

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ГАММА-ОБСЕРВАТОРИЯ TAIGA — СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2018 г. Л. А. Кузьмичев<sup>1),2)\*</sup>, И. И. Астапов<sup>3)</sup>, П. А. Безъязыков<sup>2)</sup>, В. Борейко<sup>4)</sup>, А. Н. Бородин<sup>4)</sup>, Н. М. Буднев<sup>2)</sup>, Р. Вишневецкий<sup>5)</sup>, А. Ю. Гармаш<sup>6),7)</sup>, А. Р. Гафаров<sup>2)</sup>, Н. В. Горбунов<sup>4)</sup>, В. М. Гребенюк<sup>4)</sup>, О. А. Гресс<sup>2)</sup>, Т. И. Гресс<sup>2)</sup>, А. А. Гринюк<sup>4)</sup>, О. Г. Гришин<sup>2)</sup>, А. Н. Дячок<sup>2)</sup>, А. В. Загородников<sup>2)</sup>, В. Л. Зурбанов<sup>2)</sup>, А. Л. Иванова<sup>2)</sup>, Ю. А. Казарина<sup>2)</sup>, Н. Н. Калмыков<sup>1)</sup>, Н. И. Карпов<sup>1)</sup>, В. В. Киндин<sup>3)</sup>, П. С. Кириленко<sup>6)</sup>, С. Н. Кирюхин<sup>2)</sup>, В. А. Кожин<sup>1)</sup>, Р. П. Кокоулин<sup>3)</sup>, К. Г. Компаниец<sup>3)</sup>, Е. Е. Коростелева<sup>1)</sup>, Е. А. Кравченко<sup>6),7)</sup>, М. Куннас<sup>8)</sup>, А. Кьявасса<sup>9)</sup>, А. А. Лагутин<sup>10)</sup>, В. В. Ленок<sup>2)</sup>, Б. К. Лубсандоржиев<sup>11)</sup>, Н. Б. Лубсандоржиев<sup>1)</sup>, Р. Р. Миргазов<sup>2)</sup>, Р. Мирзоян<sup>12)</sup>, Р. Д. Монхоев<sup>2)</sup>, Р. Нахтигал<sup>7)</sup>, Э. А. Осипова<sup>1)</sup>, М. И. Панасюк<sup>1)</sup>, Л. В. Паньков<sup>2)</sup>, А. Л. Пахоруков<sup>2)</sup>, А. А. Петрухин<sup>3)</sup>, В. А. Полещук<sup>2)</sup>, М. Попеску<sup>13)</sup>, Е. Г. Попова<sup>1)</sup>, А. Порелли<sup>5)</sup>, Е. Б. Постников<sup>1)</sup>, В. В. Просин<sup>1)</sup>, В. С. Птускин<sup>14)</sup>, А. А. Пушкин<sup>2)</sup>, Р. И. Райкин<sup>10)</sup>, Г. И. Рубцов<sup>11)</sup>, Я. И. Сагань<sup>4)</sup>, В. С. Самолига<sup>2)</sup>, Л. Г. Свешникова<sup>1)</sup>, Ю. А. Семеней<sup>2)</sup>, А. Ю. Сидоренков<sup>11)</sup>, А. А. Силаев<sup>1)</sup>, А. А. Силаев (мл.)<sup>1)</sup>, А. В. Скурихин<sup>1)</sup>, М. Слунечка<sup>4)</sup>, А. В. Соколов<sup>6),7)</sup>, В. П. Сулаков<sup>1)</sup>, В. А. Таболенко<sup>2)</sup>, Б. А. Таращанский<sup>2)</sup>, Л. Г. Ткачев<sup>4)</sup>, А. В. Ткаченко<sup>4)</sup>, М. Тлужиконт<sup>8)</sup>, О. Л. Федоров<sup>2)</sup>, Д. Хорнс<sup>8)</sup>, К. Шпиринг<sup>5)</sup>, А. Ш. М. Элшоукрофи<sup>1),15)</sup>, И. И. Яшин<sup>3)</sup>

Поступила в редакцию 26.01.2018 г.

В последние несколько лет в Тункинской долине (республика Бурятия) началось развертывание гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) для исследования гамма-квантов с энергией выше 30 ТэВ и поиска источников галактических космических лучей с энергиями в районе 1 ПэВ, т.е. вблизи классического колена в энергетическом спектре космических лучей. Первая очередь обсерватории будет находиться в 50 км от озера Байкал, в том же месте, где расположена установка Тунка-133. Гамма-обсерватория TAIGA будет включать в себя сеть из 500 широкоугольных (0.6 ср) черенковских детекторов (установка TAIGA-HiSCORE) и до 16 атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) с анализом изображения ШАЛ, расположенных на площади 5 км<sup>2</sup>. В состав обсерватории будут входить также мюонные детекторы с общей площадью 2000 м<sup>2</sup>, распределенные на площади в 1 км<sup>2</sup>. В течение ближайших 3 лет планируется увеличить площадь установки TAIGA-HiSCORE в 4 раза: от 0.25 до 1 км<sup>2</sup>, к существующему первому АЧТ добавить два новых, развернуть новые мюонные детекторы с общей площадью 200 м<sup>2</sup>. В статье описывается конструкция новой обсерватории и методика обработки данных. Приводятся наиболее интересные результаты, и обсуждается программа исследований.

DOI: 10.1134/S0044002718040104

<sup>1)</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия.

<sup>2)</sup> Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета, Россия.

<sup>3)</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

<sup>4)</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

<sup>5)</sup> Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Zeuthen, Germany.

<sup>6)</sup> Новосибирский государственный университет, Россия.

<sup>7)</sup> Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия.

<sup>8)</sup> Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Germany.

<sup>9)</sup> Physics Department of the University of Torino and the National Institute of Nuclear Physics INFN, Italy.

<sup>10)</sup> Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.

<sup>11)</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

<sup>12)</sup> Max-Planck-Institute for Physics, Munich, Germany.

<sup>13)</sup> Institute of Space Science, Bucharest, Romania.

<sup>14)</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Россия.

<sup>15)</sup> Damanhour University, Egypt.

\* E-mail: kuz@dec1.sinp.msu.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в понимании природы источников высокой энергии космических лучей нашей Галактики и Метагалактики идет по трем направлениям.

1. Изучение вторичных гамма-квантов, производимых космическими лучами в непосредственной близости от источника, где частицы ускоряются (эксперименты H.E.S.S. [1], VERITAS [2], MAGIC [3], MILAGRO [4], HAWC [5] и др.). Около 10 источников, в которых зарегистрированная энергия гамма-квантов доходит до нескольких десятков ТэВ, обнаружены к настоящему времени. Это означает, что протоны или электроны в этих источниках должны ускоряться до нескольких сотен ТэВ. Измеренные энергетические спектры гамма-квантов в целом поддерживают модель ускорения протонов и электронов в остатках сверхновых звезд, которые в настоящее время рассматриваются как основные источники галактических космических лучей с энергией выше десятков ГэВ [6]. Тем не менее ни один источник гамма-лучей с энергией выше 100 ТэВ до сих пор не обнаружен.

