

ЭКСПЕРИМЕНТ TAIGA: ОТ ФИЗИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ К ГАММА-АСТРОНОМИИ В ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЕ

Н. М. Буднев^{1,*}, *И. И. Астапов*², *П. А. Безьязыков*¹,
*А. В. Борейко*³, *А. Н. Бородин*³, *А. Ю. Гармаш*⁴,
*А. Р. Гафаров*¹, *Н. В. Горбунов*^{3,5}, *В. М. Гребенюк*^{3,5},
*О. А. Гресс*¹, *Т. И. Гресс*¹, *А. А. Гринюк*³, *О. Г. Гришин*¹,
*А. Н. Дячок*¹, *Д. П. Журов*¹, *А. В. Загородников*¹,
*В. Л. Зурбанов*¹, *А. Л. Иванова*¹, *Ю. А. Казарина*¹,
*Н. Н. Калмыков*⁶, *В. В. Киндин*², *П. С. Кириленко*⁴,
*С. Н. Кирюхин*¹, *В. А. Кожин*⁶, *Р. П. Кокоулин*²,
*К. Г. Компаниец*², *Е. Е. Коростелева*⁶, *Д. Г. Костюнин*⁷,
Е. А. Кравченко^{4,8}, *Л. А. Кузьмичев*^{1,6}, *Ю. Е. Лемешев*¹,
*В. В. Ленок*¹, *Б. К. Лубсандоржиев*^{6,9}, *Н. Б. Лубсандоржиев*⁶,
*Р. Р. Миргазов*¹, *Р. Мирзоян*^{1,10}, *Р. Д. Монхоев*¹,
*Э. А. Осипова*⁶, *М. И. Панасюк*⁶, *Л. В. Паньков*¹,
*А. Л. Пахоруков*¹, *А. А. Петрухин*², *В. А. Полещук*¹,
*Е. Г. Попова*⁶, *Е. Б. Постников*⁶, *В. В. Просин*⁶,
*В. С. Птускин*¹¹, *А. А. Пушкин*¹, *Г. И. Рубцов*⁹,
*Е. В. Рябов*¹, *Б. М. Сабиров*³, *Я. Сагань*³,
*В. С. Самолига*¹, *Л. Г. Свешникова*⁶, *Ю. А. Семеней*¹,
*А. Ю. Сидоренков*⁹, *А. А. Силаев*⁶, *А. А. Силаев (мл.)*⁶,
*А. О. Скурихин*⁶, *М. Слунечка*³, *А. В. Соколов*^{4,8},
*В. А. Таболенко*¹, *Б. А. Таращанский*¹, *Л. Г. Ткачев*^{3,5},
*А. В. Ткаченко*³, *О. Л. Федоров*¹, *И. И. Яшин*²

¹ Научно-исследовательский институт прикладной физики
Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

⁴ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁵ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

⁶ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

⁷ Технологический институт Карлсруэ, Карлсруэ, Германия

⁸ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

⁹ Институт ядерных исследований РАН, Троицк, Россия

¹⁰ Институт физики Общества Макса Планка, Мюнхен, Германия

¹¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Троицк, Россия

Представлены актуальность и преимущества новой гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy), создаваемой в Тункинской долине в 50 км от оз. Байкал. Различные детекторы шести установок гамма-обсерватории TAIGA регистрируют черенковское и радиоизлучения, а также электронную и мюонную компоненты ШАЛ. Основная задача гамма-обсерватории TAIGA — исследование высокоэнергетической части спектра гамма-излучения, в частности, с целью поиска галактических пэватронов. В обсерватории по данным широкоугольных черенковских детекторов установки TAIGA-HiSCORE восстанавливаются энергия, направление и положение оси ШАЛ. Выделение порожденных гамма-квантами ШАЛ из адронного фона с учетом этой информации производится по данным, получаемым с помощью телескопов, регистрирующих изображение ШАЛ в черенковском свете, и мюонных детекторов. При таком гибридном режиме работы атмосферные черенковские телескопы могут работать в монорежиме и расстояние между ними может быть увеличено до 800–1000 м, что позволяет создать установку площадью 5 км и более при относительно небольших затратах и в короткие сроки. К 2019 г. будет построена первая очередь гамма-обсерватории площадью 1 км², ее ожидаемая интегральная чувствительность для регистрации гамма-излучения с энергией 100 ТэВ при наблюдении в течение 300 ч за источником будет примерно $2,5 \cdot 10^{-13}$ ТэВ · см⁻² · с⁻¹.

The article presents the relevance and advantages of the new gamma-observatory TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy), which is being created in the Tunka Valley 50 km from Lake Baikal. The various detectors of six TAIGA gamma-observatory installations register Cherenkov and radio radiation, as well as the electronic and muon components of the EAS. The main task of the gamma-observatory TAIGA is to study the high-energy part of the gamma-ray spectrum, in particular, in order to search for Galactic PeVatrons. In the observatory, according to the data of the wide-angle Cherenkov detectors of the TAIGA-HiSCORE experiment, the energy, direction and position of the EAS axis are reconstructed. The selection of gamma quanta from the hadron background, taking into account this information, is carried out from data obtained by means of telescopes registering the EAS image in the Cherenkov light and muon detectors. In this hybrid mode of operation, atmospheric Cherenkov telescopes can operate in mono mode and the distance between them can be increased to 800–1000 m, which makes it possible to create an installation with an area of 5 km and

more at relatively low costs and in a short time. By 2019, the first stage of the gamma-observatory with an area of 1 km^2 will be constructed, its expected integral sensitivity for registration of gamma radiation with an energy of 100 TeV for observation for 300 h behind the source will be approximately $2.5 \cdot 10^{-13} \text{ TeV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

PACS: 98.70.Rz; 98.70.Sa

ВВЕДЕНИЕ

Исследование потоков гамма-квантов, порождаемых в окрестности галактических и метагалактических источников космических лучей высоких энергий, — наиболее эффективный способ изучения их природы. К настоящему времени наиболее значимые результаты в гамма-астрономии высоких энергий получены с помощью установок HEGRA, H.E.S.S., VERITAS и MAGIC, которые включают в себя от двух до пяти так называемых Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT) с диаметром составного зеркала от 4 до 28 м и с многоканальной камерой, регистрирующей изображение черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ). В русскоязычной литературе нет устоявшегося названия для IACT, мы будем их называть атмосферными черенковскими телескопами (АЧТ). Для достоверного восстановления параметров ШАЛ и определения природы породившей его частицы ШАЛ должны регистрироваться несколькими АЧТ (в стереоскопическом режиме). Выделение событий, порожденных гамма-квантами высоких энергий, осуществляется на основе анализа формы черенковского изображения ШАЛ по методике, предложенной Хилласом [1]. Среди перечисленных выше установок АЧТ расположены на расстоянии порядка 100 м друг от друга, и они очень эффективны для регистрации гамма-квантов с энергией до 30 ТэВ. Однако относительно небольшая площадь действующих установок не позволяет регистрировать с достаточной статистикой фотоны с более высокой энергией. Для энергий выше 250 ТэВ установлены ограничения лишь на поток гамма-квантов по данным экспериментов KASCADE, CASA-MIA и др.

