

УДК 539.1.03

ПЕРВЫЙ СЕЗОН РАБОТЫ ГИБРИДНОЙ ЧЕРЕНКОВСКОЙ УСТАНОВКИ TAIGA

© 2019 г. Л. Г. Свешникова^{1, *}, И. И. Астапов², П. А. Безъязыков³, В. Борейко⁴, А. Н. Бородин⁴, М. Брюкнер⁵, Н. М. Буднев³, Р. Вишневский⁵, А. Ю. Гармаш^{6, 7}, А. Р. Гафаров³, Н. В. Горбунов⁴, В. М. Гребенюк^{4, 8}, О. А. Гресс³, Т. И. Гресс³, А. А. Гринюк⁴, О. Г. Гришин³, А. Н. Дячок³, Д. П. Журов³, А. В. Загородников³, В. Л. Зурбанов³, А. Л. Иванова³, Ю. А. Казарина³, Н. Н. Калмыков¹, В. В. Киндин², П. С. Кириленко⁶, С. Н. Кирюхин³, В. А. Кожин¹, Р. П. Кокоулин², К. Г. Компаниец², Е. Е. Коростелева¹, Е. А. Кравченко^{6, 7}, Л. А. Кузьмичев¹, М. Куннас⁹, А. Кьявасса¹⁰, А. А. Лагутин¹¹, Ю. Лемешев³, В. В. Ленюк³, Б. К. Лубсандоржиев¹², Н. Б. Лубсандоржиев¹, Р. Р. Миргазов³, Р. Мирзоян^{3, 13}, Р. Д. Монхоев³, Э. А. Осипова¹, М. И. Панасюк¹, Л. В. Паньков³, А. Л. Пахоруков³, А. А. Петрухин², В. А. Полещук³, М. Попеску¹⁴, Е. Г. Попова¹, А. Порелли⁵, Е. Б. Постников¹, В. В. Просин¹, В. С. Птускин¹⁵, А. А. Пушкин³, Р. И. Райкин¹¹, Г. И. Рубцов¹², Е. В. Рябов³, Б. М. Сабилов⁴, Я. И. Сагань^{4, 8}, В. С. Самолига³, Ю. А. Семеней³, А. Ю. Сидоренков¹², А. А. Силаев¹, А. А. Силаев (мл.)¹, А. В. Скурихин¹, М. Слунечка⁴, А. В. Соколов^{6, 7}, В. А. Таболенко³, Б. А. Таращанский³, Л. Г. Ткачев^{4, 8}, А. В. Ткаченко⁴, М. Тлужиконт⁹, О. Л. Федоров³, Д. Хорнс⁹, К. Шпиринг⁵, И. И. Яшин²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова",
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский государственный университет", Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутск, Россия

⁴Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁵Немецкий электронный синхротрон (DESY), Гамбург, Германия

⁶Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет", Новосибирск, Россия

⁷Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук", Нижний Новгород, Россия

⁸Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области "Университет "Дубна", Дубна, Россия

⁹Институт экспериментальной физики университета Гамбурга, Гамбург, Германия

¹⁰Физический факультет университета Турина и Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

¹¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный университет", Барнаул, Россия

¹²Федеральное государственное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

¹³Институт Макса Планка, Мюнхен, Германия,

¹⁴Институт космических наук, Бухарест, Румыния

¹⁵Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: tf110@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

В Тункинской долине в 50 км от оз. Байкал в настоящее время проводятся работы по созданию гамма-обсерватории TAIGA, предназначенной для исследования гамма-излучения и потоков заряженных космических лучей в энергетическом диапазоне 10^{13} – 10^{18} эВ. В эксперименте TAIGA для реги-

страции гамма-квантов выше нескольких десятков ТэВ реализован метод гибридной регистрации событий атмосферным черенковским телескопом TAIGA-IACT и широкоугольной установкой TAIGA-HiSCORE. В статье представлены предварительные результаты по данным одиночного телескопа в области низких энергий ($>2-3$ ТэВ) и анализ совместных событий, а также и сравнение с расчетами методом Монте-Карло.