2. Нейтрино высоких энергий, генерируемых в источниках в результате адронных взаимодействий, изучаются нейтринными телескопами. Несколько десятков таких нейтрино с энергиями до нескольких ПэВ зарегистрированы нейтринным телескопом IceCube за последние несколько лет [7]. Это “крушение стены” [8] было достигнуто после четырех десятилетий усилий и потребовало создания установки объемом 1 км<sup>3</sup>. Для обнаружения отдельных астрофизических источников, вероятно, придется ждать будущих нейтринных телескопов (Байкал-ГВД [9], KM3NeT [10], IceCube-2 [11]), создание которых будет завершено в ближайшие 5–15 лет.

3. Точное определение энергетического спектра космических лучей, массового состава и анизотропии — третий подход в исследовании галактических ускорителей. При таком подходе можно определить предел ускорения заряженных частиц в источниках различного типа.

Исследования в астрофизическом центре в Тункинской долине (50 км от озера Байкал) были посвящены исключительно этому третьему подходу. В 2009 г. начала работать черенковская установка ШАЛ Тунка-133 [12]. Эта установка позволяет подробно исследовать энергетический спектр и массовый состав космических лучей в энергетическом диапазоне от  $5 \times 10^{15}$  до  $10^{18}$  эВ. Дополнительные возможности изучения массового состава в диапазоне  $10^{17}$ – $10^{18}$  эВ были открыты после развертывания в составе установки радиоантенн (установка Tunka-REX [13]) для регистрации радиосигналов

от ШАЛ и сцинтилляционных детекторов для регистрации заряженных частиц (установка Tunka-Grande [14]).

В последние несколько лет на астрофизическом полигоне началось развертывание обсерватории для проведения исследований в области астрофизики частиц высоких энергий. Название обсерватории — TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy). Три главных направления исследований новой обсерватории следующие.

1. Гамма-астрономия высоких энергий: в диапазоне энергий гамма-квантов выше 30 ТэВ есть ряд принципиальных вопросов, на которые в настоящее время нет ответов. Прежде всего это вопрос об источниках галактических космических лучей с энергиями вокруг 1 ПэВ (ПэВатронов), области энергий, примыкающей к области классического колена в энергетическом спектре космических лучей. Исследование высокоэнергичного спектра гамма-квантов от ярких внегалактических источников позволит получить важную информацию об электромагнитном фоне Вселенной.

2. Физика заряженных космических лучей высоких энергий: детальное исследование энергетического спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне от  $10^{14}$  до  $10^{18}$  эВ для поиска галактических источников различного класса.

3. Физика элементарных частиц и фундаментальная физика: поиск аксион-фотонной конверсии и осцилляции скрытых фотонов, поиск нарушения лоренц-инвариантности.

## 1. КОНЦЕПЦИЯ ГАММА-ОБСЕРВАТОРИИ TAIGA

Гамма-обсерватория TAIGA предназначена для исследования гамма-излучения заряженных космических лучей в диапазоне энергий  $10^{13}$ – $10^{18}$  эВ [15, 16]. Обсерватория будет включать в себя сеть широкоугольных черенковских станций, размещенных на площади 5 км<sup>2</sup>, — установка TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity Cosmic ORigin Explorer) [17, 18] — и до 16 атмосферных черенковских телескопов с анализом изображений (АЧТ), которые будут расположены на этой же площади. Такие установки будут дополнены мюонными детекторами (TAIGA-MUON), расположенными на площади 1 км<sup>2</sup>. Общая площадь мюонных детекторов составит 2000 м<sup>2</sup>.

Главным преимуществом работы АЧТ в сети широкоугольных черенковских станций является более эффективное выделение событий от гамма-квантов на фоне ШАЛ от заряженных космических лучей. Информация о параметрах изображения

ШАЛ (параметрах Хилласа [19]) дополняется параметрами ШАЛ (положение оси, направление, энергия), хорошо восстанавливаемыми широкоугольной установкой. Высокая эффективность подавления событий от космических лучей в современных гамма-обсерваториях достигается при стереоскопическом подходе, при котором ШАЛ регистрируется несколькими АЧТ. Расстояние между отдельными телескопами составляет 100–300 м, и, таким образом, для создания установки большой площади требуется большое количество АЧТ. Так, в проекте СТА [20] предполагается разместить до 70 телескопов на площади 7 км<sup>2</sup>. При нашем гибридном подходе подавление фона в 100 раз (при энергии 100 ТэВ) может быть достигнуто даже при расстоянии между телескопами 600–800 м. Фактически телескопы работают независимо. Ожидаемая чувствительность установки для поиска локальных источников гамма-квантов в диапазоне 30–200 ТэВ составит  $(0.5–1) \times 10^{-13}$  ТэВ см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> при 300 ч наблюдения источника.

## 2. TAIGA-HiSCORE

### 2.1. Конструкция

В настоящее время установка TAIGA-HiSCORE состоит из 28 оптических станций, расположенных в узлах регулярной сетки с минимальным расстоянием между станциями 106 м. Геометрическая площадь установки 0.25 км<sup>2</sup>. 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 фотоумножителя (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  $\pm 30^\circ$  ( $\sim 0.6$  ср).

Станция соединена с центром сбора данных по волоконно-оптическому кабелю для передачи данных и синхронизации. Стабильность синхронизации оптических станций достигает около 0.2 нс. Условием для формирования локального триггера станции является превышение амплитудой аналоговой суммы сигналов с анодов ФЭУ заданного порогового уровня, равного  $\approx 200$  фотоэлектронам (фэ). Порог в 200 фэ с учетом площади фотокатодов и квантовой эффективности ФЭУ соответствует потоку черенковского света 0.3 фотон см<sup>-2</sup> [21]. Энергетический порог станции при таком подходе к выработке локального триггера в 2 раза ниже, чем для станции с одним ФЭУ. Скорость счета локальных триггеров станции — около 10–15 Гц. Сигналы

с анодов и промежуточных динодов оцифрованы с шагом 0.5 нс с помощью 8-канального модуля на основе микросхемы DRS-4. Более подробное описание системы сбора и синхронизации приведено в [22].