Для исследования гамма-излучения с энергией выше 50 ТэВ нужны установки с эффективной площадью не менее 1 km^2 . В связи с этим в последние годы активно разрабатывается проект установки СТА (Cherenkov Telescope Array). Это наиболее амбициозный и дорогой проект, в рамках которого предполагается построить почти 100 АЧТ с зеркалами диаметром от 4 до 30 м.

В гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) с гибридной системой совместно работающих детекторов, которая создается в Тункинской долине в 50 км от оз. Байкал, развивается принципиально новый подход к исследованиям гамма-излучения сверхвысоких энергий. Основная его особенность состоит в том, что в этом проекте прецизионное восстановление энергии, положения и направления оси

ШАЛ осуществляется по данным широкоугольной черенковской установки TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) [2]. Для определения вида частицы, породившей ШАЛ (в первую очередь, выделения ШАЛ от гамма-квантов из создаваемого ядрами фона), будут в основном использоваться данные, получаемые с помощью АЧТ установки TAIGA-IACT. Важно, что при наличии информации об энергии, положении и направлении оси ливня достаточно, чтобы его черенковское излучение было зарегистрировано только одним телескопом, т. е. в монорежиме, что в соответствии с результатами моделирования позволяет увеличить расстояние между дорогостоящими АЧТ как минимум до 600 м, а возможно, и до 1000 м.

К настоящему времени в составе гамма-обсерватории TAIGA на площади около 0,6 км² развернуто 60 широкоугольных оптических станций установки TAIGA-HiSCORE и первый АЧТ установки TAIGA-IACT. К концу 2018 г. количество оптических станций установки TAIGA-HiSCORE будет удвоено и развернуто еще два АЧТ установки TAIGA-IACT. Также планируется развернуть мюонные детекторы общей площадью 250 м². Такой комплекс на площади около 1 км² не только позволит экспериментально проверить эффективность совместной работы широкоугольной черенковской установки, АЧТ и мюонных детекторов для регистрации гамма-квантов с энергией выше 30 ТэВ, но и станет наиболее чувствительным инструментом для решения

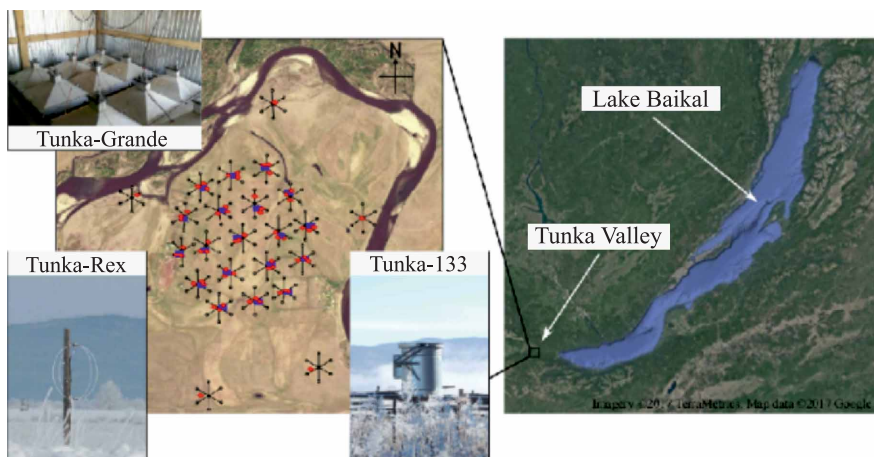


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Схема расположения установок для исследования космических лучей в Тункинской долине. Установка Tunka-133 включает в себя 175 черенковских детекторов на площади 3 км², установка Tunka-Grande состоит из 19 станций (синие кружки), с наземными и подземными сцинтилляционными детекторами общим числом 380 шт. В установке Tunka-Rex в настоящее время 63 антенны (красные кружки)

задач гамма-астрономии высоких энергий, а также позволит получить на рекордном уровне статистики и точности данные о космических лучах с энергией выше 100 ТэВ.

Одновременно для исследования потоков космических лучей, поиска гамма-квантов и нейтрино более высоких энергий активно развивается методика регистрации радиоизлучения ШАЛ с помощью установки Tunka-Rex (с порогом регистрации адронных ШАЛ 100 ПэВ, порожденных гамма-квантами электромагнитных ШАЛ 10 ПэВ), работающей совместно с установкой Tunka-133 (с порогом регистрации адронных ШАЛ 5 ПэВ, порожденных гамма-квантами электромагнитных ШАЛ 500 ТэВ) и сцинтиляционными установками Tunka-Grande и TAIGA-Muon.

Быстрый прогресс в создании гамма-обсерватории TAIGA базируется на большом методическом и техническом опыте, накопленном при создании ряда широкоугольных черенковских установок Tunka-13, Tunka-25 [3], Tunka-133 [4], а также радиоустановки Tunka-Rex [5] и сцинтилляционной установки Tunka-Grande [6] (рис. 1), нацеленных на исследование космических лучей с энергией выше 1 ПэВ.