DOI: 10.1134/S0367676519080374

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Тункинской долине, в 50 км от оз. Байкал, разворачивается гамма-обсерватория TAIGA [1–6] (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy), предназначенная для исследования гамма-излучения и потоков заряженных космических лучей в энергетическом диапазоне $10^{13}-10^{18}$ эВ. В состав обсерватории входит установка TAIGA-HiSCORE (в настоящий момент – август 2018 г. – установка состоит из 43 станций, покрывающих площадь 0.4 км^2) [7]. В эксперименте TAIGA был предложен и обоснован гибридный метод регистрации гамма-квантов [3], в котором в TAIGA-HiSCORE добавляются несколько атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) на достаточно большом расстоянии друг от друга, до 600 м [3]. С 2017 был введен в строй и начал полноценно функционировать первый АЧТ, установленный приблизительно в центре установки TAIGA-HiSCORE.

1. УСТАНОВКИ TAIGA-IACT

Телескоп TAIGA-IACT имеет составное зеркало системы Дэвиса–Коттона площадью 8.5 м^2 из 29 сегментов, с фокусным расстоянием 4.75 м. В фокусе зеркал установлена чувствительная камера из 560 ФЭУ с диаметром фотокатода около 19 мм каждый. Диаметр камеры около 110 см. Угол обзора камеры составляет 9.6° . Угол обзора каждого пикселя – 0.36° . Камера собирается из однотипных кластеров, как правило, по 28 ФЭУ в каждом (в кластерах на краю камеры число ФЭУ меньше 28). Система съема информации и триггерная система описана в статьях в этом сборнике [1, 11].

Калибровка камеры, т. е. определение относительной чувствительности ФЭУ и определение коэффициентов пересчета от кодов АЦП в число фотоэлектронов (ФЭ) проводилось по данным калибровочных файлов, полученных при срабатывании камеры от импульсного источника света [8].

2. РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ И СТАТИСТИКА СЕЗОНА 2017–2018 гг.

Наблюдения с помощью телескопа проводились с октября по март (118 дней) с разделением времени между двумя основными тестовыми источниками: ближайшим блазаром Mkr421 (90 ч с

января по март) и Крабовидной туманностью (с октября по февраль) – 176 ч. Однако лишь около 25 ч наблюдений вошли в обработку по разным причинам, прежде всего, по причине аномально плохой погоды в этом сезоне. Полный темп счета триггера зависел от погоды и снежного покрова и в среднем составлял около 1 КГц, темп счета событий, в которых регистрировался сигнал от ШАЛ, составлял около 16 Гц, и скорость счета совместных событий (событий с сигналами от ШАЛ, зарегистрированных одновременно телескопом и установкой TAIGA-HiSCORE) – около 0.3 Гц. Процедура реконструкции событий состояла из следующих этапов.

А) По событиям, накопленным за каждые 2 мин работы камеры, восстанавливаются средние значения пьедесталов и среднеквадратичное отклонение σ_i для всех каналов камеры. Эти значения пьедесталов используются для формирования матрицы амплитуд $Am(X_i, Y_i)$ (X_i, Y_i – координаты пикселя) для событий, зарегистрированных в эти 2 мин.

Б) По значениям анодных токов, измеряемых каждые 30 с, проводится контроль светового фона и анализ качества событий: исключаются нестабильно работающие пиксели и пиксели, в которые попадает свет звезд. Вводятся поправки на отклонения положения источника от центра камеры для данной ночи.

В) Проводится процедура очищения (cleaning) изображения от пикселей, в которых амплитуда сигнала происходит от флуктуации светового фона: пиксель входит в изображение ШАЛ и отбирается, если значение амплитуды превышает заданное N_1 ф. э. и хотя бы в одном соседнем пикселе амплитуда превышает значение N_2 ф. э. ($N_2 = 1/2N_1$). Выбор N_1 зависит от ранга (измерительного цикла) и выбирается равным $(3-5) \times \sigma_i$, где σ_i – среднеквадратичное отклонение пьедестала для данного пикселя). При таком подходе значения N_1 и N_2 различаются для разных пикселей. Далее определяется полное число пикселей, вошедших в изображение, N_{pix} , и полное число фотоэлектронов в изображении S (size).