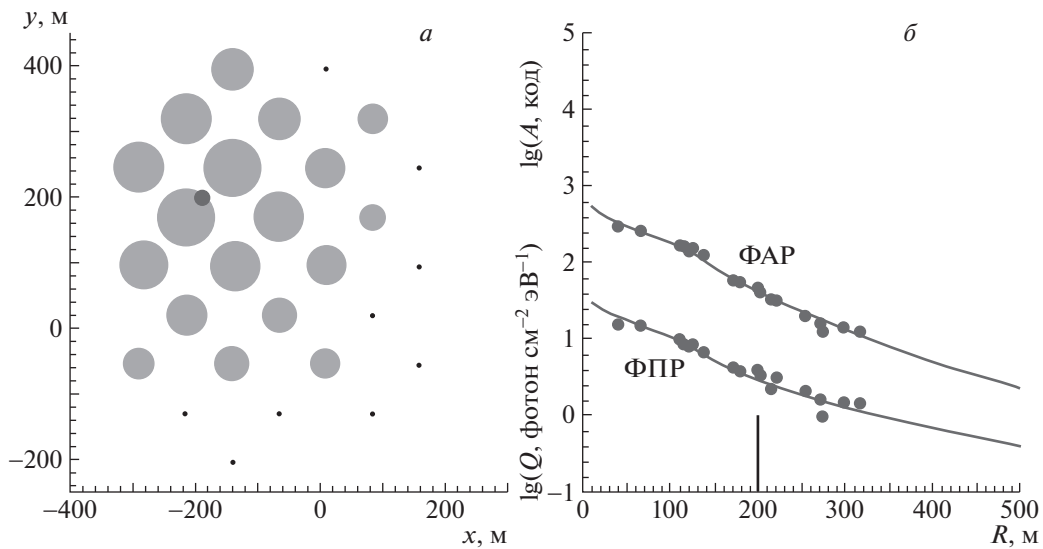
### 2.2. Реконструкция параметров ШАЛ

Реконструкция параметров ШАЛ проводилась с использованием алгоритмов, разработанных для установки Тунка-133 [12, 23]. Направления прихода ШАЛ определяются по относительной задержке регистрации черенковского импульса на каждой станции. На первом шаге направление ШАЛ восстанавливается в предположении плоского черенковского фронта. Положение оси ШАЛ восстанавливается фитированием амплитуд импульсов с ФЭУ в отдельных станциях функцией амплитуда–расстояние (ФАР) [12], при этом используется направление ШАЛ, восстановленное на первом шаге. На втором шаге, после восстановления положения оси ШАЛ, уточняется направление прихода ШАЛ с использованием более корректной конусной модели черенковского фронта ШАЛ [23], параметры которой найдены с помощью моделирования ШАЛ по программе CORSIKA. Величина поправок не превышает 2°. После восстановления оси ШАЛ, восстанавливается функция пространственного распределения (ФПР) плотности потока черенковского света. Энергия первичной частицы определяется по плотности потока света ( $Q_{200}$ ) на расстоянии 200 м от оси ШАЛ [23]. Пример реконструированного события приведен на рис. 1.

Точность процедуры реконструкции был проверена на симулированных событиях, а также на экспериментальных данных (метод шахматной доски [24]). При реконструкции моделированных событий воспроизведены все этапы обработки данных. Точность определения направления прихода сильно зависит от количества сработавших станций. Угловое разрешение составляет  $0.4^\circ–0.5^\circ$  для событий с 4–5-ю сработавшими станциями и около  $0.10^\circ$  для событий с более чем 10-ю сработавшими станциями.

### 2.3. Временная калибровка и абсолютная угловая точность установки

Измерение направления прихода ШАЛ по задержкам прихода световых импульсов на различные регистрирующие станции требует точного измерения координат станций и относительных задержек импульсов в каждой станции. Координаты измерены с точностью 5 см, или в пересчете на время с точностью около 0.2 нс. Световые импульсы от ШАЛ преобразуются с помощью ФЭУ



**Рис. 1.** Пример события, зарегистрированного установкой TAIGA-HiSCORE. *а* — Радиус круга пропорционален логарифму амплитуды сигнала в данной станции. *б* — Зависимость амплитуды сигнала  $A$  и плотности потока черенковского света  $Q$  от расстояния до оси ШАЛ.

в импульсы электрического тока. Импульсы перед оцифровкой задерживаются в ФЭУ, кабелях связи, предусилителях и сумматорах. Наименее точными на данный момент являются задержки в кабелях связи и задержки в ФЭУ, которые зависят от типа ФЭУ и высокого напряжения питания ФЭУ. Эти ошибки могут достигать нескольких наносекунд. Для обработки данных в условиях, когда эти последние задержки не были измерены, был применен прием измерения задержек по самим регистрируемым ШАЛ — ШАЛ-калибровка. ШАЛ представляет собой источник синхронного светового сигнала во всех сработавших станциях, что позволяет использовать его для коррекции (выравнивания) аппаратных задержек. Практически отбираются ливни, в которых срабатывает 18 и более станций. Задается некое начальное приближение поправочных задержек. С этим приближением вычисляются задержки на всех сработавших станциях, и с использованием модели плоского фронта ШАЛ находится нулевое приближение зенитного и азимутального углов прихода ливня. Из-за слишком примитивной модели фронта ошибка направления прихода может при этом достигать  $2^\circ$ , но такой точности вполне достаточно для нахождения положения оси ливня на плоскости наблюдения по амплитудам импульсов. На следующем шаге восстанавливается направление ШАЛ уже с использованием конусной модели фронта ШАЛ и вычисляются остаточные после проведения минимизирующей процедуры отклонения задержек в станциях. Эти остаточные отклонения вычитаются из начальных задержек, после чего восстановление направления повторяется. Процедура повторяется

до тех пор, пока остаточные задержки для данного события не станут близкими к нулю. Пример применения описанной процедуры к реальному событию показан на рис. 2.

При этом возможна систематическая ошибка, одинаковая для всех ливней, зависящая от принятого начального приближения. Наилучшей проверкой этого приближения является эксперимент по одновременной засветке всех (или достаточно большого числа) станций импульсами от одного источника, расстояние до которого от каждой станции известно. Такая калибровка для установки, состоящей из 28 станций, была впервые проведена в сентябре 2016 г. и затем повторена в феврале 2017 г. Импульсный источник света устанавливался на некотором расстоянии от установки, а на станции устанавливались матовые светоотражатели. Был проведен подбор начального приближения с учетом типа ФЭУ и измерения задержек сигнала в них. Наилучшее согласие (в пределах 2 нс) с результатами светодиодных экспериментов получено в предположении дополнительной задержки импульса в ФЭУ R7081 на 15 нс относительно ФЭУ R5912 и меньшей задержки в ФЭУ ET9352 на 10 нс относительно ФЭУ R5912.

Примерно 2 раза в месяц установка регистрирует сигналы от CATS (Cloud Aerosol Transport System) — лидара на борту МКС [25]. Лидар работает на длине волны 532 нм с частотой 4 кГц. 23 марта сигнал от лидара был также зарегистрирован оптическим телескопом МАСТЕР [26], расположенным на расстоянии 500 м от центра установки. Сопоставление углового положения событий с максимальными амплитудами в станциях

