

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 524.1-52

СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА TAIGA: ГАММА АСТРОНОМИЯ

© 2024 г. Л. Г. Свешникова^{a, *}, И. И. Астапов^b, П. А. Безъязыков^c, А. Блинов^d, Е. Бонвеч^a, А. Н. Бородин^d, Н. М. Буднев^c, А. Булан^a, А. Вайдянатан^e, Н. Волков^f, П. Волчугов^a, Д. Воронин^g, А. Ю. Гармаш^{e, h}, А. Р. Гафаров^c, В. М. Гребенюк^{d, i}, Е. Гресс^c, О. А. Гресс^c, Т. И. Гресс^c, А. А. Гринюк^d, О. Г. Гришин^a, А. Н. Дячок^c, Д. П. Журов^c, А. В. Загородников^c, А. Л. Иванова^{c, h}, М. Илюшин^c, Н. Н. Калмыков^a, В. В. Киндин^b, С. Н. Кирюхин^c, В. А. Кожин^a, Р. П. Кокоулин^b, Н. Колосов^c, К. Г. Компаниец^b, Е. Е. Коростелева^a, Е. А. Кравченко^{c, h}, А. П. Крюков^a, Л. А. Кузьмичев^a, А. Кьявасса^j, М. Лаврова^d, А. А. Лагутин^f, Ю. Лемешев^c, Б. К. Лубсандоржиев^g, Н. Б. Лубсандоржиев^a, Р. Р. Миргазов^c, Р. Д. Монхоев^c, Е. Окунева^a, Э. А. Осипова^a, А. Пан^d, А. Панов^a, Л. В. Паньков^c, А. Л. Пахоруков^c, А. А. Петрухин^b, Д. Подгрудков^a, Е. Г. Попова^g, Е. Б. Постников^a, В. В. Просин^a, В. С. Птускин^k, А. А. Пушнин^c, А. Разумов^a, Р. И. Райкин^f, Г. И. Рубцов^g, Е. В. Рябов^c, В. С. Самолига^c, Е. Сатышев^d, А. Ю. Сидоренков^g, А. А. Силаев^a, А. А. Силаев (мл.)^a, А. В. Скурихин^a, А. В. Соколов^{c, h}, В. А. Таболенко^c, А. Танаев^c, М. Терновой^c, Л. Г. Ткачев^{d, i}, Н. Ушаков^g, Д. Чернов^a, Д. Шипилов^c, И. И. Яшин^b

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

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

^cНаучно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003 Россия

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

^eНовосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, 630090 Россия

^fАлтайский государственный университет, Барнаул, 656049 Россия

^gИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^hИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), Новосибирск, 630090 Россия

ⁱУниверситет “Дубна”, Дубна, Московская обл., 141982 Россия

^jФизический факультет университета Турина и Национальный институт ядерной физики, Турин, 10125 Италия

^kИнститут Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Троицк, Московская обл., 108840 Россия

*E-mail: tf110@mail.ru

Поступила в редакцию 13.06.2023 г.

После доработки 29.06.2023 г.

Принята к публикации 10.07.2023 г.

В статье представлен статус эксперимента TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy), расположенного в Тункинской долине. В статье в основном представлены задачи и развитые подходы для их решения, а также первые результаты по гамма-астрономии высоких энергий (10 и более тераэлектронвольт), полученные по двух-трех-летней экспозиции. Обсуждаются актуальные задачи гамма-астрономии и планы развития установки.

Ключевые слова: гамма-астрономия, широкие атмосферные ливни, атмосферные черенковские телескопы, источники высокоэнергичных космических лучей

DOI: 10.56304/S207956292301027X

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) по черенковскому излучению заряженных частиц ливня в атмосфере

дала начало бурному развитию гамма астрономии тераэлектронвольтных энергий, начиная с первого телескопа [1] и продолжая уже в 21 в. серией выдающихся результатов, полученных с помощью имиджевых атмосферных черенковских те-

лескопов (IACT или в русскоязычной литературе АЧТ) в экспериментах: H.E.S.S. [2], MAGIC [3] и VERITAS [4]. Черенковские телескопы регистрируют угловое распределение черенковского излучения ШАЛ на матрице фотоумножителей, расположенных в фокусе зеркала. Эта методика (в моно и стерео режимах) позволила значительно увеличить количество обнаруженных источников гамма-излучения в области 1–100 ТэВ: ~200 за последние 30 лет, среди которых установлено несколько категорий источников гамма-излучения VHE: пульсары и туманности пульсарного ветра, остатки сверхновых, двойные системы и т.д. Ожидаемых из теории (например, [5]) основных ускорителей космических лучей Сверхновых типа Ia или Пвс с мощной ударной волной, на фронте которой происходит ускорение Ферми первого рода, и частицы могут ускоряться до петаэлектрон-вольтовых энергий, гамма-источников высокой энергии оказалось совсем мало.