1. ШИРОКОУГОЛЬНАЯ ЧЕРЕНКОВСКАЯ УСТАНОВКА TAIGA-HiSCORE

Каждая оптическая станция установки TAIGA-HiSCORE включает в себя два контейнера. В одном из них (черенковском контейнере, рис. 2) расположены четыре фотоэлектронных умножителя (ФЭУ) с диаметром фотокатода 20 или 25 см (ET9352KB, R5912 и R7081). Каждый ФЭУ снабжен конусом Винстона, изготовленным из зеркального материала Alanod 4300 UD, что увеличивает эффективную площадь светосбора в четыре раза. Угол обзора конуса $\pm 30^\circ$ ($\sim 0,6$ ср). Аналоговые сигналы с анодов и для расширения динамического диапазона с пятого динода каждого ФЭУ передаются во второй расположенный рядом «электронный контейнер», где происходит их суммирование, оцифровка и предварительный отбор по заданным критериям. Светособирающие конусы закрыты сверху специальным пропускающим ультрафиолетовое излучение органическим стеклом для защиты от пыли и влаги (изморози). В черенковском контейнере в целом температура не регулируется, но «окна» подогреваются для защиты от обмерзания, так что они остаются чистыми даже при температуре ниже -40°C . Для защиты ФЭУ от солнечного света и осадков в плохую погоду черенковские контейнеры имеют крышки, которые открываются и закрываются с помощью электродвигателей. Для управления двигателями установки, напряжением на источниках питания для ФЭУ, мониторинга анодных токов и других функций используются специальные контроллеры черенковских контейнеров. Высокое напряжение отключается, если анодные токи превосходят установленные предельные значения.

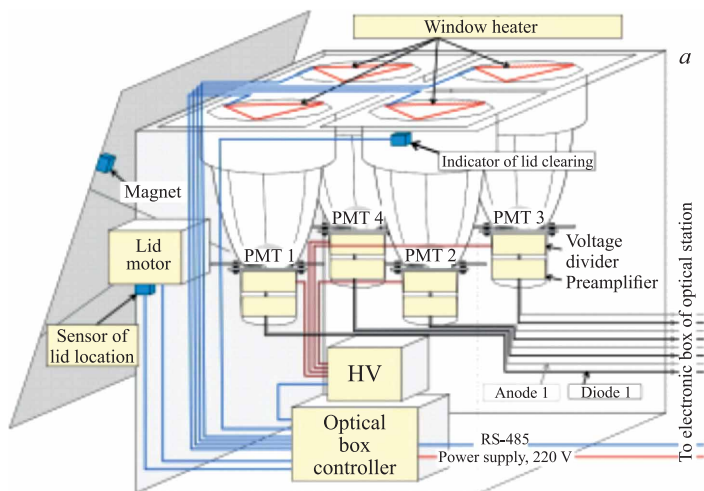


Рис. 2. Схема (а) и фото (б) контейнера с ФЭУ оптической станции установки TAIGA-HiSCORE

Для уменьшения анодного тока шестой и последующие диоды ФЭУ закорочены на анод, при этом коэффициент усиления ФЭУ — порядка 10^4 , а в безлунные ясные ночи анодные токи ФЭУ — в пределах 70–80 мкА. Чтобы компенсировать малость усиления ФЭУ, анодный и диодный предварительные усилители имеют коэффициенты усиления 30 и 4 соответственно.

Система сбора данных установки TAIGA-HiSCORE имеет иерархическую структуру. Оптические станции установки разбиты на кластеры, в каждом из которых около 30 станций. Система сбора данных каждого кластера (рис. 3)

включает в себя две части: электронику сбора данных оптических станций (Station DAQ), которая находится в термостабилизированных контейнерах, расположенных на расстоянии около 1,5 м от черенковских контейнеров, и центральную часть (Central DAQ), расположенную в геометрическом центре кластера. Каждая оптическая станция соединена с центральной электроникой кластера оптическим кабелем, по которому происходят передача данных и синхронизация. Последняя осуществляется с субнаносекундной точностью с помощью гибридной системы, показанной на рис. 3. Она объединяет систему традиционной синхронизации на частоте 100 МГц и временную систему White Rabbit (WR) Ethernet-based [7, 8]. Последняя обеспечивает привязку к центральным часам на базе GSP-disciplined Rubidium Oscillator (GPSDO). Стабильность синхронизации — порядка 0,2 нс. Точное значение временных задержек для отдельных оптических станций определяется путем их засветки внешним источником света.

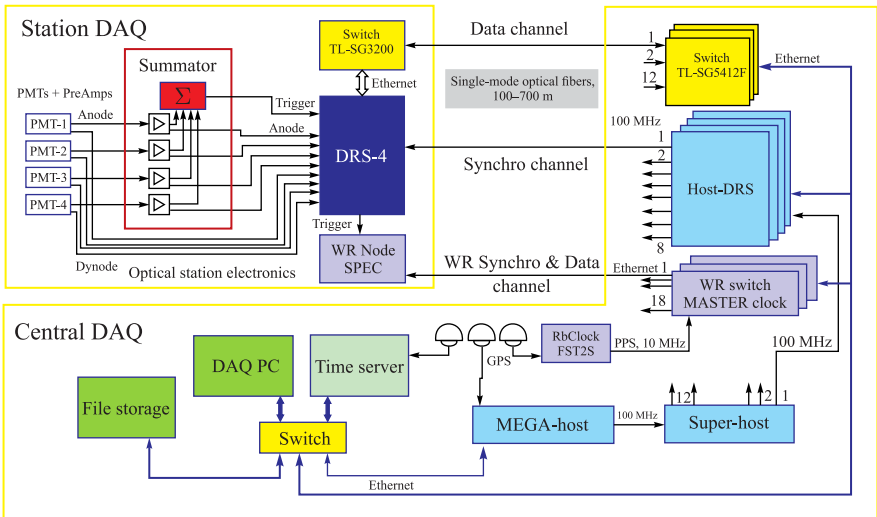


Рис. 3. Система сбора данных кластера установки TAIGA-HiSCORE

Главными компонентами электроники оптических станций являются аналоговые сумматоры и 8-канальные аналого-цифровые преобразователи на базе микросхем DRS-4, с помощью которых сигналы с анодов и динодов оцифровываются с шагом 0,5 нс в течение временного окна продолжительностью 200 нс после выработки триггера. Условие формирования триггера — превышение суммарным анодным сигналом порога, который устанавливается на уровне 200 фотоэлектронов, что соответствует плотности потока черенковского света порядка 0,3 фотона/см² [9]. При таком условии частота

выработки триггера отдельными станциями — порядка 10–15 Гц. За счет использования светособирающих конусов и суммирования сигналов с четырех ФЭУ энергетический порог установки TAIGA-HiSCORE примерно в 20 раз ниже, чем для установки Tunka-133, и составляет 80–100 ТэВ для регистрации адронных ШАЛ и 40–50 ТэВ для регистрации порожденных гамма-квантами ШАЛ.