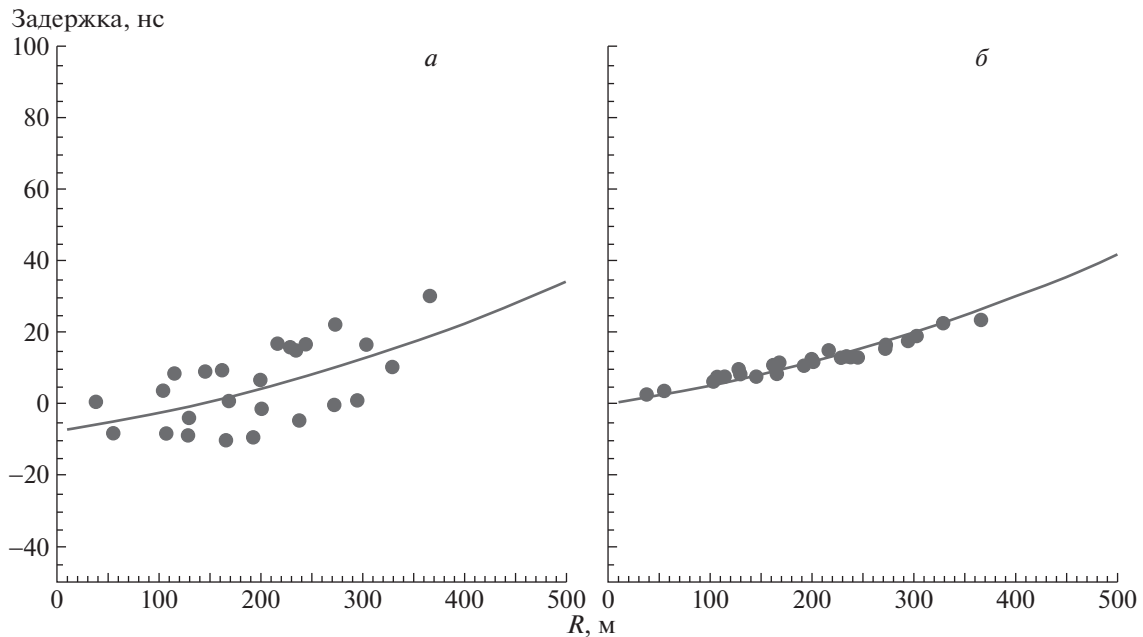


Рис. 2. Разность между временем срабатывания станции и временным фронтом ШАЛ до ШАЛ-калибровки (а) и после (б).

HiSCORE, восстановленными с откалиброванными задержками, и положения точки максимальной яркости по данным телескопа МАСТЕР показало, что абсолютная угловая точность установки не хуже  $0.1^\circ$  [27].

#### 2.4. Энергетический спектр

Около 10 млн ШАЛ с числом станций 4 или более были зарегистрированы за 35 безлунных ночей зимнего сезона 2015, 2016 гг. Общее время наблюдения составило 210 ч. Пороговая энергия почти 100%-ной эффективности регистрации составляет около 250 ТэВ. События с зенитными углами менее  $15^\circ$  используются для реконструкции спектра ниже  $10^{15}$  эВ, а события с зенитными углами менее  $40^\circ$  — для более высоких энергий. Наши предварительные спектры в сравнении с результатами из предыдущих экспериментов в Тункинской долине, а также с результатами аэростатного эксперимента АТЭС-2 [28] и спутникового эксперимента “Нуклон” [29] приведены на рис. 3. Набор данных в эксперименте “Нуклон” продолжается, и можно ожидать, что статистика будет увеличена по крайней мере в 5 раз до конца работы прибора на орбите. В настоящее время продолжение нашего спектра в область низкой энергии не противоречит результатам этих экспериментов в пределах статистической ошибки.

#### 2.5. Поиск гамма-квантов от Крабовидной туманности

Остаток сверхновой SN 1054 — Крабовидная туманность (или просто Краб) — является ярчайшим источником высокоэнергичного гамма-излучения. Обычно в области энергий до 10 ТэВ поток фотонов от Краба используется для калибровки новых установок. Область 30–100 ТэВ, которую планируется исследовать на установке HiSCORE, плохо изучена, зарегистрированы лишь единичные события в нескольких наиболее известных экспериментах. Компиляция этих данных: VERITAS [31], HEGRA [32], MAGIC [33], HAWC [5] — представлена на рис. 4а вместе с кривыми, аппроксимирующими экспериментальные данные. Эти аппроксимации могут быть использованы для оценки ожидаемого потока от Краба на установке HiSCORE. На рис. 4б представлен ожидаемый избыток фотонов от Краба за 115 ч наблюдения, рассчитанный для экспериментальной пороговой функции по энергии в зависимости от верхнего предела интегрирования  $E_{\text{cut}}$ . Линии представляют разные интерполяции спектров фотонов, изображенных на рис. 4а, и отмечены тем же номером. Разброс предсказаний оказывается очень велик — от 3 до 30 событий, и эта величина зависит не только от используемой аппроксимации потока гамма-квантов, но и от эффективности регистрации событий в области низких энергий.

К пороговой эффективности регистрации чувствительны темпы счета 4-кратных совпадений,

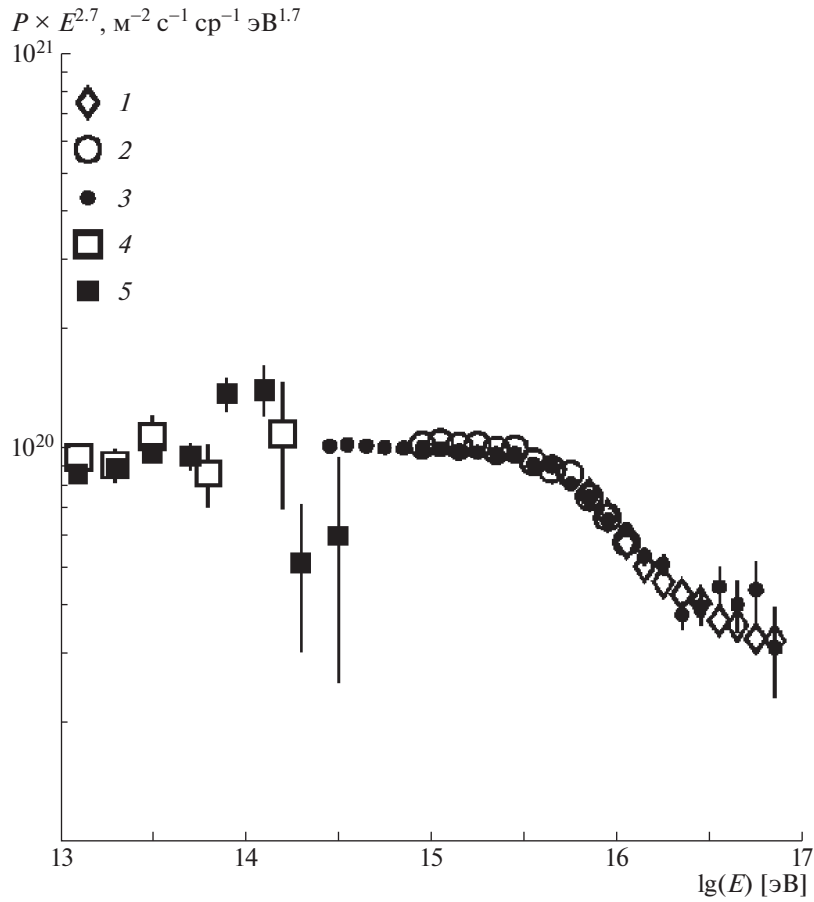


Рис. 3. Энергетический спектр первичных космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE в сравнении с результатами других экспериментов: 1 — Тунка-133 [23], 2 — Тунка-25 [30], 3 — TAIGA-HiSCORE [16], 4 — ATIC [28], 5 — Нуклон [29].