В Тункинской долине (51.49 с.ш., 103.04 в.д.), в 50 км от Южной части озера Байкал с начала 90-х годов развивался метод регистрации ШАЛ высоких энергий по черенковскому свету с помощью сети широкоугольных черенковских станций. На установке Тунка-133, созданной в 2009 г., был измерен спектр космических лучей и состав в области энергий $6 \cdot 10^{15}$ – 10^{18} эВ, и обнаружена новая особенность в спектре космических лучей (КЛ) при энергии $\sim 2 \cdot 10^{16}$ эВ, которая была подтверждена в ряде экспериментов [6].

Успешность эксперимента Тунка-133 стимулировала создание в Тункинской долине астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy). В состав комплекса входят две черенковские установки – TAIGA-HiSCORE и TAIGA-IACT. Установка TAIGA-HiSCORE аналогична установке Тунка-133, но с более низким энергетическим порогом [7, 8]. Установка настраивалась на регистрацию не только КЛ, но и ливней от гамма-квантов высоких энергий порядка десятков тераэлектронвольт, так как именно в этой области статистика гамма-квантов, накопленная телескопами IACT, была недостаточной. Метод регистрации был адаптирован для новых задач: уменьшен порог каждой станции и расстояние между ними. В результате порог по энергии установки оказался 100 ТэВ для адронов и около 50 ТэВ для гамма-индуцированных ливней.

В настоящее время площадь установки TAIGA-HiSCORE доведена до 1 км²: 120 станций с более низким порогом регистрации черенковского света ~2000 фотонов на станцию, в телесном угле 0.6 ср, располагающихся на расстоянии около 100 м друг от друга. Наносекундная точность регистрации импульса в каждой станции позволила с достаточно хорошей точностью восстано-

вливать угол прихода ливня: 0.1° – 0.2° при более десяти сработавших станций, энергия гамма-кванта при этом выше 100 ТэВ.

Установка TAIGA-IACT включает три имиджевых телескопа АЧТ, расположенных на расстоянии около 300–500 м друг от друга. Третий телескоп начал работать в 2022 г. Подробности установки можно найти в [9, 10]. АЧТ TAIGA-IACT имеет составное зеркало системы Дэвиса–Коттона площадью ~10 м² и фокусным расстоянием – 4.75 м. В фокусе зеркал установлена регистрирующая камера, содержащая около 600 ФЭУ с диаметром фотокатода 19 мм. Диаметр угла обзора камеры – 9.6° . Угол обзора каждого пикселя – 0.36° . Описание системы сбора информации, триггерной системы и калибровки можно найти в [10]. Общий план установки приведен на рис. 1.

2. ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА TAIGA

Основные задачи эксперимента TAIGA связаны с исследованием заряженных космических лучей и гамма-квантов в области от десятков тераэлектронвольт до 1000 ПэВ. Первая задача – исследование КЛ – включает в себя как восстановление энергетического спектра всех частиц и среднего массового состава космических лучей, так и восстановление спектров групп ядер. Это исследование может нести информацию о смене основных источников КЛ в различных областях энергии. Вторая задача – исследование гамма-квантов высоких энергий – дополняет первую. Поскольку гамма-кванты позволяют определить направление на источник, в отличие от заряженной компоненты, и понять в каких источниках ускоряются КЛ. Обе задачи напрямую связаны с проблемой происхождения космических лучей в области энергий выше 1 ПэВ, нерешенной до сих пор. Источники, ускоряющие частицы до петаэлектрон-вольтовых энергий – Пэватроны – должны наблюдаться в гамма-лучах с энергией более 100 ТэВ (UHE ультраэнергичные гамма-кванты). Еще три года назад с помощью IACT регистрировались единичные гамма-кванты с энергией более 100 ТэВ, и стоял вопрос, а должны ли они быть вообще. Ситуация резко изменилась с публикацией новой высокогорной установкой LHAASO, когда уже после года наблюдения было объявлено о 12 ПэВатронах со статистической значимостью более 7σ и максимальной энергией, достигающей до 1.4 ПэВ, [11]. UHE гамма-кванты зарегистрированы и на установках Tibet ASgamma [12] и HAWC [13]. Совсем недавно был опубликован новый каталог 43 ПэВатронов, в которых наблюдались UHE гамма-кванты [14]. Этот прорыв произошел при переходе от узкоугольных телескопов (до 5°) и ограниченным временем наблюдения черенковского света в безлунные ночи с хорошей погодой (15% общего времени) к широкоугольным уста-