В течение зимнего сезона 2016–2017 гг. в измерениях участвовало 28 оптических станций первого кластера установки TAIGA-HiSCORE (рис. 4). Они расположены на площади 0,25 км² в узлах регулярной сетки с минимальным расстоянием между станциями 106 м. Все станции были наклонены в южном направлении на 25° для увеличения времени наблюдения за источником гамма-квантов в Крабовидной туманности.

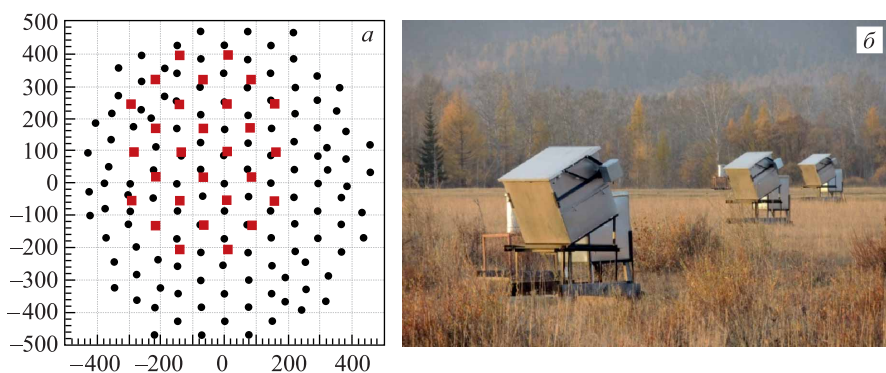


Рис. 4. *а*) Расположение оптических станций установки TAIGA-HiSCORE (квадраты) и детекторов установки Tunka-133 (кружки). *б*) Группа оптических станций

Восстановление параметров ШАЛ по данным установки TAIGA-HiSCORE проводится с помощью методик и алгоритмов, разработанных для обработки данных установки Tunka-133 [10, 11]. Направление прихода ШАЛ определяется по относительной задержке времени регистрации черенковского импульса каждой станцией. Энергия первичной частицы восстанавливается по плотности потока черенковского света (Q200) на расстоянии 200 м от оси ШАЛ [11] с точностью около 15%. Точность определения направления прихода ШАЛ сильно зависит от количества сработавших станций. Угловое разрешение составляет 0,4–0,5° для событий с 4–5 сработавшими станциями и около 0,10° для событий с более чем 10 сработавшими станциями. Дополнительно точность восстановления направления ШАЛ может быть проверена при регистрации света от лидара, установленного на международной космической станции (МКС) [12] (рис. 5). Замечательно, что наблюдается совпадение результатов восстановления позиции МКС по данным установки

ISS sky path (−3s, +4s) [Zenith, Azimuth ($S \rightarrow E$)]

HiSCORE local sky

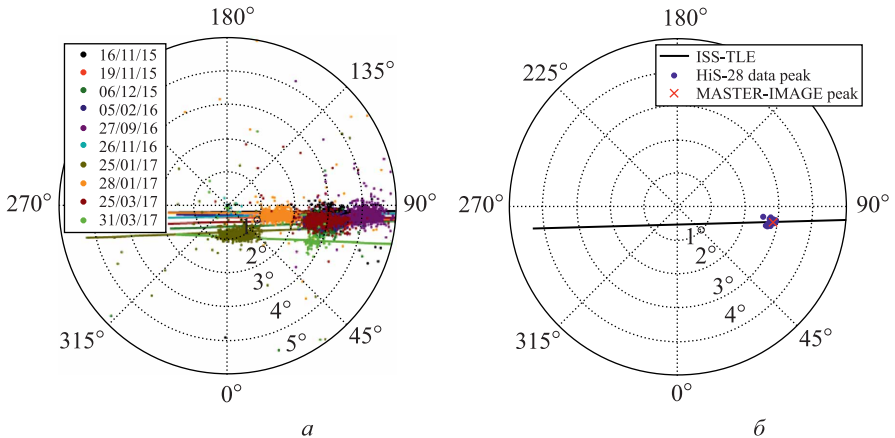
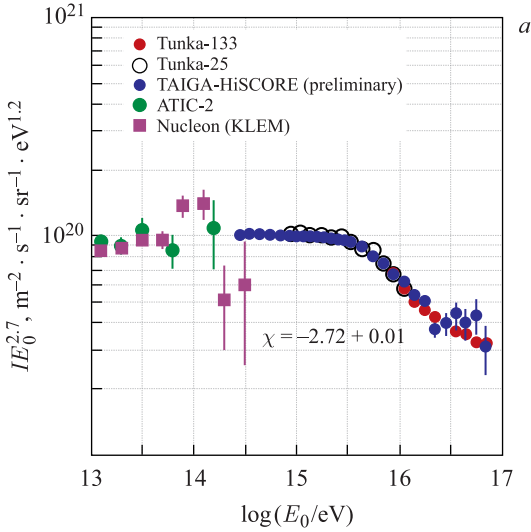


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Регистрация установленного на МКС лидара установкой TAIGA-HiSCORE. *а*) Сводка по 10 проходам МКС в 2015–2017 гг.: линии — траектории МКС; точки — результаты восстановления позиции МКС по данным установки TAIGA-HiSCORE. *б*) Сравнение результатов восстановления позиции МКС по данным установки TAIGA-HiSCORE и телескопа-робота системы МАСТЕР

TAIGA-HiSCORE и расположенного там же телескопа-робота системы МАСТЕР [13] с точностью порядка $0,2^\circ$.

На рис. 6, *а* приведены предварительные результаты восстановления энергетического спектра космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE в сравнении с результатами наших предыдущих экспериментов в Тункинской долине, а также с результатами баллонного эксперимента АТИК-2 [14] и спутникового эксперимента НУКЛОН [15].