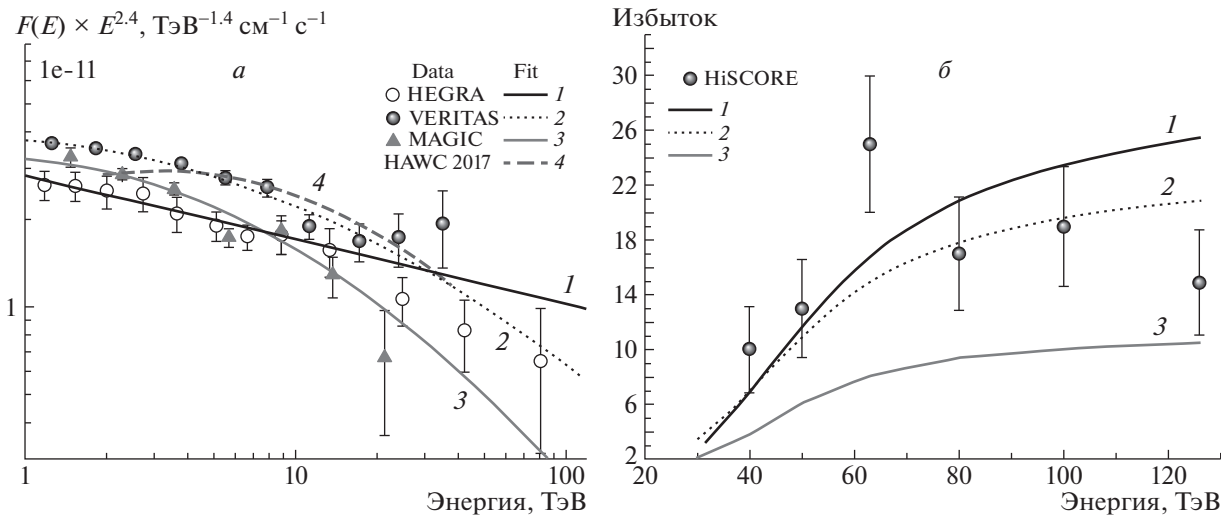


Рис. 4. а — Поток фотонов от Краба, зарегистрированный в разных экспериментах, и соответствующие аппроксимации: VERITAS (кривая 2 [31]); HEGRA (кривая 1 [32]); MAGIC (кривая 3 [33]); HAWC (кривая 4 [5]). б — Ожидаемый избыток фотонов от Краба за 115 ч наблюдения на установке HiSCORE в зависимости от верхнего предела интегрирования  $E_{cut}$ . Кривые — различные интерполяции спектров фотонов, изображенных на рис. 4а (отмечены тем же номером). Кружки — экспериментальные оценки, получение которых описано далее.



распределения по множественности сработавших детекторов, спектры частиц и пиковые (наиболее вероятные) энергии в распределении событий по энергии. Добившись совпадения этих распределений, полученных на основе смоделированных событий, с экспериментальными распределениями, мы можем использовать полученную эффективность регистрации для расчета ожидаемого распределения по энергии событий от гамма-квантов в области порога. Пиковые энергии гамма-квантов находятся в районе  $50 \pm 5$  ТэВ, но с вероятностью 10% регистрируются и 30-ТэВные гамма-кванты [34]. Эта эффективность использовалась в расчетах кривых, приведенных на рис. 4б. Как отмечалось в разд. 2.2, точность восстановления направления ШАЛ равна  $\sim 0.4^\circ$  при четырех сработавших детекторах и быстро уменьшается до  $0.1^\circ$  при срабатывании 10-ти детекторов. В пороговой области точность восстановления направления в среднем составляет  $0.3^\circ$ . Наши оценки показывают, что при такой точности и известном фоне космических лучей в ячейке  $\sim 0.3^\circ - 0.4^\circ$  можно зарегистрировать избыток с достоверностью  $2-2.5\sigma$  без дополнительных критериев подавления фона событий от космических лучей.

Поиск фотонных ливней от Краба проводился на 36 000 событий, зарегистрированных в конусе  $3^\circ$  в направлении на Краб (прямое восхождение  $R_\alpha = 83.63^\circ$ , склонение  $Dec = 22.01^\circ$ ) за 115 ч наблюдения на эффективной площади  $0.15 \text{ км}^2$  (события, зарегистрированные ближе чем 50 м от края установки, исключались). Мы разделили координатную сетку  $R_\alpha - Dec$  на ячейки с размером  $0.3^\circ \times 0.3^\circ$  или  $0.4^\circ \times 0.4^\circ$  и анализировали карты  $N_i(R_\alpha, Dec_i, E_{cut})$  при разных энергиях обрезания сверху  $E_{cut}$  — от 40 до 100 ТэВ, — чтобы уменьшить вклад фона. Фон  $N_{bg}(E_{cut})$  оценивался как среднее по ячейкам, находящимся в конусе  $1.5^\circ$  от ожидаемого положения Краба. Мы действительно наблюдаем избыток частиц в ячейке, соответствующей положению Краба. На рис. 4б приведен экспериментальный избыток в конусе  $0.4^\circ$  в зависимости от величины  $E_{cut}$ . При пиковой энергии около 50 ТэВ достоверность избытка составляет около  $2.5\sigma$ .

### 3. ПЕРВЫЙ АТМОСФЕРНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП

Атмосферный черенковский телескоп TAIGA-IАСТ имеет составное зеркало системы Дэвиса—Коттона площадью  $\sim 10 \text{ м}^2$  из 29 сегментов (в течение зимнего сезона 2016 г. временно установлено шесть зеркал), фокусное расстояние — 4.75 м (рис. 5). Зеркала после установки на тарелку телескопа образуют сферическую поверхность с

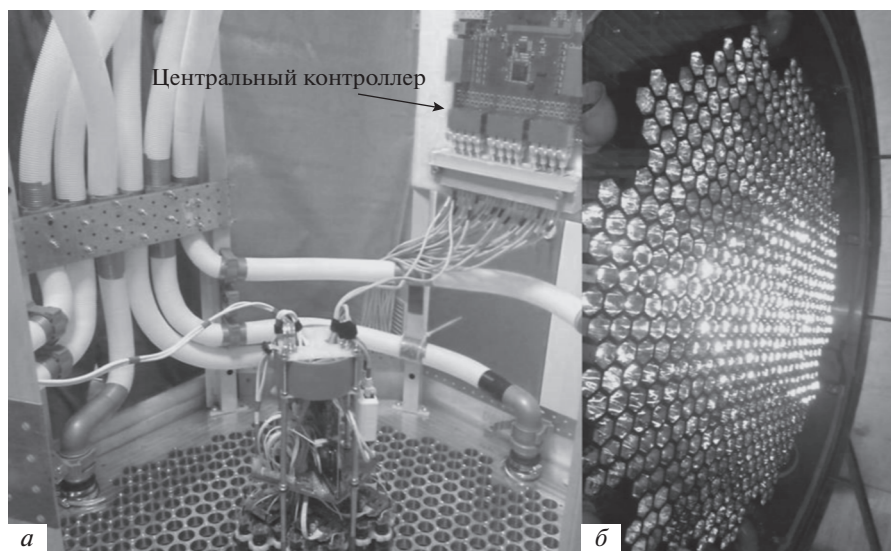


Рис. 5. Первый АЧТ обсерватории TAIGA.

радиусом 4.75 м. В центре тарелки зеркало не устанавливается, так как оно полностью экранируется камерой. Для юстировки зеркал использовался источник света на расстоянии 800 м от телескопа. С помощью регулировочных болтов изображение источника от каждого зеркала смещается в центр экрана, расположенного в фокальной плоскости.