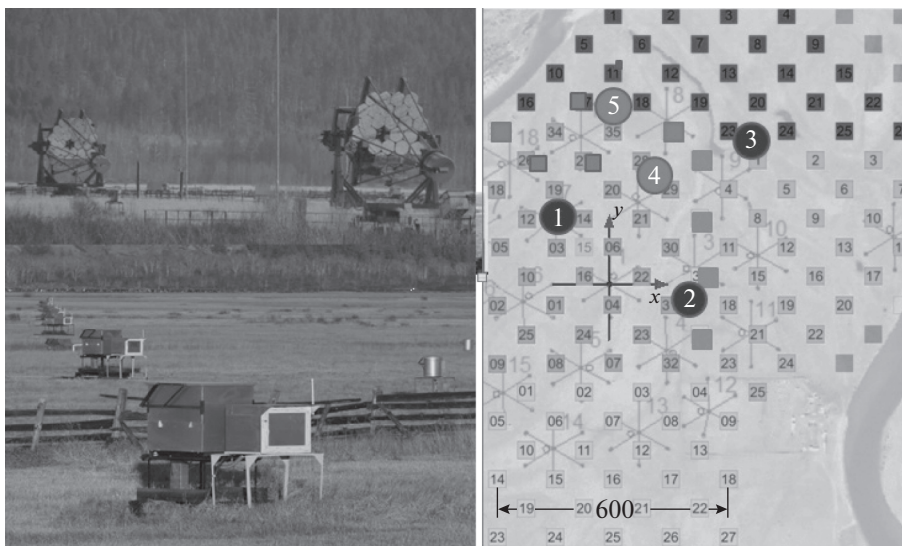


Рис. 1. План комплекса TAIGA: 120 станций установки TAIGA-HiSCORE и 5 телескопов, один из которых приведен на рисунке справа внизу, а справа сверху приведены станции TAIGA-HiSCORE.

новкам, регистрирующим ШАЛ круглосуточно. В них используется совершенно другая система подавления фона, основанная на малом числе мюонов в гамма-ливнях (как в LHAASO) или на ширине и неоднородности ШАЛ от адронов по сравнению с гораздо более узкими ШАЛ от гамма-квантов. Поиск UHE гамма квантов по черенковскому свету продолжает оставаться актуальным для согласования, проверки и уточнения результатов, полученных на высокогорных установках.

3. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ TAIGA

Для исследования всего доступного для наблюдения энергетического диапазона в эксперименте TAIGA используются три режима регистрации ШАЛ. Моно-режим применяется для регистрации гамма-квантов с энергиями более 3–5 ТэВ (в зависимости от склонения источника) только одним АЧТ [15]. Для детектирования гамма-квантов с энергиями выше 10 ТэВ возможно применение стерео-подхода – ШАЛ регистрируется двумя и более АЧТ [16]. И гибридный подход заключается в использовании совместных данных, полученных с помощью АЧТ и широкоугольных станций HiSCORE [17]. Данный метод является уникальным для современных гамма-экспериментов и нацелен на регистрацию гамма-квантов с энергиями более 40–60 ТэВ (в зависимости от склонения источника). В этом методе восстановление энергии первичной частицы, направление и положение оси ШАЛ проводится посредством анализа данных установки TAIGA-HiSCORE. Для определения типа первичной частицы, породив-

шей ШАЛ, используются данные установки АЧТ, позволяющие выделять гамма- индуцированные события по форме имиджа в телескопе [15].

4. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В МОНО-, СТЕРЕО- И ГИБРИДНОМ РЕЖИМАХ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

В течение двух десятков лет каждая новая гамма-обсерватория начинала свою работу с регистрации гамма-излучения от Крабовидной туманности, которая рассматривается как “стандарт-

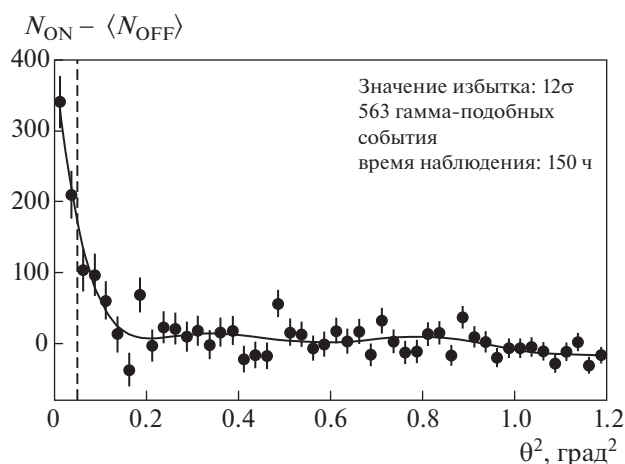


Рис. 2. Распределение $N_{ON}(\theta^2) - \langle N_{OFF}(\theta^2) \rangle$ после подавления фона по критерию (1) в моно-режиме наблюдений. В области $\theta^2 < 0.05$ избыток составляет 563 гамма-подобных событий, полученных со значимостью 12σ .

