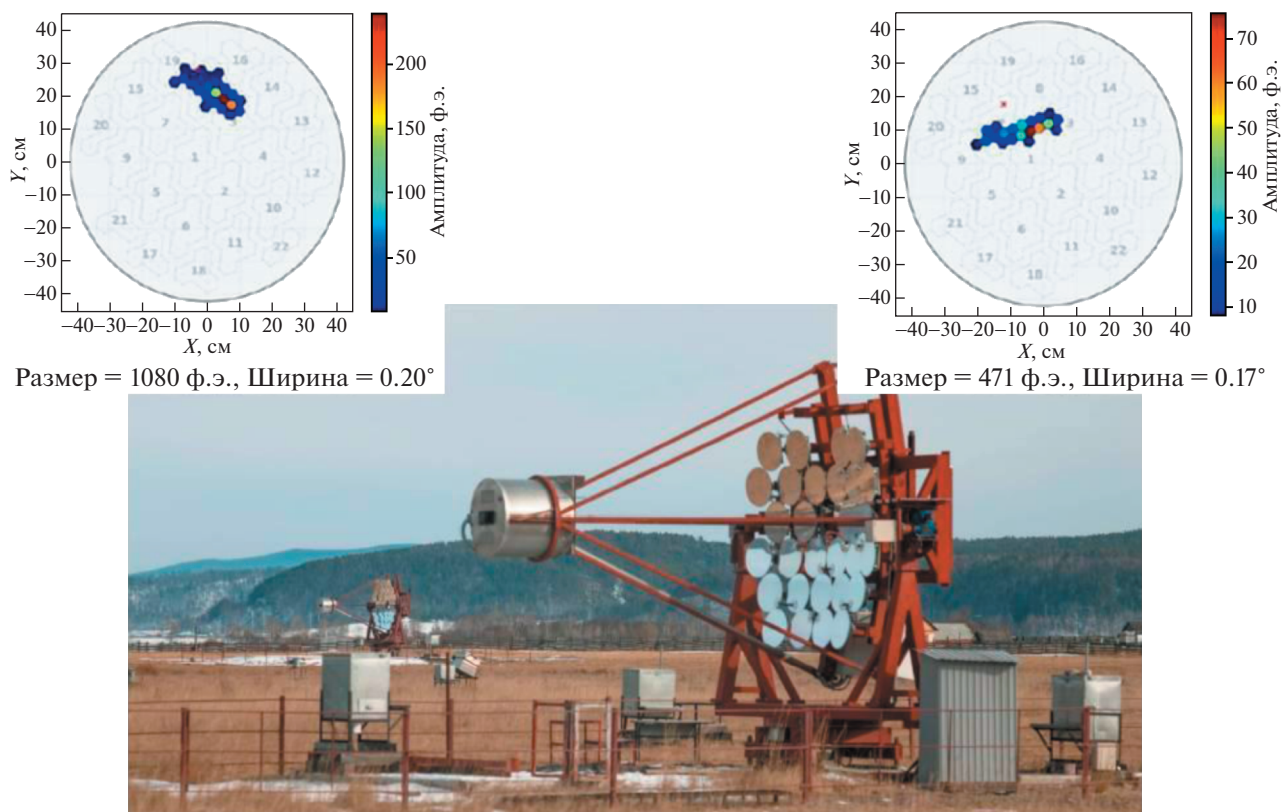


Рис. 6. Два первых телескопа комплекса TAIGA и пример изображения совместного события в двух камерах.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конце 2020 г. завершается развертывание первой очереди астрофизического комплекса TAIGA. Результаты, полученные в сезоне 2019–2020 гг., внушают оптимизм в возможности выполнения описанной в разделе 2 научной программы. Ближайшее развитие комплекса на один–два года связано с началом работы четвертого атмосферного телескопа и широкоугольной камеры на кремниевых фотоумножителях. Существует и более амбициозный план развития астрофизического комплекса в Тункинской долине, но реализация этого плана во многом зависит от дополнительного финансирования. Возможное расширение комплекса TAIGA до площади 10 км^2 целесообразно проводить на территории, расположенной на высоте 2000 м над уровнем моря, при более высоком проценте безоблачных ночей по сравнению с Тункинской долиной.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Минобрнауки России (гос. задание FZZE-2020-0024, соглашение № 075-15-2019-1631), РФФ (проекты: 19-72-20067 (разд. 4), 19-72-20173 (разд. 3.2), 19-72-00010 (разд. 3.3), 19-72-20230 (разд. 5)), РФФИ (проекты № 19-52-44002, 19-32-60003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Budnev N. et al. // *Astropart. Phys.* 2013. V. 50–52. P. 18–25.
2. Berezhnev S. et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2012. V. 692. P. 98–106.
3. Budnev N. et al. // *Astropart. Phys.* 2020. V. 117. P. 102406.
4. Monkhoev R.D. et al. // *Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys.* 2017. V. 81. P. 4.
5. Schröder G. et al. // *EPJ Web Conf.* 2017. V. 135. P. 01003.
6. Budnev N. et al. (TAIGA Collab.) // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2017. V. 845. P. 330–333.
7. Aharonian F. (HESS Collab.) // *Astropart. Phys.* 2011. V. 34. P. 738–747.
8. Acciari V. (VERITAS Collab.) // *Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 730. P. L20.
9. Albert et al. (MAGIC Collab.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 639. P. 761–765.
10. Acharya B.S. et al. (CTA Collab.) // *Astropart. Phys.* 2013. V. 43. P. 3.
11. Amenomori M. et al. (Tibet Collab.) // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 123. No. 5. P. 051101; arXiv: 1906.05521.
12. Sinis G. (on behalf of the Milagro and HAWC Collabs.) // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2010. V. 623. P. 410.
13. An Q. et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2011. V. 644. P. 11–17.
14. Kuzmichev L.A. (TAIGA Collab.) // *Phys. At. Nucl.* 2018. V. 81. P. 497–507.