#### 3.1. Регистрирующая камера телескопа

В фокусе зеркал установлена чувствительная камера из 548 ФЭУ с диаметром фотокатода около 2 см каждый (XP1911). Диаметр камеры около 110 см. Угол обзора камеры —  $10^\circ \times 10^\circ$ . 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. Группы объединяются одной кросс-платой, на которой установлен цифро-аналоговый преобразователь для управления высоковольтными источниками и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для измерения тока всех ФЭУ кластера. Усиление ФЭУ ограничено допустимой величиной фонового анодного тока от засветки ночного неба. При выбранном рабочем усилении  $10^5$  ток ФЭУ составляет 2 мкА. При токе 50 мкА (появление яркой звезды в поле зрения ФЭУ) высокое напряжение с делителя ФЭУ снимается. На кросс-плате установлен 64-канальный блок оцифровки импульсов на основе специализированной интегральной микросхемы ASIC MAROC-3. В состав каждого канала входят предусилитель с изменяемым коэффициентом усиления, зарядочувствительный усилитель с переменным временем интегрирования и компаратор с управляемым порогом. Микросхема содержит аналоговый мультиплексированный выход. Сигнал с выхода подключается к 12-битовому АЦП. Один ФЭУ подключается к двум каналам. 30-кратное



**Рис. 6.** *а* — Первый кластер фотоумножителей, установленный на несущую плиту; *б* — вид на камеру со стороны конусов Винстона.

различие в коэффициентах усиления этих каналов позволяет иметь линейность преобразования заряд—код до 3000 фэ при усилении ФЭУ  $10^5$ . Блок также содержит мажоритарную схему совпадения, которая позволяет формировать локальный триггер кластера. Напряжение питания +12 В и +24 В подается на кластер через контроллер питания. Кластеры монтируются на несущую дюралевою плиту (рис. 6а). С противоположной стороны к плите крепятся конусы Винстона (рис. 6б), увеличивающие площадь фотокатода в 3 раза. Угол обзора каждого конуса ( $35^\circ$ ) перекрывает все зеркала телескопа. Камера устанавливается в металлический корпус. Входное окно камеры изготовлено из оргстекла толщиной 15 мм и обдувается теплым воздухом.

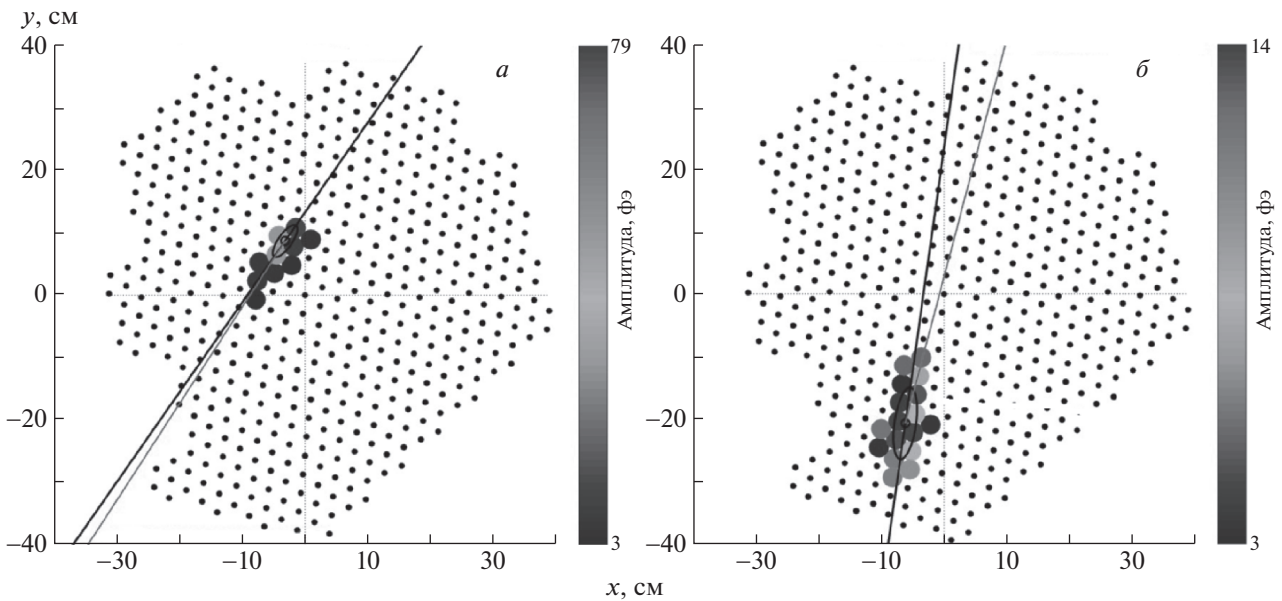
### 3.2. Первые результаты

Тестовая работа прототипа телескопа с шестью смонтированными зеркалами из 30 была начата в конце января 2017 г. Полный темп счета триггера телескопа составлял около 30 Гц, при этом скорость счета событий, в которых регистрировался сигнал от ШАЛ, составляла около 2 Гц, и скорость счета совместных событий (событий с сигналами от ШАЛ, зарегистрированных одновременно телескопом и установкой TAIGA-HiSCORE) — около 0.3 Гц. Два примера изображений ШАЛ, полученных телескопом для совместных событий с TAIGA-HiSCORE, приведены на рис. 7. Так как для совместных событий имеются результаты наблюдений установки HiSCORE, по этим данным восстановлены положения оси ШАЛ (светлыми линиями показаны направления на эту точку). Как видно на

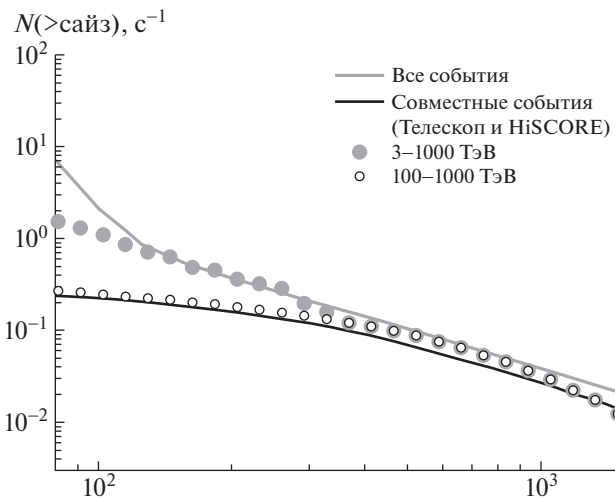
рисунке, данные направления хорошо совпадают с главной осью эллипса имиджа (темная линия), которая и должна проходить через положение оси ШАЛ, если зарегистрированное телескопом изображение действительно инициировано прохождением ливня вторичных частиц через атмосферу.