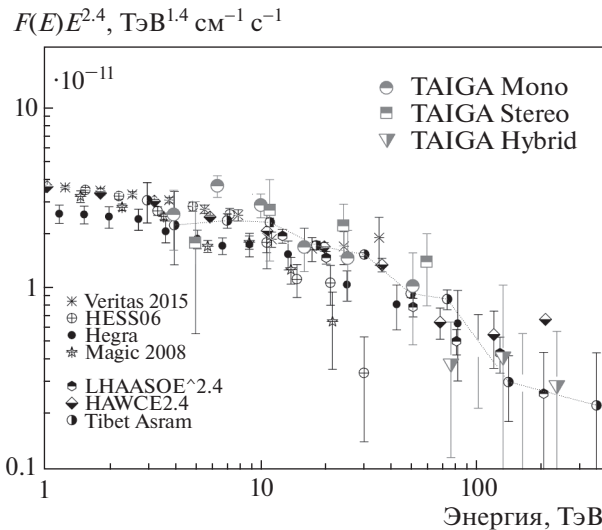


Рис. 3. Восстановленный спектр гамма-излучения от Крабовидной туманности разными методами: в моно-режиме работы одного телескопа, в стерео-режиме двумя телескопами и в гибридном режиме HiSCORE + АЧТ. Данные других экспериментов: IACTs [24–27], LHAASO, Tibet AsGamma, HAWC [11–13].

ный источник” [1]. Исследования в эксперименте TAIGA также начались с восстановления спектров этого источника. Наблюдения источника в эксперименте TAIGA проводятся в режиме *wobble*, предложенном в [18] и реализованном в ряде экспериментов, в том числе эксперименте TAIGA [19]. Наблюдения проводятся с августа по май с разделением времени между несколькими основными источниками. Первичная процедура реконструкции параметров изображений ШАЛ в нашем эксперименте подробно описана в [17], а Монте-Карло расчеты, обосновывающие подход – в [20]. Все параметры Хилласа, включая *dist* (угол между центром тяжести изображения и положением источника в камере) и *alpha* (угол между основной осью эллипса Хилласа и вектором, направленным из центра тяжести изображения на положение источника), восстанавливаются как для истинного положения источника в камере (ON-события), так и для нескольких точек в камере, смещенных на определенный угол относительно положения источника (OFF-события).

В эксперименте TAIGA в настоящее время используется метод выбора точек фона “*reflected-region-background*”, разработанный специально для *wobbling* процедуры наблюдения источника [21]. Таких точек фона для отбора OFF-событий N_{bcg} выбиралось от 5 до 16, что приводит к увеличению значимости полученного избытка событий, который находится по формуле из работы [22]:

$$\text{Excess} = \frac{(N_{\text{ON}} - \langle N_{\text{OFF}} \rangle) / \sqrt{N_{\text{ON}} + \langle N_{\text{OFF}} \rangle}}{N_{\text{bcg}}} \quad (1)$$

Помимо параметров Хилласа для каждого события в моно-режиме определяются энергии с точностью 25–30% и θ – угол между направлением на источник и направлением прихода ШАЛ. Это угол восстанавливается с точностью $\sim 0.2^\circ$, определяется методом, предложенным в работе [23].

Первые результаты детектирования гамма-квантов от Крабовидной туманности телескопом АЧТ01 в двух сезонах 2019–2020 (101 ч) и 2020–2021 (49 ч) получены следующим образом. На первом этапе подавление фона и выделение группы гамма-подобных ливней проводилось по критериям, определяющим размер и форму имиджа, настроенным по Монте-Карло моделированию, а на финальном этапе для выделения гамма-подобных событий строилось распределение по параметру θ^2 для разности между $N_{\text{ON}} - \langle N_{\text{OFF}} \rangle$. На рис. 2 приведено распределение $N_{\text{ON}}(\theta^2) - \langle N_{\text{OFF}}(\theta^2) \rangle$.

Для перехода к потоку гамма-квантов рассчитывалась эффективная площадь установки S_{eff} , которая отражает площадь, с которой детектируются гамма-подобные события, прошедшие критерии отбора. Для моно-режима $S_{\text{eff}} \sim 0.08 \text{ км}^2$ в области более 10 ТэВ, в области 5 ТэВ она меньше и составляет 0.03. На рис. 3 представлен энергетический спектр гамма-квантов, полученный за 150 ч наблюдений. В последнем бине (30–80 ТэВ) спектра зафиксировано 16 событий. Наблюдается удовлетворительное согласие со спектрами, измеренными в ряде других экспериментов.

Сtereo-режим дает возможность значительно улучшить точность восстанавливаемых характеристик ШАЛ [16]. Для определения направления прихода ШАЛ проводится расчет положений главных осей изображений в камере каждого телескопа. Точка пересечения этих осей в общем поле зрения телескопов соответствует положению источника гамма-квантов. Положение оси ШАЛ в плоскости перпендикулярной направлению прихода ливня определяется как точка пересечения прямых, проходящих через центр тяжести изображения и положения источника в камере [16]. Кроме того, возможно восстановление глубины максимума развития ливня и энергии частицы. Получены следующие точности этих параметров: θ определяется как разность между истинным положением источника и восстановленным положением источника в камере – 0.15° ; положение оси ШАЛ восстанавливается с точностью 5 м, положение максимума развития ливня с точностью 36 г/см², разрешение восстанавливаемого спектра гамма-

квантов по энергии $\sim 10\%$, эффективная площадь зависит от критериев отбора и составляет около 0.6 км^2 , подавление адронного фона составляет $\sim 10^{-5}$ при такой эффективной площади.