15. Gress O. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2016. V. 845. P. 367–372.
16. Zhurov D. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1181. P. 012045.
17. Lubsandorzhiev N. et al. (TAIGA Collab.) // PoS(ICRC2017). 2017. P. 757.
18. Astapov I. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2019. V. 936. P. 254–256.
19. Fomin V.P. et al. // Astropart. Phys. 1994. V. 2. No. 2. P. 137–150.
20. Budnev N. et al. (TAIGA Collab.) // Report at Int. Conf. INSTR-2020. Feb. 24–28, 2020, Novosibirsk.
21. Volchugov P. Master's Thesis. 2020. Moscow: Mosc. State Univ. (in Russian).
22. Hillas A.M. // Proc. 19th Int. Cosmic Ray Conference, La Jolla, USA, 1985.
23. Albert J. et al. // Astrophys. J. 2008. V. 674. P. 1037–1055.
24. Li T.-P., Ma Y.-Q. // Astrophys. J. 1983. V. 272. P. L317.
25. Kuzmichev L. et al. (TAIGA Collab.) // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 952. P. 161830.

Experimental Complex TAIGA

L. Kuzmichev^{1,*}, I. Astapov², P. Bezyazykov³, M. Blank⁴, Ye. Bonvech¹, A. Borodin⁵, M. Brückner⁶, N. Budnev³, A. Bulan¹, A. Vaidyanathan⁷, R. Wischnewski^{6,5}, P. Volchugov¹, D. Voronin⁸, A. Gafarov³, O. Gress³, T. Gress³, O. Grishin¹, A. Garmash^{7,9}, V. Grebenyuk^{5,10}, A. Grinyuk⁵, A. Dyachok³, D. Zhurov³, A. Zagorodnikov³, A. Ivanova^{9,3}, N. Kalmykov¹, Yu. Kazarina³, V. Kindin², V. Kiryukhin³, R. Kokoulin², K. Kompaniets², E. Korosteleva¹, V. Kozhin¹, E. Kravchenko^{7,10}, A. Kryukov¹, A. Chiavassa¹¹, A. Lagutin¹², Yu. Lemeshev³, B. Lubsandorzhiev⁸, N. Lubsandorzhiev¹, R. Mirgazov³, R. Mirzoyan^{13,1}, R. Monkhoev³, E. Osipova¹, A. Pakhorukov³, A. Pan⁵, M. Panasyuk¹, L. Pankov³, A. Petrukhin², D. Podgrudkov¹, V. Poleshchuk³, M. Popesku¹⁴, Ye. Popova⁸, A. Porelli^{6,5}, E. Postnikov¹, V. Prosin¹, V. Ptuskin¹⁵, A. Pushnin³, R. Raikin¹², G. Rubtsov⁸, E. Ryabov³, Ya. Sagan^{5,10}, V. Samoliga³, A. Silaev¹, A. Silaev, Jr.¹, A. Sidorenkov⁸, A. Skurikhin¹, M. Slunechka⁵, A. Sokolov^{7,9}, L. Sveshnikova¹, Ya. Suvorkin³, V. Tabolenko³, A. Tanaev³, B. Tarashchansky³, M. Ternovoy³, L. Tkachev^{5,10}, M. Tluczykont⁴, N. Ushakov⁸, O. Fedorov³, D. Horns⁴, D. Chernov¹, D. Chernykh³, D. Shipilov³, and I. Yashin²

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University (MSU), Moscow, 119991 Russia*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

³*Institute of Applied Physics, Irkutsk State University (ISU), Irkutsk, 664003 Russia*

⁴*Institute for Experimental Physics, University of Hamburg, Hamburg, D-20148 Germany*

⁵*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia*

⁶*Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Zeuthen, D-15738 Germany*

⁷*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

⁸*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

⁹*Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

¹⁰*Dubna State University, Dubna, Moscow oblast, 141982 Russia*

¹¹*Department of General Physics, University of Torino, and INFN, Torino, 10125 Italy*

¹²*Altay State University, Barnaul, 656049 Russia*

¹³*Planck Institute for Physics, Munich, D-80805 Germany*

¹⁴*Institute of Space Science, Bucharest-Magurele, 077125 Romania*

¹⁵*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

*e-mail: kuz@dec1.sinp.msu.ru

Received June 9, 2020; revised June 14, 2020; accepted June 15, 2020

Abstract—The article describes the TAIGA astrophysical complex (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy), the deployment of the first stage of which is completed in the Tunka valley, 50 km from lake Baikal. The scientific program of the complex, the first results and plans for further development of the complex are discussed.

Keywords: cosmic gamma-rays radiation, Cherenkov light, extensive air shower, imaging atmospheric telescope (IACT)