Хорошее совпадение также наблюдается в сравнении полученных экспериментально при тестовой работе прототипа телескопа и рассчитанных методом Монте-Карло значений важного параметра изображения телескопа — так называемого размера изображения (или сайза), равного сумме зарядов сигналов по всем пикселям камеры после очищения изображения от фоновой засветки ночного неба. Это видно на рис. 8, где приведены интегральные спектры по сайзам за одну ночь наблюдений. Экспериментальный спектр совместных событий телескопа и HiSCORE (темная кривая) совпадает со спектром симулированных ШАЛ в интервале энергий 100–1000 ТэВ (светлые круги), так как при анализе данных установки TAIGA-HiSCORE было показано [34], что энергетический порог регистрации событий этой установкой составляет около 100 ТэВ, а значит, при более низких энергиях совместные события не могут быть зарегистрированы. Совпадение экспериментального спектра всех событий (светлая кривая) со спектром ШАЛ, симулированных в более широком энергетическом интервале 3–1000 ТэВ (серые круги), наблюдается не везде, а только в области рисунка  $\text{size} > 150$  фэ, поскольку меньший размер имиджа соответствует событиям не от ШАЛ, а от фоновой засветки ночного неба, случайно прошедшим триггер телескопа. После установки всех зеркал телескопа и перехода от тестовой





**Рис. 7.** Изображения ШАЛ в камере телескопа при энергии ШАЛ 130 ТэВ, расстоянии от оси ШАЛ до телескопа 183 м (а), при энергии 120 ТэВ, расстоянии 262 м (б). Светлые линии — направление на ось ШАЛ, определенное по данным установки TAIGA-HiSCORE; темные — главная ось эллипса изображения. Точки — положение центров пикселей в камере.



**Рис. 8.** Интегральный спектр параметра “размер имиджа” за одну ночь наблюдений: все зарегистрированные телескопом события (светлая кривая); только совместные события с установкой TAIGA-HiSCORE (темная кривая). Симуляция ШАЛ методом Монте-Карло с различными энергетическими порогами: 3–1000 ТэВ (●); 100–1000 ТэВ (○).

работы прототипа к полноценному функционированию энергетический порог регистрации ШАЛ телескопом ожидается в районе 3 ТэВ.

Тестовая работа телескопа выявила особый класс экспериментальных событий, в которых имидж одновременно регистрировался сразу во многих кластерах камеры (10 или более), причем величина сигнала была примерно одинаковой во всех пикселях всех кластеров.

Анализ подобных событий показал, что их причиной является отражение черенковского света ШАЛ сверхвысоких энергий (около 1 ПэВ) от снега, лежащего вокруг телескопа, в том случае, если ось ШАЛ проходит вне апертуры телескопа; возможность их появления обусловлена тем фактом, что телескоп обсерватории TAIGA является самым полярным черенковским телескопом в мире и в зимний период окружен снежным покровом.

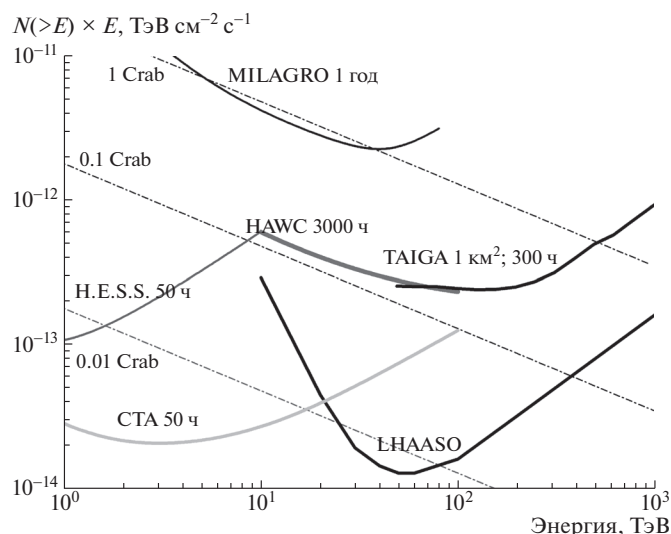


Рис. 9. Интегральная чувствительность обсерватории TAIGA.

Данные события редки (темп их появления — около 10 соб./ч), легко определяются и отбраковываются, а при переходе к полноценной работе телескопа со всеми установленными зеркалами частота появления подобных событий станет еще более незначительной.

#### 4. ПЕРСПЕКТИВЫ

Наша ближайшая цель — построить до конца 2019 г. первую часть обсерватории TAIGA, которая будет состоять из 100–110 оптических станций установки TAIGA-HiSCORE, расположенных на площади 1 км<sup>2</sup>, трех АЧТ и 200-м<sup>2</sup> детекторов мюонов (установка TAIGA-MUON). Такая установка позволит доказать эффективность гибридного подхода для гамма-астрономии сверхвысоких энергий и начать проведение серьезной научной программы.

Ожидаемая интегральная чувствительность установки площадью 1 км<sup>2</sup> за 300 ч наблюдения источника при энергии 100 ТэВ составляет примерно  $2.5 \times 10^{-13}$  ТэВ см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> (рис. 9), превосходя чувствительность эксплуатируемых и планируемых установок в области сверхвысоких энергий. С этой установкой можно решать следующие задачи.

1. Изучение высокоэнергетического края спектра самых ярких галактических источников гамма-излучения; поиск галактических ПэВатронов.

2. Применение нового гибридного подхода для исследования массового состава космических лучей в области “излома” ( $10^{14}$ – $10^{16}$  эВ).

3. Исследование области высоких энергий в энергетическом спектре ярких внегалактических источников (Mrk 421).

4. Исследование анизотропии космических лучей в области энергий 100–3000 ТэВ.

Обсерватория 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 [35] и LHAASO [36], будет в поле зрения детекторов обсерватории TAIGA в течение 500 ч в год.

Работа поддержана Минобрнауки России (гос. задание 3.9678.2017/Б.Ч, 3.904.2017/ПЧ, 3.6787.2017/ИТР, 1.6790.2017/ИТР), грантами РФФИ (№ 16-29-130356, 16-02-00738, 16-32-00329, 17-02-00905) и грантом РНФ № 15-12-20022 (разд. 3). Работа выполнена с использованием оборудования ТАЦКП в рамках выполнения соглашения с Минобрнауки России (уникальный идентификатор RFMEFI59317X0005).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. HESS Collab. (A. Abramowski *et al.*), *Nature* **531**, 476 (2016).
2. V. A. Acciari *et al.* (VERITAS Collab.), *Astrophys. J. Lett.* **730**, L20 (2011).
3. S. Ansoldi *et al.* (MAGIC Collab.), *Astron. Astrophys.* **585**, A133 (2016).
4. A. A. Abdo, B. T. Allen, T. Aune, D. Berley, C. Chen, G. E. Christopher, T. DeYoung, B. L. Dingus, R. W. Ellsworth, M. M. Gonzalez, J. A. Goodman, E. Hays, C. M. Hoffman, P. H.üntemeyer, B. E. Kolterman, J. T. Linnemann, *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **700**, L127 (2009).