Остаток сверхновой SN1054 — Крабовидная туманность (далее «Краб») — является ярчайшим источником высокоэнергетического гамма-излучения. Обычно в области энергий до 10 ТэВ поток фотонов от «Краба» используется для калибровки новых установок. Область энергий выше 30 ТэВ, которую планируется исследовать на установке TAIGA-HiSCORE, остается практически неизученной, зарегистрированы лишь единичные события, что можно использовать для грубой оценки ожидаемого потока гамма-квантов от «Краба» в области энергий, доступной для установки TAIGA-HiSCORE. На рис. 6, *б* приведены результаты такого поиска. Предварительно можно говорить о возможном превышении количества зарегистрированных ШАЛ в диапазоне энергии 40–100 ТэВ в ячейке величиной $0,3\text{--}0,4^\circ$ в направлении на «Краб» над фоном космических лучей с достоверностью $2\text{--}2,5\sigma$.



Указание на возможный сигнал от «Краба» на уровне $2,5\sigma$

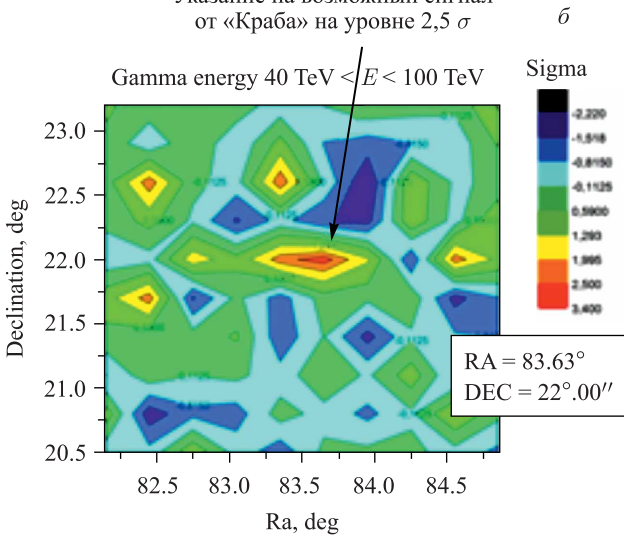


Рис. 6. а) Энергетический спектр первичных космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE в сравнении с результатами других экспериментов. б) Результаты поиска избытка ШАЛ в диапазоне энергии 40–100 ТэВ в ячейке величиной 0,3–0,4° в направлении на «Кrab» над фоном космических лучей

2. УСТАНОВКА TAIGA-IACT

Атмосферные черенковские телескопы установки TAIGA-IACT представляют собой телескопы-рефлекторы, выполненные в конструкции Дэвиса–Коттона. Составные зеркала телескопов будут включать в себя 34 сегмента зеркал специальной сферической формы диаметром 60 см. Суммарная площадь зеркал каждого телескопа составит $\sim 10 \text{ м}^2$, общий диаметр — 4,32 м, фокусное расстояние — 4,75 м. Для защиты от обмерзания все зеркала обдуваются подогретым воздухом. При эксплуатации первого АЧТ (рис. 7, *a*) в тестовом режиме в течение зимнего сезона 2016–2017 гг. на монтажке было установлено только шесть зеркал. В настоящее время установлены все 29 имеющихся зеркал (рис. 7, *б*).

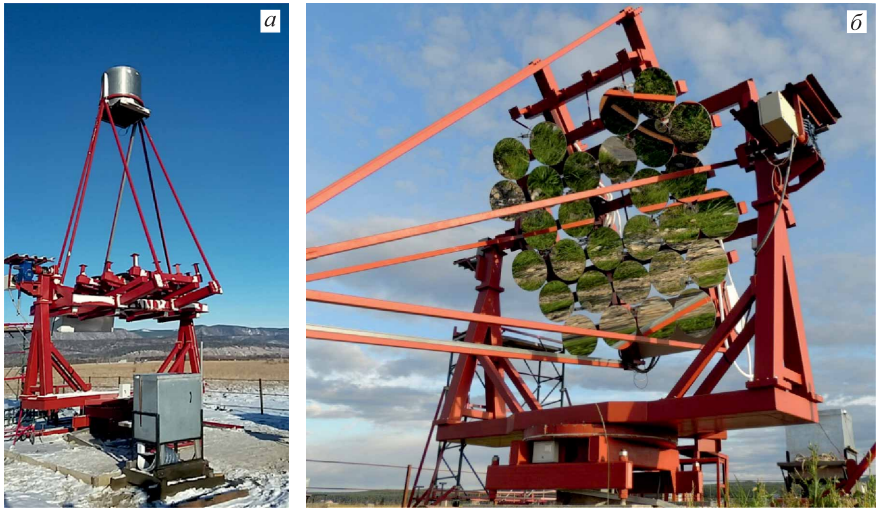


Рис. 7. Первый АЧТ в гамма-обсерватории TAIGA в период тестовой эксплуатации (*a*) и после установки 29 зеркал (*б*)

В фокусе зеркал телескопа установлена камера с углом обзора $9,72 \times 9,72^\circ$, с помощью которой регистрируется черенковское излучение от ШАЛ. Камера первого телескопа включает в себя 547 ФЭУ XR1911 диаметром 19 мм. Общий диаметр камеры составляет ~ 110 см. Входное окно камеры изготовлено из оргстекла толщиной 15 мм, которое обдувается теплым воздухом для защиты от росы и обмерзания и защищено от солнечного света, пыли и осадков с помощью жалюзи (рис. 7, *a*).

Все ФЭУ-камеры распределены в кластеры (рис. 8), в большинстве кластеров — четыре группы по семь ФЭУ, имеющих единую плату делителей и единый высоковольтный источник питания. Группы кластера объединя-