Г) Определение параметров Хилласа [10] по матрице $Am(X_i, Y_i)$: R_c – расстояние от взвешенного центра изображения до центра камеры ($dist$), W – ширина, L – длина, Con – концентрация, α –

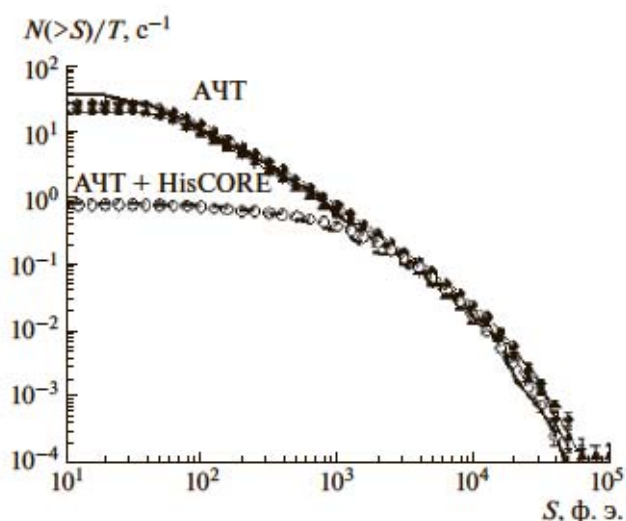


Рис. 1. Интегральный спектр ливней по размерам изображений (S , в фотоэлектронах), зарегистрированных АЧТ за три дня и по совместным ливням, зарегистрированным также установкой TAIGA-HiSCORE: значки – эксперимент, линии – М-К-расчеты для соответствующих условий.

угол между основной осью эллипса Хилласа (major axis) и вектором, направленным из центра тяжести изображения на центр камеры. Проводится выборочная визуализация изображений для проверки качества событий.

Д) Поиск совпадающих по времени (временное окно – 1.5 мкс) событий из банков событий, зарегистрированных АЧТ и установкой TAIGA-HiSCORE. Отобранному совместным событиям приписывается энергия E , азимутальный и зенитный углы θ , ϕ , расстояние до оси ливня от телескопа R_p , угол между направлением ливня и направлением на источник Θ , полученные по данным установки TAIGA-HiSCORE методом, описанным в [2, 4, 5].

Исследование амплитудных спектров по индивидуальным пикселям показывает, что значение N_1 при очистке событий может быть выбрано равным $3\sigma_1$ (~6–8 ФЭ).

При наблюдении Крабовидной туманности (КТ) за эффективное время 25 ч зарегистрировано 1.8 млн событий. При наблюдении источника Mkr421 в марте 2018 г. эффективное время составило 20 ч.

Поиск совместных событий велся только при наблюдении КТ. До настоящего времени в анализе использовались события, зарегистрированные только первым кластером установки TAIGA-HiSCORE.

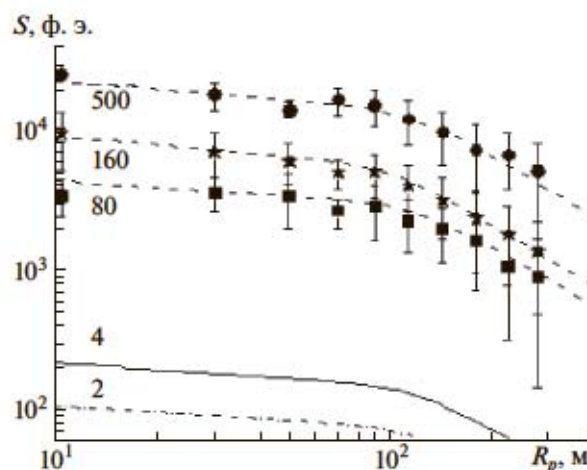


Рис. 2. Средние значения размера изображения S (в фотоэлектронах) на разных расстояниях от оси ливня (R_p), полученные по совместным событиям для трех интервалов энергии: 80, 160, 500 ТэВ. Две нижние кривые – экстраполяция к энергии протонов 4 и 2 ТэВ, приведенные для оценки пороговой области регистрации.

