

ГИБРИДНЫЙ КОМПЛЕКС TAIGA-1: ОТ ФИЗИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ К ГАММА-АСТРОНОМИИ

Н. М. Буднев^{1,}, И. И. Астапов², П. А. Безъязыков¹,
А. В. Блинов³, Е. А. Бонвеч⁴, А. Н. Бородин³, А. В. Булан⁴,
Н. В. Волков⁵, П. А. Волчугов^{1,4}, Д. М. Воронин⁶,
А. Р. Гафаров¹, А. Ю. Гармаш^{7,8}, В. М. Гребенюк^{3,9},
О. А. Гресь¹, Т. И. Гресь¹, Е. О. Гресь¹, А. А. Гринюк³,
О. Г. Гришин¹, А. Н. Дячок¹, Д. П. Журов¹,
А. В. Загородников¹, В. Н. Зиракашвили¹⁰,
А. Д. Иванова^{1,11}, А. Л. Иванова^{1,7}, М. А. Илюшин¹,
Н. Н. Калмыков⁴, В. В. Киндин², С. Н. Кирюхин¹,
В. А. Кожин⁴, Р. П. Кокоулин², К. Г. Компаниец²,
Е. Е. Коростелева⁴, Е. А. Кравченко^{7,8}, А. П. Крюков⁴,
Л. А. Кузьмичев⁴, А. Кьявасса¹², М. В. Лаврова³,
А. А. Лагутин⁵, Ю. Е. Лемешев¹, Б. К. Лубсандоржиев⁶,
Н. Б. Лубсандоржиев^{1,4}, А. Д. Луканов⁶, С. Д. Малахов¹,
Р. Р. Миргазов¹, Р. Д. Монхоев^{1,7}, Э. А. Окунева^{1,4},
Э. А. Осипова⁴, А. Пан³, А. Д. Панов⁴, Л. В. Паньков¹,
А. Л. Пахоруков¹, А. А. Петрухин², Д. А. Подгрудков⁴,
И. А. Поддубный¹, Е. Г. Попова⁴, Е. Б. Постников⁴,
В. В. Просин⁴, А. А. Пушкин¹, Р. И. Райкин⁵,
А. Ю. Разумов^{1,4}, Г. И. Рубцов⁶, Е. В. Рябов¹,
И. Сатышев³, В. С. Самолига¹, Л. Г. Свешникова⁴,
А. Ю. Сидоренков⁶, А. А. Силаев⁴, А. А. Силаев (мл.)⁴,
А. В. Скурихин⁴, А. В. Соколов^{7,8}, В. А. Таболенко¹,
А. Б. Танаев¹, М. Ю. Терновой¹, Л. Г. Ткачев^{3,9},
Н. А. Ушаков⁶, Д. В. Чернов⁴, А. В. Шайковский³,
И. И. Яшин²*

¹ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

⁴ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

* E-mail: nbudnev@api.isu.ru

⁵ Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

⁶ Институт ядерных исследований РАН, Москва

⁷ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

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

⁹ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

¹⁰ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Троицк, Россия

¹¹ Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

¹² Generale Universiteta di Torino and INFN, Турин, Италия

Представлены преимущества и возможности гибридного комплекса установок TAIGA-1 для исследования потоков космических лучей с энергиями 0,1–1000 ПэВ и гамма-квантов с энергиями от 3 ТэВ до нескольких сотен ТэВ. Уже получены результаты исследований, намечены планы по дальнейшему развитию комплекса TAIGA.

The paper presents the advantages and possibilities of the TAIGA-1 hybrid complex for the study of cosmic rays with energies of 0.1–1000 PeV and gamma rays with energies from 3 TeV to several hundred TeV. Research results have already been obtained, and plans have been outlined for the further development of the TAIGA complex.

PACS: 98.70.Rz; 95.55.Ka

ВВЕДЕНИЕ

Прошло больше 100 лет со времени открытия В. Гессом ионизирующего излучения космического происхождения. За прошедшие годы изучены многие свойства этого излучения, получившего название «космические лучи». Достаточно хорошо исследован их энергетический спектр, простирающийся до энергии порядка 10^{20} эВ. Но до сих пор нет полного ответа на главные вопросы: в каких источниках рождаются космические лучи разных энергетических диапазонов и каковы механизмы ускорения в их источниках?

Основную долю регистрируемых космических лучей составляют ядра от водорода до железа, траектории которых искривляются галактическими и межгалактическими магнитными полями, в результате они «забывают» направление на источник, поэтому в последние годы активно развиваются исследования потоков нейтрино и гамма-квантов высоких энергий. Они рождаются в подобных процессах, но если от какого-то источника установка площадью 1 км^2 будет регистрировать один гамма-квант с энергией 30 ТэВ за 3 ч, то нейтринный детектор объемом 1 км^3 зарегистрирует от этого же источника одно нейтрино с такой энергией за 10 лет.