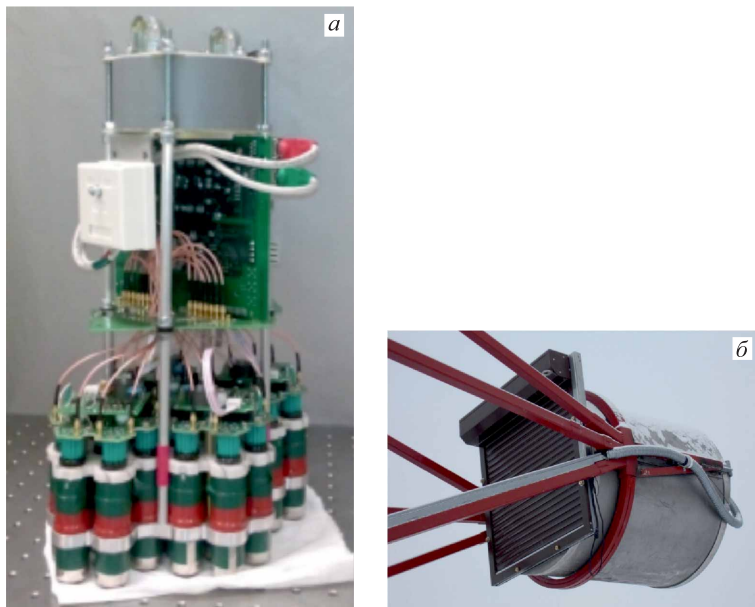


Рис. 8. а) Кластер ФЭУ-камеры АЧТ установки TAIGA-HiSCORE. б) Камера первого АЧТ

ются одной кросс-платой, на которой установлены ЦАП для управления высоковольтными источниками и АЦП для измерения тока всех ФЭУ кластера. Усиление ФЭУ ограничено допустимой величиной фонового анодного тока от ночного неба. При выбранном рабочем коэффициенте усиления 10^5 ток ФЭУ составляет 2 мкА. При токе 50 мкА (появлении 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. Эта микросхема содержит аналоговый мультиплексированный выход, с которого сигналы подаются на 12-битные АЦП. Каждый ФЭУ подключается к двум измерительным каналам. Различие коэффициентов усиления этих каналов составляет в 30 раз, что позволяет иметь линейность преобразования заряд-код до 3000 фотоэлектронов при коэффициенте усиления ФЭУ 10^5 . Блок также содержит мажоритарную схему совпадения, которая позволяет формировать локальный триггер кластера. Напряжение питания +12 В и +24 В подается в кластер через контроллер питания. Кластеры ФЭУ монтируются на несущую дюралевую

плиту. С другой стороны к плите крепятся конусы Винстона, увеличивающие площадь светосбора в 3 раза. Угол обзора каждого конуса составляет 35° и перекрывает все зеркала телескопа.

Измерения с помощью первого АЧТ установки TAIGA-IACT были начаты в конце января 2017 г. Полный темп счета триггеров телескопа составлял около 30 Гц, при этом темп счета событий, в которых регистрировался сигнал от ШАЛ, составлял около 2 Гц, а темп счета событий, совместных с установкой TAIGA-HiSCORE, составил $\sim 0,3$ Гц. Для совместных событий направления на положение оси ШАЛ по данным установки TAIGA-HiSCORE (красные линии 1 на рис. 9) хорошо согласуются с направлениями главных осей эллипсов изображений ШАЛ в камере АЧТ (черные линии 2 на рис. 9), что свидетельствует о соответствии зарегистрированных телескопом изображений данным ШАЛ.

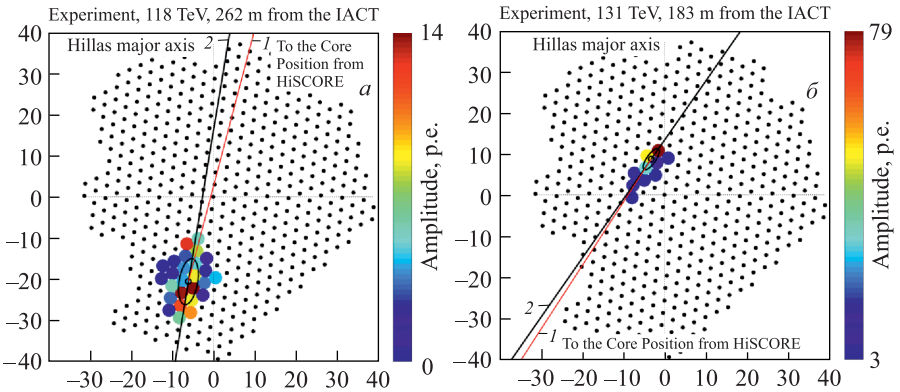


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Изображения ШАЛ в камере АЧТ: красные линии (1) — направления на оси ШАЛ, определенные по данным установки TAIGA-HiSCORE; черные линии (2) — главные оси эллипсов изображений

Хорошее согласие также наблюдается между рассчитанными методом Монте-Карло и экспериментально измеренными распределениями так называемого «размера изображения», т. е. суммы сигналов по всем пикселям камеры АЧТ после очищения изображений от фоновой засветки ночного неба (рис. 10). Экспериментальный спектр совместных событий (черная линия 2) хорошо совпадает со спектром смоделированных ШАЛ (черные кружки) при энергии, превышающей порог регистрации установки TAIGA-HiSCORE. Совпадение экспериментальных данных спектра всех событий (красная линия 1) со спектром ШАЛ, смоделированным в более широком энергетическом интервале — от 3 до 1000 ТэВ (красные кружки), наблюдается для параметра $size > 150$ фотоэлектронов, поскольку меньший размер изображений соответ-

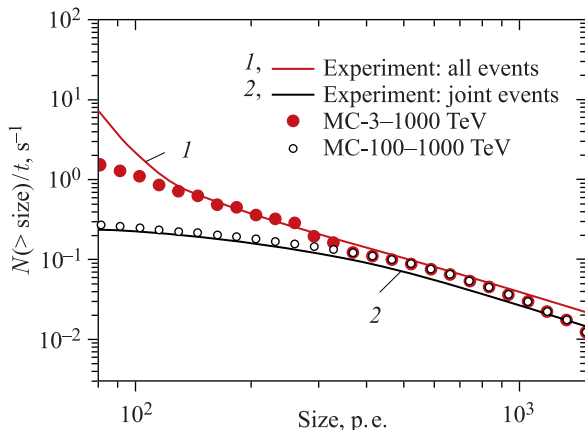


Рис. 10 (цветной в электронной версии). Интегральный спектр параметра «размер изображения» за одну ночь наблюдений: красная линия (1) — все зарегистрированные телескопом события; черная линия (2) — только совместные события с установкой TAIGA-HiSCORE. Моделирование ШАЛ методом Монте-Карло с различными энергетическими порогами: 3–1000 ТэВ (красные кружки); 100–1000 ТэВ (черные)

стует событиям не от ШАЛ, а от фоновой засветки ночного неба. После установки всех зеркал и перехода от тестовой работы к полноценному функционированию энергетический порог АЧТ для регистрации ШАЛ ожидается в области 3 ТэВ.

3. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ В СОСТАВЕ ГАММА-ОБСЕРВАТОРИИ TAIGA

Самым значительным недостатком черенковских детекторов для решения задач физики космических лучей и гамма-астрономии состоит в том, что они могут работать только в безлунные ночи при хорошей погоде, что примерно на порядок сокращает время набора статистики. Сцинтилляционные детекторы частиц позволяют не только делать наблюдения круглосуточными и всепогодными, но и решать ряд важных физических задач, в частности, данные о числе мюонов очень полезны для определения типа первичной частицы, породившей ШАЛ, и особенно выделения гамма-квантов, поскольку при данной энергии число мюонов в ШАЛ от протона в 30 раз меньше, чем в ШАЛ от фотона.

В связи с этим в 2013–2015 гг. была построена установка Tunka-Grande в составе 19 сцинтилляционных станций на площади 1 км² [6] на базе счетчиков, ранее работавших в составе установки KASCADE-Grande. В каждой станции имеются мюонные детекторы площадью около 5 м². Однако для

надежного выделения ШАЛ от гамма-квантов суммарная площадь мюонных детекторов должна быть не менее 0,2 % от площади установки. Поэтому к настоящему времени разработаны и испытаны новые сцинтилляционные счетчики, на базе которых будет построена установка TAIGA-Muon, в которой общая площадь мюонных детекторов составит 2–3 тыс. м².

Схема нового мюонного счетчика площадью 1 м² представлена на рис. 11. Сбор сцинтилляционного света в счетчике производится с помощью пластин-световодов с сечением 5 × 20 мм и с переизлучающей добавкой ВВQ с концентрацией 100 мг/кг. Данный способ сбора света от сцинтилляционной вспышки позволяет использовать дешевые ФЭУ-85 производства МЭЛЗ (Москва) с малым размером фотокатода и квантовой чувствительностью

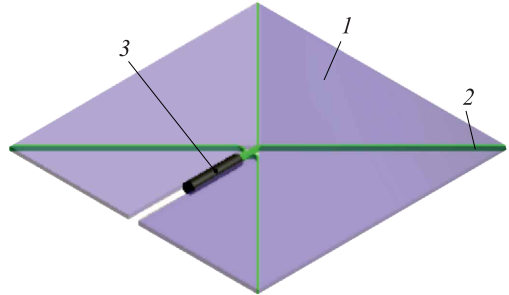


Рис. 11. Схема сцинтилляционного детектора: 1 — пластиковый сцинтиллятор; 2 — переизлучающая пластина световода; 3 — ФЭУ

около 20 % в красной области, где находится максимум спектра излучения переизлучателей. Для выравнивания величины сигнала в дальней от ФЭУ части сцинтиллятор представляет собой сборку из двух пластин толщиной 10 мм, в средней и ближней частях используются одиночные пластины толщиной 10 мм. Торцы пластин отполированы, часть торца ближней пластины прикрыта черной бумагой для выравнивания амплитуды сигнала, оптический контакт между ФЭУ и световодом отсутствует. В данной конфигурации на космических мюонах была измерена неоднородность амплитуды по координате прохождения частицы через счетчик. Средняя амплитуда составила 23,1 фотоэлектрона, неоднородность $\pm 15\%$ (минимум–максимум). Временное разрешение счетчика не менее 5 нс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наша ближайшая цель — построить до конца 2019 г. первую очередь гамма-обсерватории TAIGA, которая будет включать в себя 110–120 широкоугольных оптических станций, расположенных на площади 1 км², три АЧТ и 250 м² детекторов мюонов (рис. 12).

Ожидаемая интегральная чувствительность этого комплекса для регистрации гамма-излучения с энергией 100 ТэВ при наблюдении в течение 300 ч за источником будет примерно $2,5 \cdot 10^{-13}$ ТэВ · см⁻² · с⁻¹ (рис. 13), что выше, чем чувствительность эксплуатируемых и планируемых установок в этой обла-

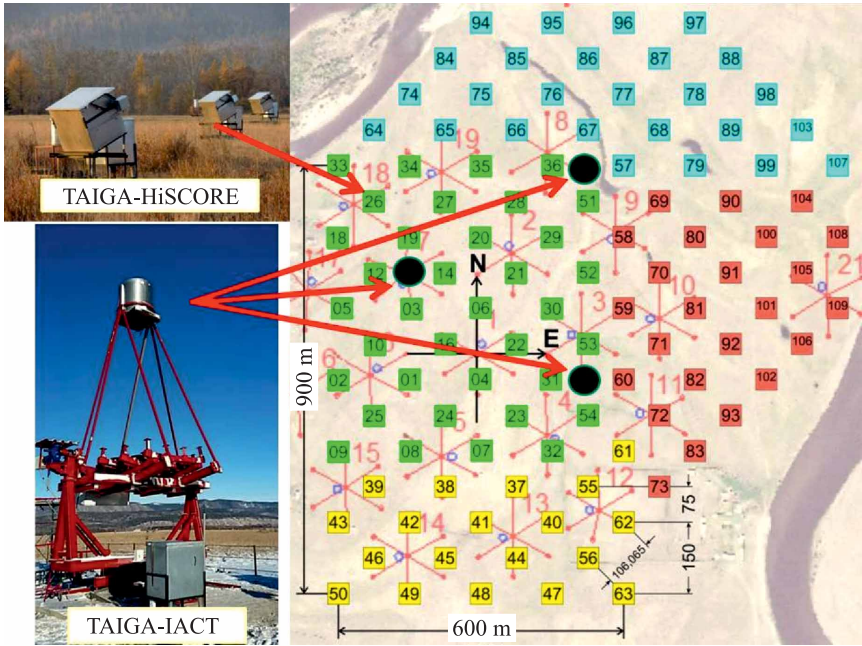


Рис. 12. План развития гамма-обсерватории TAIGA до 2019 г.