3. МОНТЕ-КАРЛО-СИМУЛЯЦИИ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Симуляции методом Монте-Карло (М-К) проводились по программе CORSIKA 7.3500, опция IACT. Рассматривалась конфигурация детекторов, соответствующая установке 2017 г: один телескоп и 30 станций первого кластера. Черенковские фотоны пропускались через оптическую систему телескопа (зеркала, матрицу ФЭУ с конусами Винстона) с помощью созданной в эксперименте TAIGA программы “Оптика” (А.Н. Гринюк, ОИЯИ, Дубна, детали см. в [11]). При моделировании учитывалась кластерная структура камеры телескопа и условия выработки триггера. Было наиграно несколько десятков выборок событий, соответствующих разным задачам. В области энергий гибридной регистрации ШАЛ от космических лучей выше 100 ТэВ наиграно около 30000 событий (протоны и ядра), а также 30000 для первичных гамма-квантов ($E\gamma > 40$ ТэВ).

На рис. 1 и 2 приведены интегральные спектры по размерам событий ($N_{pix} \geq 4$) при автономной работе АЧТ и по событиям, зарегистрированным также установкой TAIGA-HiSCORE.

М-К-расчеты такого спектра зависят от выбранного первичного спектра. Мы использовали данные последних прямых экспериментов и экспериментов ШАЛ в области энергий 100–1000 ТэВ и аппроксимировали спектр всех частиц функцией $F(E) = 13000 \cdot (E/10^4)^{2.66} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{ГэВ}^{-1}$, а спектр протонов и гелия функцией $F(E) = 7600 \cdot (E/10^4)^{2.68} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{ГэВ}^{-1}$. В симуляциях мы использовали выборку событий 3–1000 ТэВ с по-

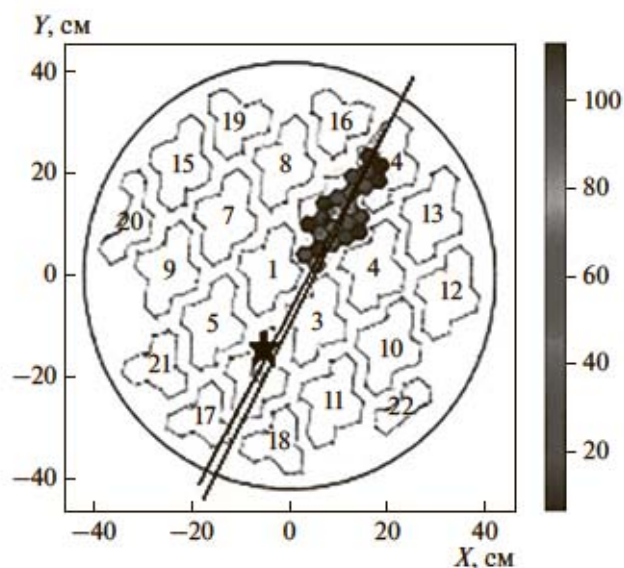


Рис. 3. Изображение “гамма-подобного” ливня в камере АЧТ (имеющей кластерную структуру из 22 кластеров). Звездочка и линия – проекция оси ливня и точки пересечения с землей на плоскость камеры телескопа с введением скейлингового фактора $R_p(\text{см})/R_c(\text{см})$, вторая линия – основная ось изображения, определенная по алгоритму Хилласа.

казателем спектра 2.65, а для совместных событий та же выборка, но с порогом 100 ТэВ. Из сравнения симуляции М-К с экспериментальными данными видно, что энергетический порог регистрации ШАЛ от протонов и ядер при автономной работе телескопа составляет около 3 ТэВ, для совместных событий – ~100 ТэВ. При этом энергии ШАЛ около 1000 ТэВ в среднем соответствует размер события ~2000 ФЭ. Это приблизительные оценки, так как величина размера события сильно зависит от расстояния до оси ШАЛ.

Для более точной оценки пороговой области были построены средние функции пространственного распределения (ФПР) черенковского света, зарегистрированного телескопом на разных расстояниях от оси ливня $S(R_p, E)$. ФПР получены по совместным событиям, для которых известна энергия и расстояние до оси ливня, для трех интервалов энергии: 80, 160, 500 ТэВ. Полученные ФПР были экстраполированы к области 4 и 2 ТэВ (две нижние кривые на рис. 3 и 4). ФПР протонов и ядер гелия с определенной энергией в первом приближении близка к ФПР ливня от гамма-квантов с энергией в два раза меньшей. То есть в области до $R_p = 100$ м возможна регистрация гамма-ливней с энергией 1–2 ТэВ, для более далеких ливней порог выше.