Наблюдения Крабовидной туманности в стерео-режиме проводились первыми двумя телескопами установки TAIGA-IACT с октября по февраль сезона 2020–2021 гг. только 36 ч наблюдения. По расчетным критериям было отобрано $N_{\text{ON}} - \alpha N_{\text{OFF}} = 37$ гамма-подобных событий при семи точках фона, поэтому значимость избытка составила 5.3σ . Для отобранных гамма-подобных событий было проведено восстановление энергии с использованием значений трех параметров событий: $size$, R_0 , и глубина максимума развития ШАЛ (X_{max}). На рис. 3 приведены четыре точки интенсивности излучения от Крабовидной туманности в интервале энергий 5–100 ТэВ.

Разработка и проверка гибридного метода регистрации гамма-квантов была сделана по данным первых двух кластеров установки HiSCORE (58 станций) и первого АЧТ эксперимента TAIGA по наблюдению за Крабовидной туманностью за три сезона с 2019 по 2022 гг. Общая экспозиция составила 250 ч, в течение которых отбирались совместные события АЧЕ1 + HiSCORE, совпадающие по времени в окне 3000 нс. Для выделения гамма-подобных событий по АЧТ используются те же параметры, что и в моно-событиях, полученных одним телескопом ($size$, $dist$, $width$, $length$...), но добавляются существенные параметры ливня, получаемые по данным установки HiSCORE: восстановленное положение оси ШАЛ на земле, R_{tel} — расстояние от оси ШАЛ до телескопа, $Energy$ — восстановленная энергия ШАЛ, $dgam$ — угол между направлением на источник (фон) и восстановленным направлением прихода ШАЛ. Этот параметр является финальным при выявлении гамма-подобных событий [17], поэтому точность его определения важна. Она сильно зависит от числа сработавших станций и составляет около 0.12° при десяти станциях и ухудшается до 0.4° при четырех сработавших станциях. В области более 100 ТэВ — обычно 5–10 станций, по которым находят параметры ШАЛ [28]. Для увеличения статистической значимости наблюдаемого сигнала при выборе фона также использовался “*reflected-region-background*” [21] по девяти точкам, как и в предыдущих точках. При этом каждая фоновая точка в камере телескопа была пересчитана в небесные координаты, что позволило использовать одно и то же положение фона для двух установок, от которых и отсчитывается параметр $dgam$.

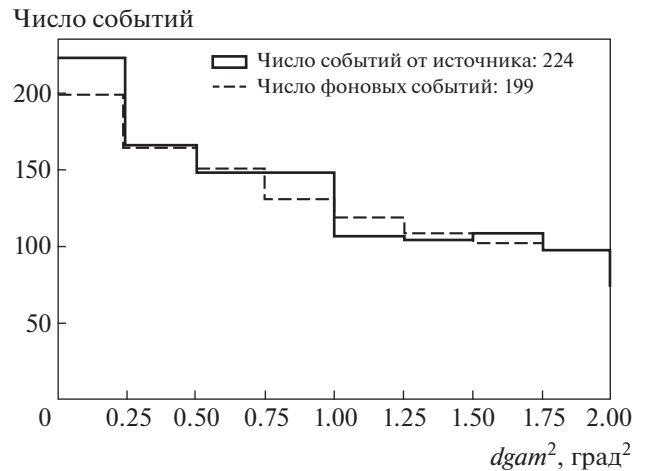


Рис. 4. Распределение по параметру $dgam^2$ после применения оптимальных ограничений на параметры совместных событий.

Для отбора гамма-подобных событий с помощью моделирования Монте-Карло [17] были получены оптимальные критерии отбора на параметры, при которых происходит максимальное подавление адронного фона, но сохраняется значительная доля гамма-квантов. Наиболее эффективным для подавления адронного фона оказывается комбинированный параметр $dist$ (R_{tel}) и $width$ ($size$). Первый определяется по АЧТ, а второй — по данным HiSCORE:

$$0.2 < width < 1.15 + 0.1 \lg(size);$$

$$2.3 + 0.055 R_{\text{tel}} < dist < 1 + 0.04 R_{\text{tel}}.$$

Используя полученные ограничения, было построено распределение по параметру $dgam$ (рис. 4). Максимум событий находится в области до 0.25° , где усредненное число фоновых событий составляет 199 событий, число событий от источника: 224 событие.

Для перехода к спектру частиц из Монте-Карло расчетов была оценена эффективная площадь — 0.3 км^2 , необходимая для перехода к абсолютным интенсивностям частиц. На рис. 3 нанесены три точки, полученные гибридным методом. После 100 ТэВ оказалось десять событий. Большие ошибки в двух последних точках связаны с достаточно большим фоном, оставшимся после подавления.

5. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

5.1. Boomerang

Среди 12 источников, которые были зарегистрированы в эксперименте LHAASO, как потенциальные ПэВатроны [11], 11 источников оказа-

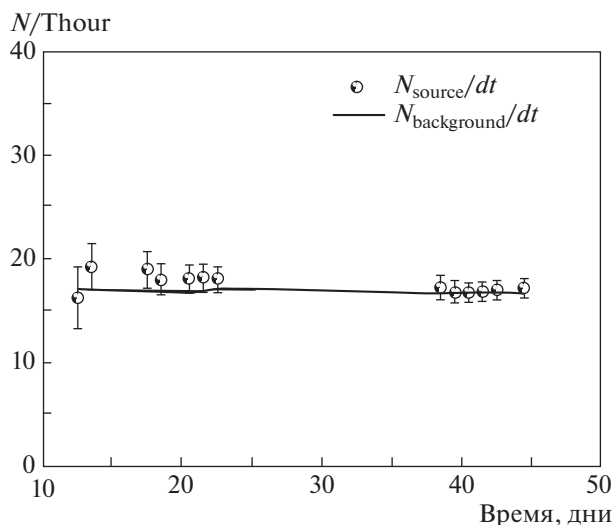


Рис. 5. Поиск избытка частиц с энергией более 200 ТэВ в направлении на Кокон созвездия Лебедя во время гипотетической вспышки [31]. По оси ординат обозначено кумулятивное число частиц с начала наблюдения до фиксированной по оси абсцисс дате (дни отсчитываются от 1 октября 2020 г.). Кружки — экспериментальные данные в направлении на Кокон, линии — в направлении на фон.

лись протяженными (около 1°), и не всегда ясно, с чем связана эта протяженность. В эксперименте TAIGA уже три сезона ведется наблюдение источника Boomerang. С астрофизической точки зрения это очень интересный источник со сложной структурой [29]. Предполагается, что пульсарная туманность, связанная с пульсаром J2229 + 6114, и остаток сверхновой (SNR) G106.3 + 2.7 являются результатом одного и того же взрыва сверхновой с пульсаром, поскольку вся структура расположена на краю пузыря I с расширенными областями молекулярного газа внутри и размером около 800 пс, а взрыв сверхновой произошел в области активного звездообразования. В экспериментальном плане интересен ее спектр, измеренный в экспериментах Милагро [30] и HAWC, измеренная интенсивность в области 100 ТэВ сопоставима с интенсивностью от Крабовидной туманности. Однако в области около 5–10 ТэВ она на порядок ниже. По сделанным оценкам должно было наблюдаться порядка десятка частиц в высокоэнергичной области и около 50 частиц с энергией более 20 ТэВ.

Описанная в предыдущем пункте методика была применена к поиску гамма-квантов от этого источника. В моно-режиме по данным АЧТ1 и АЧТ2 были получены распределения по α и θ , аналогичные рис. 3. Но к настоящему моменту не удалось зарегистрировать избыток излучения со значимостью лучше 2.5σ . В стерео-режиме также

не удалось зарегистрировать избыток. В качестве основной причины рассматривается эффект протяженности этого источника на 1° . На примере источника Бумеранг приступили к развитию методов регистрации протяженных источников.

5.2. Dragon Fly

Это пульсарная туманность в созвездии Лебедя, в котором идет процесс звездообразования. Туманность создавалась и подпитывается энергией вращения пульсара PSR J2021 + 3651. Она характеризуется высокоэнергетическим тераэлектронвольтовым излучением, обнаруженным ранее VERITAS и HAWC: в области 10 ТэВ интенсивность излучения сравнима с излучением Краба, но экспоненциально убывает при энергии более 37 ТэВ, хотя наблюдаются и события в области 100 ТэВ. Обработка данных этого источника проводилась в моно- (80 ч) и в стерео- (40 ч) режимах в течение осени 2020 и 2021 гг. Пороговые значения для отбора гамма-подобных ливней по величине нормализованной ширины и угла прихода подбирались для двух различных групп зенитных углов. Суммарно по двум выборкам с разными углами зарегистрировано 144 ON-события и 100 OFF-событий, избыток составил 44 события, а с учетом выбора 5 фоновых точек, это соответствует значимости 3.37σ .