5. A. U. Abeysekara *et al.* (HAWC Collab.), arXiv: 1701.01778.
6. В. С. Птушкин, УФН **177**, 558 (2007) [Phys. Usp. **50**, 534 (2007)].
7. M. G. Aartsen *et al.* (IceCube Collab.), Phys. Rev. Lett. **115**, 081102 (2015).
8. C. Spiering, in *Proceedings of the 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, 2013*, Ed. by A. Studenikin (World Sci., Singapore, 2013), p. 105.
9. A. D. Avrorin *et al.* (Baikal Collab.), EPJ Web Conf. **121**, 05003 (2016).
10. S. Adrán-Martine *et al.* (KM3NeT Collab.), J. Phys. G **43**, 084001 (2016).
11. M. G. Aartsen *et al.* (IceCube–Gen2 Collab.), arXiv: 1510.05228.
12. S. F. Berezhnev *et al.* (Tunka Collab.), Nucl. Instrum. Methods A **692**, 98 (2012).
13. P. A. Bezyazeekov *et al.* (Tunka-REX Collab.), JCAP **01**, 052 (2016).
14. Р. Д. Монхоев и др. (Тунка Коллаб.), Изв. РАН. Сер. физ. **81**, 504 (2017) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **81**, 468 (2017)].
15. N. Budnev *et al.* (TAIGA Collab.), J. Phys.: Conf. Ser. **718**, 052006 (2016).
16. L. Kuzmichev *et al.* (TAIGA Collab.), EPJ Web Conf. **145**, 01001 (2017).
17. M. Tluczykont, D. Hampf, D. Horns, T. Kneiske, R. Eichler, R. Nachtigall, and G. Rowell, Adv. Space Res. **48**, 1935 (2011).
18. M. Tluczykont, D. Hampf, D. Horns, D. Spitschan, L. Kuzmichev, V. Prosin, C. Spiering, and R. Wischnewski, Astropart. Phys. **56**, 42 (2014).
19. A. M. Hillas, in *Proceedings of the 19th International Cosmic Ray Conference, La Jolla, USA, 1985*, Ed. by F. C. Jones, J. Adams, and G. M. Mason (NASA Conf. Publ., Washington, 1985), Vol. 3, p. 445.
20. B. S. Acharya *et al.* (CTA Collab.), Astropart. Phys. **43**, 3 (2013).
21. С. Ф. Бережнев и др. (TAIGA Коллаб.), Изв. РАН. Сер. физ. **79**, 381 (2015) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **79**, 348 (2015)].
22. O. Gress *et al.* (TAIGA Collab.), Nucl. Instrum. Methods A **845**, 367 (2017).
23. V. V. Prosin *et al.* (Tunka Collab.), Nucl. Instrum. Methods A **756**, 94 (2014).
24. A. Porelli *et al.* (TAIGA Collab.), J. Phys.: Conf. Ser. **632**, 012041 (2015).
25. <http://cats.gsfc.nasa.gov/>
26. V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskey, N. Shatskij, D. Kuvshinov, N. Tyurina, A. Belinski, A. Krylov, P. Balanutsa, V. Chazov, A. Kuznetsov, P. Kortunov, A. Sankovich, A. Tlatov, A. Parkhomenko, V. Krushinsky, *et al.*, Adv. Astron. **2010**, 349171 (2010).
27. A. Porelli *et al.* (TAIGA Collab.), PoS(ICRC2017)754.
28. А. Д. Панов, Дж. Х. Адамс мл., Х. С. Ан, Г. Л. Башинжаган, Дж. В. Ваттс, Дж. П. Вефель, Дж. Ву, О. Ганел, Т. Г. Гузик, В. И. Зацепин, И. Изберт, К. Ц. Ким, М. Кристл, Е. Н. Кузнецов, М. И. Панасюк, Э. С. Сио и др., Изв. РАН. Сер. физ. **73**, 602 (2009) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **73**, 564 (2009)].
29. E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, N. Gorbunov, S. Filippov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, M. Merkin, A. Panov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, *et al.*, JCAP **7**, 020 (2017).
30. N. Budnev, D. Chernov, O. Gress, E. Korosteleva, L. Kuzmichev, B. Lubsandorzhev, G. Navarra, L. Pankov, V. Prosin, Yu. Semenev, C. Spiering, R. Wischnewski, and I. Yashin, Astropart. Phys. **50–52**, 18 (2013).
31. K. Meagher (for the VERITAS Collab.), PoS(ICRC2015)792.
32. F. Aharonian *et al.* (HEGRA Collab.), Astrophys. J. **614**, 897 (2004).
33. J. Aleksić *et al.* (MAGIC Collab.), JHEA **5–6**, 30 (2015).
34. L. Sveshnikova *et al.* (TAIGA Collab.), PoS(ICRC2017)677.
35. G. Sinnis (on behalf of the Milagro and HAWC Collabs.), Nucl. Instrum. Methods A **623**, 410 (2010).
36. S. Cui, Ye Liu, Yu. Liu, and X. Ma (on behalf of the LHAASO Collab.), Astropart. Phys. **54**, 86 (2014).

## TAIGA GAMMA-OBSERVATORY: STATUS AND PERSPECTIVES

**L. A. Kuzmichev, I. I. Astapov, P. A. Bezyazeekov, V. Boreyko, A. N. Borodin, N. M. Budnev, A. Chiavassa, A. N. Dyachok, A. Sh. M. Elshoukrofy, O. L. Fedorov, A. Y. Garmash, A. R. Gafarov, N. V. Gorbunov, V. M. Grebenyuk, O. A. Gress, T. I. Gress, A. A. Grinyuk, O. G. Grishin, A. D. Horns, A. L. Ivanova, Y. A. Kazarina, N. N. Kalmykov, N. I. Karpov, V. V. Kindin, P. S. Kirilenko, S. N. Kiryuhin, V. A. Kozhin, R. P. Kokoulin, K. G. Kompaniets, E. E. Korosteleva, E. A. Kravchenko, M. Kunnas, A. A. Lagutin, V. V. Lenok, B. K. Lubsandorzhev, N. B. Lubsandorzhev, R. R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. D. Monkhoev, R. Nachtigall, E. A. Osipova, M. I. Panasyuk, L. V. Pankov, A. L. Pakhorukov, A. A. Petrukhin, V. A. Poleschuk, M. Popesku, E. G. Popova, A. Porelli, E. B. Postnikov, V. V. Prosin,**

**V. S. Ptuskin, A. A. Pushnin, R. I. Raikin, G. I. Rubtsov, Y. I. Sagan, V. S. Samoliga, Yu. A. Semenev, A. Y. Sidorenkov, A. A. Silaev, A. A. Silaev, jr., A. V. Skurikhin, M. Slunetska, A. V. Sokolov, C. Spiering, V. P. Sulakov, L. G. Sveshnikova, V. A. Tabolenko, B. A. Tarashansky, A. V. Tkachenko, L. G. Tkachev, M. Tluczykont, R. Wischnewski, I. I. Yashin, A. V. Zagorodnikov, V. L. Zurbanov**

In the last few years, we have started deploying the TAIGA observatory (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) in the Tunka Valley, the Republic of Buryatia. It is designed to study gamma radiation in the energy range from 30 TeV and to search for the sources of Galactic cosmic rays with energies around 1 PeV, the energy region approximately adjoining the classical knee in the all-particle energy spectrum. The first phase of the observatory will be located on the site of the Tunka-133 array about 50 km from Lake Baikal. The observatory will include a network of 500 wide field of view (0.6 sr) timing Cherenkov light stations (TAIGA-HiSCORE array), and up to 16 imaging atmospheric Cherenkov telescopes (IACT), covering an area of 5 km<sup>2</sup>. The capabilities of these Cherenkov arrays will be enhanced by muon detectors with a total coverage of 2000 m<sup>2</sup>, distributed over an area of 1 km<sup>2</sup>. In the next 3 years, we plan to increase the area of TAIGA-HiSCORE by a factor of 4: from 0.25 to 1 km<sup>2</sup>, to add 2 IACTs to the existing one, and to deploy new muon detectors with a total coverage of 200 m<sup>2</sup>. In this paper, we describe the components of the new observatory as well as data analysis techniques, present the most interesting physical results, and discuss the future research program.