Сравнение различных параметров изображения с М-К-расчетами приведено в работе стр. [11] в этом сборнике. Результаты поиска ливней от гамма-квантов Крабовидной туманности и от

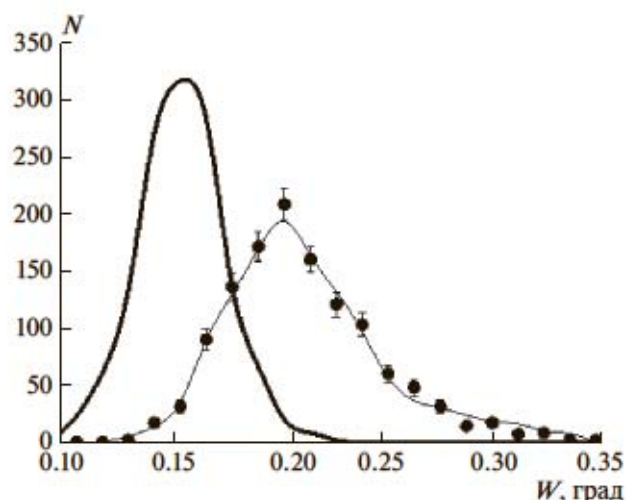


Рис. 4. Распределения по ширине совместных событий с $S = 1000$ –3000 фотоэлектронов и М-К-расчеты для аналогичной выборки событий. Сплошная линия – расчетное значение по ширине для гамма-квантов для такой выборки размеров.

блазара Mkr421 в области низких энергий по данным работы АЧТ будут опубликованы позже, когда время наблюдения этих источников будет не мене 50 ч.

4. ПОИСК “ГАММА-ПОДОБНЫХ” ЛИВНЕЙ ОТ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ В ОБЛАСТИ БОЛЕЕ 40 ТэВ

КТ можно наблюдать в апертуре установки с октября по март до 3.5 ч за ночь. Зимой 2017–2018 гг. для анализа событий использовалась лишь 14 дней совместных наблюдений КТ телескопом и установкой TAIGA-HiSCORE, эффективное время ~25 ч. Было отобрано 17000 событий (на основании М-К-симуляций ожидалось 15000 событий), при этом у 255 событий измеренный угол между направлением ливня и направлением на источник $\Theta < 1^\circ$.

Метод реконструкции совместных событий предполагает использование следующих параметров, определенных из HiSCORE: E , θ , ϕ , R_p , угол между направлением ливня и направлением на источник Θ и ряд параметров изображения АЧТ: S , R_c , W , L , Con , α (см. Реконструкция событий). Для гамма-подобных событий α не превышает 10 – 20° , а $W < 0.15^\circ$, что следует из М-К-расчетов.

На рис. 3 приведен пример совместного (гамма-подобного) события, зарегистрированного телескопом и установкой TAIGA-HiSCORE: $S = 709$ ФЭ, $N_{\text{pix}} = 23$, $W = 0.13^\circ$, $L = 8.9^\circ$, $\alpha = 8.9^\circ$. Звездочкой на рис. 3 обозначена проекция положения оси ливня на плоскость камеры телескопа с введением скейлингового фактора

$R_p(\text{см})/R_c(\text{см}) = 1500$, полученного из М-К-расчетов для гамма-квантов. Вторая линия – основная ось эллипса Хилласа. Для событий, пришедших от источника, на который направлен телескоп, линия, соединяющая проекцию оси ШАЛ и центр тяжести изображения должна пересекать центр камеры. Это же событие зарегистрировано 6-ю станциями установки TAIGA-HiSCORE и для него определены параметры $E = 110$ ТэВ, $\theta = 32.9^\circ$, $\varphi = 33.6^\circ$, $R_p = 231$ м, угол между направлением ливня, восстановленный по данным широкоугольной установки, и направлением на источник $\Theta = 0.33^\circ$. Для грубой оценки возможности подавления фона на рис. 4 приведены распределения по ширине для совместных событий с $S = 1000\text{--}3000$ ФЭ, в которых ливни отбираются первыми 30 станциями установки HiSCORE, что соответствует небольшим расстояниям до оси ливня и большим энергиям ($E > 100$ ТэВ). Линией обозначены М-К-симуляции для аналогичной выборки событий, которая довольно хорошо описывает эксперимент. На рис. 4 также приведено расчетное значение по ширине для гамма-квантов для такой выборки размеров. В первом приближении такое соотношение распределений по ширине соответствует возможности подавления фона в 30 раз только по одному параметру ширины.