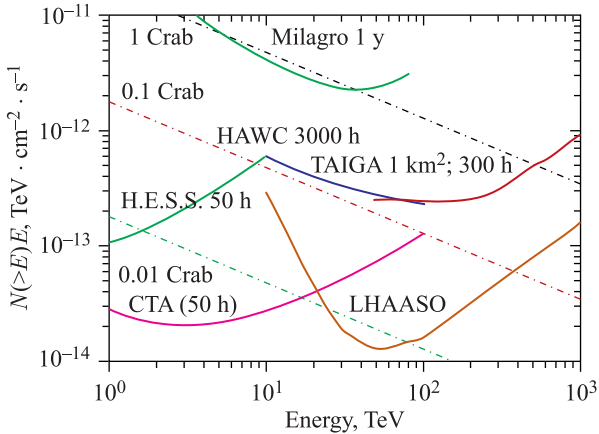


Рис. 13. Интегральная чувствительность гамма-обсерватории TAIGA

сти 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 (Mkr421).

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

TAIGA будет самой северной гамма-обсерваторией, 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 [30] и LHAASO [31], будет в поле зрения детекторов обсерватории TAIGA в течение 500 ч в год.

Благодарности. Работа поддержана контрактами Минобрнауки России (№ 14.В25.31.0010, № 3.9678.2017/8.9, № 3.904.2017/4.6, № 3.6787.2017/7.8, № 1.6790.2017/7.8), грантами РФФИ (№ 16-29-13035, № 16-02-00738, № 16-32-00329, № 17-02-00905) и грантом РНФ № 15-12-20022 (разд. 3). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП, поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.593.21.0005 от 25.08.2017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hillas M. In NASA. Goddard Space Flight Center // 19th Intern. Cosmic Ray Conf. 1985. V. 3. P. 445–448.
2. Tluczykont M., Hampf D., Horns D., Spitschan D., Kuzmichev L., Prosin V., Spiering C., Wischnewski R. // *Astropart. Phys.* 2014. V. 56. P. 42–53.
3. Budnev N., Chernov D., Gress O., Korosteleva E., Kuzmichev L., Lubsandorzhev B., Navarra G., Pankov L., Prosin V., Semeny Yu., Spiering C., Wischnewski R., Yashin I. // *Astropart. Phys.* 2013. V. 18. P. 50–52.
4. Antokhonov B. A., Besson D., Beregnev S. F., Budnev N. M., Chvalaev O. B., Chiavassa A., Gress O. A., Kalmykov N. N., Karpov N. N., Korosteleva E. E., Kozhin V. A., Kuzmichev L. A., Lubsandorzhev B. K., Lubsandorzhev N. B., Mirgazov R. R. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 639. P. 42.
5. Bezyazeev P. A., Budnev N. M., Gress O. A., Haungs A., Hiller R., Huege T., Kazarina Yu., Kleifges M., Konstantinov E. N., Korosteleva E. E., Kostunin D., Krömer O., Kuzmichev L. A., Lubsandorzhev N., Mirgazov R. R. // *JCAP.* 2016. V. 1601, No. 01. P. 052.
6. Monkhoev R. D., Budnev N. M., Chiavassa A., Dyachok A. N., Gafarov A. R., Gress O. A., Gress T. I., Grishin O. G., Ivanova A. L., Kalmykov N. N., Kazarina Yu. A., Korosteleva E. E., Kozhin V. A., Kuzmichev L. A., Lenok V. V. // *JINST.* 2017. V. 12, No. 06. P. C06019.

7. Gress O., Astapov I., Budnev N., Bezyazeekov P., Bogdanov A., Boreyko V., Brückner M., Chiavassa A., Chvalaev O., Dyachok A., Gress T., Epimakhov S., Fedoseev E., Gafarov A., Gorbunov N. // Nucl. Instr. Meth. A. 2017. V. 845. P. 367.
8. Porelli A., Bogorodskii D., Brückner M., Budnev N., Chvalaev O., Dyachok A., Epimakhov S., Eremin T., Gress O., Gress T., Horns D., Ivanova A., Kiruhin S., Konstantinov E., Korosteleva E. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 632, No. 1. P. 012041.
9. Berezhnev S. F., Budnev N. M., Gress O. A., Dyachok A. N., Epimakhov S. N., Zagorodnikov A. V., Kalmykov N. N., Karpov N. I., Kozhin V. A., Konstantinov E. N., Korobchenko A. V., Korosteleva E. E., Kuzmichev L. A., Chiavassa A., Lubsandorzhiiev B. K., Lubsandorzhiiev N. B. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2015. V. 79, No. 3. P. 344.
10. Berezhnev S. F., Besson D., Budnev N. M., Chiavassa A., Chvalaev O. A., Gress O. A., Dyachok A. N., Epimakhov S. N., Haungs A., Karpov N. I., Kalmykov N. N., Konstantinov E. N., Korobchenko A. V., Korosteleva E. E., Kozhin V. A. // Nucl. Instr. Meth. A. 2012. V. 692. P. 98.
11. Berezhnev S. F., Budnev N. M., Büker M., Brückner M., Wischniewski R., Gafarov A. V., Gress O. A., Gress T., Dyachok A. N., Epimakhov S. N., Zagorodnikov A. V., Zurbakov V. L., Kalmykov N. N., Karpov N. I., Konstantinov E. N. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2015. V. 79, No. 3. P. 348.
12. Porelli A., Wischniewski R., Garmash A., Astapov I., Bezyazeekov P., Boreyko V., Borodin A., Brueckner M., Budnev N., Chiavassa A., Dyachok A., Fedorov O., Gafarov A., Gorbovskey E., Gorbunov N. // 35th Intern. Cosmic Ray Conf. "ICRC2017", Bexco, Busan, Korea, July 10–20, 2017.
13. Kornilov V., Lipunov V., Gorbovskey E., Belinski A., Kuvshinov D., Tyurina N., Shatsky N., Sankovich A., Krylov A., Balanutsa P., Chazov V., Kuznetsov A., Zimnuhov D., Senik V., Tlatov A. // Exp. Astron. 2012. V. 33. P. 173.
14. Panov A. D., Adams J. H., Jr., Ahn H. S., Bashinzhagyan G. L., Watts J. W., Wefel J. P., Wu J., Ganel O., Guzik T. G., Zatsepin V. I., Isbert I., Kim K. C., Christl M., Kouznetsov E. N., Panasyuk M. I. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2009. V. 73, No. 5. P. 564–567.
15. Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V., Gorbunov N., Filippov S., Grebenyuk V., Karmannov D., Kovalev I., Kudryashov I., Kurganov A., Merkin M., Panov A., Podorozhny D., Polkov D., Porokhovoy S. // JCAP. 2017. V. 7. P. 20.