ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ, 2024, том 15, № 1, с. 57–64

_ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ ____ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 524.1-52

СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА ТАІGА: 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^{е, h}, A. P. Гафаров^с, B. M. Гребенюк^{d, i}, E. Гресс^с, O. A. Гресс^с, T. И. Гресс^с, 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^с, Н. Н. Калмыков^а, В. В. Кинлин^b, С. Н. Кирюхин^c, В. А. Кожин^a, Р. П. Кокоулин^b, Н. Колосов^с, К. Г. Компаниец^b, Е. Е. Коростелева^a, Е. А. Кравченко^{e, h}, А. П. Крюков^a, Л. А. Кузьмичев^а, А. Кьявасса^ј, М. Лаврова^d, А. А. Лагутин^f, Ю. Лемешев^c, Б. К. Лубсандоржиев^g, Н. Б. Лубсандоржиев^а, Р. Р. Миргазов^с, Р. Д. Монхоев^с, Е. Окунева^а, Э. А. Осипова^а, А. Пан⁴, А. Панов^а, Л. В. Паньков^с, А. Л. Пахоруков^с, 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^s, Е. В. Рябов^c, В. С. Самолига^c, Е. Сатышев^d, А. Ю. Сидоренков^s, А. А. Силаев^a, А. А. Силаев (мл.)^{*a*}, А. В. Скурихин^{*a*}, А. В. Соколов^{*e*, *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*} ^аНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Л.В. Скобельшына. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия ^bНациональный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, 115409 Россия ^сНаучно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003 Россия ^dОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия ^еНовосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, 630090 Россия ^fАлтайский государственный университет, Барнаул, 656049 Россия ⁸Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия ^hИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), Новосибирск, 630090 Россия ^іУниверситет "Дубна", Дубна, Московская обл., 141982 Россия $^{j} \Phi$ изический факультет университета Турина и Национальный институт ядерной физики, Турин, 10125 Италия ^кИнститут Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Троицк, Московская обл., 108840 Россия *E-mail: tfl10@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 телескопов (ІАСТ или в русскоязычной литературе АЧТ) в экспериментах: H.E.S.S. [2], MAGIC [3] и VERITAS [4]. Черенковские телескопы регистрируют угловое распределение черенковского изучения 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 Іа или IIbc с мошной ударной волной, на фронте которой происходит ускорение Ферми первого рода, и частицы могут ускоряться до петаэлектронвольтных 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 ~ $2 \cdot 10^{16}$ эВ, которая была подтверждена в ряде экспериментов [6].

Успешность эксперимента Тунка-133 стимулировала создание в Тункиской долине астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy). В состав комплекса входят две черенковских 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 ІАСТ, 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 TAI-GA-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 восстанавливать угол прихода ливня: 0.1°-0.2° при более десяти сработавших стаций, энергия гамма-кванта при этом выше 100 ТэВ.

Установка ТАІGА-ІАСТ 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 ТАІGА-ІАСТ 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 ТАІGА

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 впрямую связаны с проблемой происхождения космических лучей в области энергий выше 1 ПэВ, нерешенной до сих пор. Источники, ускоряющие частицы до петаэлектронвольтных энергий – Пэватроны – должны наблюдаться в гамма-лучах с энергией более 100 ТэВ (UHE ультраэнергичные гамма-кванты). Еще три года назад с помощью ІАСТ 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 Пэ-Ватронах со статистической значимостью более 7 о и максимальной энергией, доходящей до 1.4 ПэВ, [11]. UHE гамма-кванты зарегистрированы и на vстановках 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 вверху 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 гаммаквантов. 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 ТАІGA

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-

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ том 15 № 1 2024

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 12 σ .

=



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 HiS-CORE + АЧТ. Данные других экспериментов: IACTs [24–27], LHAASO, Tibet AsGamma, HAWC [11–13].

ный источник" [1]. Исследования в эксперименте ТАІGА 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 (ОFF-события).

В эксперименте ТАІGА в настоящее время используется метод выбора точек фона "reflected-region-background", развитый 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]:

$$Excess = (N_{\rm ON} - \langle N_{\rm OFF} \rangle) / \sqrt{N_{\rm ON} + \langle N_{\rm OFF} \rangle / N_{\rm bcg}}.$$
 (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 ~0.2°, 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 $N_{\rm ON} - \langle N_{\rm OFF} \rangle$. На рис. 2 приведено распределение $N_{\rm ON}(\theta^2) - \langle N_{\rm OFF}(\theta^2) \rangle$.

Для перехода к потоку гамма-квантов рассчитывалась эффективная площадь установки $S_{\rm eff}$, которая отражает площадь, с которой детектируются гамма-подобные события, прошедшие критерии отбора. Для моно-режима $S_{\rm eff} \sim 0.08~{\rm km}^2$ 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.

Стерео-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 гаммаквантов по энергии ~10%, эффективная площадь зависит от критериев отбора и составляет около 0.6 км², подавление адронного фона составляет ~ 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 $N_{\rm ON} - \alpha N_{\rm OFF} = 37$ гамма-подобных событий при семи точках фона, поэтому значимость избытка составила 5.3 с. Для отобранных гамма-подобных событий было проведено восстановление энергии с использованием значений трех параметров событий: *size*, R_0 , и глубина максимума развития ШАЛ ($X_{\rm max}$). 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 AЧЕ1 + 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 гаммаподобных 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 "reflectedregion-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 тоже положение фона для двух установок, от которых и отсчитывается параметр dgam.

Число событий



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 AЧT, а второй – по данным HiSCORE:

> $0.2 < widht < 1.15 + 0.1 \cdot \lg(size);$ $2.3 + 0.055R_{tel} < dist < 1 + 0.04R_{tel}.$

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 км², 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 Ко-кон, линии – в направлении на фон.

лись протяженными (около 1°), и не всегда ясно, с чем связана эта протяженность. В эксперименте ТАІGА 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 НАWC, 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 2.5 σ . 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 создалась и подпитывается энергией вращения пульсара PSR J2021 + 3651. Она характеризуется высокоэнергетическим тераэлектронвольтным излучением, обнаруженным panee VERITAS и НАWС: 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 полтвержден 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°. Мы также проверили этот эффект с увеличенным углом конуса наблюдения и с разными пороговыми энергиями. Верхний предел на поток оценен как $F(E)E^2 < 4 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-2} \text{ c}^{-1} \text{ ТэВ}.$

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 гаммаквантов 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 уроне 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 EB-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.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ том 15 № 1 2024

- Aharonian F. et al. // Astron. Astrophys. 2006. V. 457 P. 899.
- 3. Aleksi'c J. et al. // Astropart. Phys. 2016. V. 72. P. 76.
- Meagher K. // Proc. 33th Intl. Cosmic Ray Conference (ICRC2013). 2015. V. 34. P. 792.
- Ptuskin V., Zirakashvili V., Seo E.-S. // Astrophys. J. 2010. V. 718 P. 31.
- 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.
- Kuzmichev L.A. et al. // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81 (4). P. 497.
- Kuzmichev L. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2020. V. 952. P. 161830.
- 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.
- Abeysekara A.U. et al. // Phys. Rev. Lett. 2020.
 V. 124 (2). P. 021102.
- 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.
- 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.
- Fomin V.P. et al. // Astropart. Phys. 1994. V. 2 (2). P. 137.
- *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.
- 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.

СВЕШНИКОВА и др.

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. Lubsandorzhiev⁷, N. B. Lubsandorzhiev¹, 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. Ternovov³, 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 Univeristy, 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 Universita 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: tfl10@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