Из 255 ливней с $\Theta < 1^\circ$ было отобрано несколько гамма-подобных событий, которые по параметрам изображения могут быть отнесены к гамма-квантам: $W < 0.16^\circ$, $\alpha < 18^\circ$, $R_c < 3.2^\circ$, одно из которых представлено на рисунке. Энергии этих событий оказались около 50–60 ТэВ, расстояние положения оси до телескопа – от 50 м до 290 м, $\Theta = 0.33^\circ\text{--}0.7^\circ$. Ожидаемое число событий от КТ в области энергий более 50 ТэВ на площади 0.25 км^2 в предположении спектра гамма-квантов, измеренного в эксперименте HEGRA, может составлять за 25 ч 5–10 событий, что согласуется с нашим результатом.

ВЫВОДЫ

Подытоживая анализ работы первого АЧТ (IACT) в составе установка TAIGA в режиме слежения за КТ и за блазаром Mkr421, можно сформулировать следующие выводы:

1. Впервые проведено детектирование событий в направлении на источник высокоэнергичных гамма-квантов с энергией более 40 ТэВ гибридным методом, совмещающим информацию широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE (с наносекундным измерением времени), и один АЧТ с анализом изображения. Зарегистрировано

~17 000 гибридных ливней и развиты методы их анализа.

2. Удалось согласовать параметры, полученные в эксперименте с обеих установок, с параметрами, полученными по методу Монте-Карло.

3. Проведена оценка пороговых энергий гамма-квантов при работе одиночного телескопа (~1–2 ТэВ) и для совместных событий, зарегистрированных также и TAIGA-HiSCORE (~40–50 ТэВ).

4. Несмотря на аномально плохую погоду в этом сезоне и решение ряда технических проблем при развертывании телескопа, мониторинговое время тестовых источников (КТ и Mkr421) достигло ~30 ч (вместо ожидаемых 100–120 ч). Результаты поиска гамма-квантов от этих двух источников в области энергий 2–10 ТэВ будут представлены позже, когда полное время наблюдения составит не менее 50 ч. В области энергий более 50 ТэВ гибридным методом обнаружено около 3–7 “гамма-подобных” кандидатов, статистическая значимость которых будет уточняться.

В сезоне 2018–2019 гг. площадь обсерватория TAIGA-HiSCORE будет увеличена до 1 км^2 и добавлено еще два телескопа.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (гос. задания 3.9678.2017/БЧ, 3.904.2017/ПЧ, 3.6787.2017/ИТР, 1.6790.2017/ИТР), грантом РФФИ 16-29-13035. Работа выполнена с использованием оборудования ТАЦКП в рамках выполнения соглашения с Министерством науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор RFMEFI59317X0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буднев Н.М., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1049.
2. Кузьмичев Л., Астапов И., Безъязыков П. и др. // ЯФ. 2018. Т. 81. № 1. С. 1.
3. Tluczykont M., Hampf D., Horns D. et al. // Astropart. Phys. 2014. V. 56. P. 42.
4. Berezhnev S., Budnev N., Astapov I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. P. 348.
5. Budnev N., Astapov I., Bjgdanov A. et al. // JINST. 2014. V. 9. Art. № 09021.
6. Kuzmichev L., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // EPJ Web Conf. 2017. V. 145. Art. № 01001.
7. Gres O., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // NIMA. 2017. V. 845. P. 367.
8. Lubsandorzhiyev N., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 757.
9. Zhurov D., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 785.
10. Hillas A. M. // Proc. 19th ICRC. (La Jolla, 1985). V. 3. P. 445.
11. Постников Е.Б., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1053.