5.3. Туманность Кокон

Не подтвержден избыток высокоэнергетических гамма-квантов из туманности Кокон в созвездии Лебедя во время гипотетической вспышки в октябре–ноябре 2020 г., которую зарегистрировали в эксперименте Ковер 2 на БНО [31], где был обнаружен избыток событий с интенсивностью, сравнимой с фоновым потоком адронов при очень высокой пороговой энергии ~ 300 ТэВ. По данным HiSCORE станций была сделана оценка избытка частиц в направлении на этот источник. Для этого были проанализированы данные за октябрь–начало декабря 2020 г. за время около 20 ч в максимуме вспышки. На рис. 5 приводится интенсивность частиц с энергией более 200 ТэВ в конусе с углом $\psi < 0.5^\circ$ в направлении на источник Кокон и в направлении на близлежащий фон в диапазоне $1-2^\circ$. Мы также проверили этот эффект с увеличенным углом конуса наблюдения и с разными пороговыми энергиями. Верхний предел на поток оценен как $F(E)E^2 < 4 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ТэВ}$.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2022 г. завершено развертывание первой очереди комплекса TAIGA — 120 станций HiSCORE и 3 АЧТ. На базе обширного Монте-Карло модели-

рования развиты и протестированы методы регистрации гамма-квантов, методы выделения гамма-квантов над адронным фоном, методы расчета эффективных площадей и чувствительности, а также методы восстановления спектров гамма-квантов в трех режимах: (а) одиночными телескопами; (б) АЧТ 01 + АЧТ02 в стерео режиме; (с) гибридным методом АЧТ01+HiSCORE. По результатам трех тестовых сезонов 2019–2022 гг. получены первые результаты по наблюдению за Крабовидной туманностью (Краб) тремя разными методами в разных диапазонах энергии и получены согласованные спектры, согласующиеся с другими экспериментами. Зарегистрирован сигнал от блазара Мрк-421 на уровне 4σ . Значимость сигнала от Мрк-501, Boomerang, Dragofly на уровне $2-3\sigma$. Анализ данных продолжается.

Начаты работы по созданию широкоугольных камер для на базе SiPM для совместной работы с HiSCORE для расширения угла обзора при поиске гамма-квантов.

Обсерватория TAIGA будет самой Северной гамма-обсерваторией, и это расположение обеспечивает определенные преимущества для наблюдения источников с большими склонениями — источник гамма-излучения в остатках сверхновой Тихо Браге, СТА-1, будет в поле зрения детекторов обсерватории TAIGA в течение 500 ч в год.

В ближайшие годы планируется продолжение наблюдения и исследование энергетического спектра гамма-квантов от галактических источников PWN: Крабовидная туманность, Dragonfly Nebula, SNR: J2227 + 610 (G106.3 + 2.7), J2031 + 415 (Cygnus Cocoon), сверхновая Тихо-Браге, СТА-1, и выбор и наблюдение северных источников из нового каталога установки LHAASO.

Предполагается проведение длительного мониторинга и исследования края энергетического спектра ярких блазаров (Мрк-421, Мрк-501 и др) как метод поиска аномалий в распространении гамма-квантов во Вселенной и поиска аксионо-подобных частиц. Начата разработка и будет проводиться поиск гамма-квантов, ассоциированных с нейтрино высоких энергий и гамма-всплесков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на УНУ “Астрофизический комплекс МГУ–ИГУ”, поддержана Минобрнауки России (соглашение ЕВ-075-15-2021-675, темы государственного задания (FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024, FSUS-2020-0039)) и Российским научным фондом (проект № 23-72-00019 (раздел 3,4,5)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Weekes T.C. et al.* // *Astrophys. J.* 1989. V. 342. P. 379.

2. *Aharonian F. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 457. P. 899.
3. *Aleksi'c J. et al.* // *Astropart. Phys.* 2016. V. 72. P. 76.
4. *Meagher K.* // *Proc. 33th Intl. Cosmic Ray Conference (ICRC2013).* 2015. V. 34. P. 792.
5. *Ptushkin V., Zirakashvili V., Seo E.-S.* // *Astrophys. J.* 2010. V. 718. P. 31.
6. *Budnev N.M. et al.* // *Astropart. Phys.* 2020. V. 117. P. 10206.
7. *Budnev N.M. et al.* // *J. Instrum.* 2020. V. 15(9). P. 1.
8. *Kuzmichev L.A. et al.* // *Phys. At. Nucl.* 2018. V. 81 (4). P. 497.
9. *Kuzmichev L. et al.* // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* 2020. V. 952. P. 161830.
10. *Lubsandorzhiev N. et al.* // *Proc. 35th Intl. Cosmic Ray Conf. (ICRC2017).* 2017. P. 757.
11. *Cao Zh. et al.* // *Nature.* 2021. V. 594. P. 33.
12. *Abeysekara A.U. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2020. V. 124 (2). P. 021102.
13. *Amenomory M et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 123. P. 051101.
14. *Cao Zh. et al.* // *arXiv:2305.17030v1 [astro-ph.HE].* 2023.
15. *Свешникова Л.Г. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85 (4). С. 529.
16. *Volchugov P.* // *Proc. 37th Intl. Cosmic Ray Conf. (ICRC2021).* 2021. P. 713.
<https://doi.org/10.22323/1.395.0713>
17. *Sveshnikova L.G. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2019. V. 83 (8). P. 922.
18. *Fomin V.P. et al.* // *Astropart. Phys.* 1994. V. 2 (2). P. 137.
19. *Zhurov D. et al.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1181. P. 012045.
20. *Grinyuk A., Postnikov E., Sveshnikova L.* // *Phys. At. Nucl.* 2020. V. 83. P. 262.
21. *Berge D., Frank S., Hinton J.* // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 466 (3). P. 1219.
22. *Li T.-P., Ma Y.-Q.* // *Astrophys. J.* 1983. V. 272. P. 317.
23. *Lessard R.W. et al.* // *Astropart. Phys.* 2001. V. 15 (1). P. 1.
24. *Kevin M.* // *Proc. 34th Intl. Cosmic Ray Conf. (ICRC2016).* 2016. P. 792.
25. *Aharonian F.* // *Astropart. Phys.* 2011. V. 34. P. 738.
26. *Acciari V.A., Ansoldi S., Antonelli L.A.* // *arXiv:2001.09566v1.* 2001.
27. *Aharonian F. et al.* // *The Astroph. J.* 2004. V. 614 (2). P. 897.
28. *Sveshnikova L. et al.* // *Proc. 35th Intl. Cosmic Ray Conf. (ICRC2017).* 2017. V. 301. P. 677.
29. *Kothes R., Uyaniker B., Pineaul S.* // *Astroph. J.* 2001. V. 560 (1). P. 236.
30. *Audibert A. et al.* // *Astron. Astrophys.* 2023. V. 671. P. L12.
31. *Dzhappuev D.D., Afashokov Yu.Z.* // *Astroph. J. Lett.* 2021. V. 916. P. L22.

Status of the TAIGA Experiment: Gamma Astronomy

L. G. Sveshnikova^{1, *}, I. I. Astapov², P. A. Bezyazykov³, A. Blinov⁴, E. Bonvech¹, A. N. Borodin⁴, N. M. Budnev³, A. Bulan¹, A. Vaidyanathan⁵, N. Volkov⁶, P. Volchugov¹, D. Voronin¹⁰, A. Yu. Garmash^{5, 6}, A. R. Gafarov³, V. M. Grebenyuk^{4, 9}, E. Gress³, O. A. Gress³, T. I. Gress³, A. A. Grinyuk⁴, O. G. Grishin³, A. N. Dyachok³, D. P. Zhurov³, A. V. Zagorodnikov³, A. L. Ivanova^{3, 8}, M. Ilyushin³, N. Kalmykov¹, V. V. Kindin², S. N. Kiryukhin³, V. A. Kozhin¹, R. P. Kokoulin², N. Kolosov³, K. G. Kompaniets², E. E. Korosteleva¹, E. A. Kravchenko^{5, 8}, A. P. Kryukov¹, L. A. Kuzmichev¹, A. Chiavassa¹⁰, M. Lavrova⁴, A. A. Lagutin⁶, Yu. Lemeshev³, B. K. Lubsandorzhiyev⁷, N. B. Lubsandorzhiyev¹, R. R. Mirgazov³, R. D. Monkhoev³, E. Okuneva¹, E. A. Osipova¹, A. Pan⁴, A. Panov¹, L. B. Pankov³, A. L. Pakhorukov³, A. B. Petrukhin², D. Podgrudkov¹, E. G. Popova⁷, E. B. Postnikov¹, V. Prosin¹, V. S. Ptuskin¹¹, A. A. Pushnin³, A. Razumov¹, R. I. Raikin⁶, G. I. Rubtsov⁷, E. V. Ryabov³, V. S. Samoliga³, E. Satyshev⁴, A. Yu. Sidorenkov⁷, A. A. Silaev¹, A. A. Silaev, Jr.¹, A. V. Skurikhin¹, A. V. Sokolov^{5, 8}, V. A. Tabolenko³, A. Tanaev³, M. Ternovoy³, L. G. Tkachev^{4, 9}, N. Ushakov⁷, D. Chernov¹, D. Shipilov³, and I. I. Yashin²

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

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

³Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia

⁴Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

⁵Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, 630090 Russia

⁶Altai State University, Barnaul, 656049 Russia

⁷Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

⁸Budker Institute of Nuclear Physics (BINP), Novosibirsk, 630090 Russia

⁹Dubna State University, Dubna, Moscow oblast, 141982 Russia

¹⁰Dipartimento di Fisica Generale Università di Torino e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Torino, 10125 Italy

¹¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Troitsk, Moscow oblast, 108840 Russia

*e-mail: tf110@mail.ru

Received June 13, 2023; revised June 29, 2023; accepted July 10, 2023

Abstract—The paper presents the status of the TAIGA experiment (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy), located in the Tunka Valley. The article mainly presents the tasks, developed approaches and first results on high-energy gamma-ray astronomy (10 TeV and more) obtained from a two- to three-year exposure. The current tasks of gamma-ray astronomy and plans for the development of the installation are discussed.

Keywords: gamma-ray astronomy, extensive air showers, galactic sources of high-energy cosmic rays