К настоящему времени основные результаты в области гамма-астрономии высоких энергий получены с помощью установок Whipple [1], HEGRA [2], H.E.S.S. [3], MAGIC [4] и VERITAS [5], включающих в себя

несколько так называемых Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACT). В русскоязычных публикациях для таких телескопов мы используем название «атмосферный черенковский телескоп» (АЧТ). В разных установках такие телескопы имеют составные зеркала диаметром от 4 до 28 м, в фокусе которых находятся камеры, регистрирующие отраженный от зеркал черенковский свет широких атмосферных ливней (ШАЛ). Выделение ШАЛ, порожденных гамма-квантами высоких энергий из адронного фона, происходит путем анализа свойств изображений ШАЛ в черенковском свете, в основном с использованием так называемых параметров Хилласа [6]. Для более точного восстановления направления оси ШАЛ и его энергии он должен быть зарегистрирован как минимум двумя телескопами, которые в действующих установках [3–5] расположены на расстоянии порядка 100 м друг от друга.

С помощью установок [3–5] к настоящему времени открыто свыше 250 источников гамма-квантов ТэВ-ных энергий, однако зарегистрированы только единичные фотоны с энергиями более 50 ТэВ, что объясняется тем, что из-за малых расстояний между телескопами эффективная площадь этих установок не превышает $0,1 \text{ км}^2$, в то время как для продвижения в область более высоких энергий нужны установки площадью, измеряемой квадратными километрами и даже десятками квадратных километров. Это является важной мотивацией для амбициозного проекта СТА [7], в рамках которого предполагается в том числе развертывание установки, включающей до 70 так называемых малых телескопов (Small Size Telescopes, SST), на площади до $4,5 \text{ км}^2$. К настоящему времени в область энергий выше 100 ТэВ продвинулись установки, в которых регистрируются заряженные частицы ШАЛ: Tibet-AS γ [8], HAWC [9], LHAASO [10], «Ковер-2» [34], однако создание крупномасштабных черенковских установок для решения задач гамма-астрономии сверхвысоких энергий не теряет своей актуальности.

Наиболее перспективным путем создания установок для продвижения в область ПэВ-ных энергий в гамма-астрономии площадью, измеряемой десятками квадратных километров, является гибридный подход, развиваемый в проекте TAIGA (Tunka Advanced Instrument for Gamma Astronomy and cosmic ray physics) [11, 12]. В этом проекте энергия, направление и положение оси ШАЛ восстанавливаются по данным массива относительно дешевых широкоугольных черенковских детекторов, а для подавления адронного фона, т. е. выделения порожденных гамма-квантами ШАЛ, используются свойства черенковских изображений ШАЛ, регистрируемых АЧТ, или число мюонов в ШАЛ. Важно, что при наличии информации об энергии и оси ШАЛ, определяемых по данным широкоугольной установки, для поиска порожденных гамма-квантами ШАЛ атмосферные черенковские телескопы могут находиться на больших расстояниях друг от друга. При таком подходе появляется возможность создания установки для регистрации гамма-квантов сверхвысоких энергий площадью десятки квадратных километров при разумных затратах.

Наибольший опыт по созданию широкоугольных черенковских установок для исследования космических лучей накоплен при создании ряда установок в составе Тункинского астрофизического комплекса, расположенного в 50 км от юго-западной оконечности озера Байкал. Это стало важным фактором для успешного создания пилотного комплекса TAIGA-1 с гибридной системой детекторов на площади $1,1 \text{ км}^2$.

ШИРОКОУГОЛЬНАЯ ЧЕРЕНКОВСКАЯ УСТАНОВКА TAIGA-HiSCORE

Начиная с 1993 г. в составе Тункинского астрофизического комплекса МГУ–ИГУ, расположенного в 50 км от юго-западной оконечности озера Байкал, был последовательно создан ряд широкоугольных черенковских установок («Тунка-4», «Тунка-13» [13], «Тунка-25» [14], «Тунка-133» [15]) для измерения время-амплитудных характеристик черенковского излучения ШАЛ и разработан комплекс методик для восстановления с высокой точностью параметров ШАЛ по этим данным [16, 17].

С использованием имеющегося опыта в составе комплекса TAIGA-1 создана широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity Cosmic Origin Explorer) [18, 19]. Она включает в себя 120 оптических станций, которые распределены на площади $1,1 \text{ км}^2$ с шагом 106 м. Для решения задач гамма-астрономии установка имеет более низкий по сравнению с предшествующими установками энергетический порог (100 ТэВ для ШАЛ от заряженных космических лучей и 50 ТэВ для ШАЛ от гамма-квантов), что достигнуто за счет включения в состав каждой станции четырех ФЭУ со светособирающими конусами Винстона и аналогового суммирования сигналов с этих ФЭУ. Для восстановления параметров ШАЛ разработаны модифицированные методики, использующие пространственно-временные характеристики черенковского света ШАЛ при меньших энергиях [20]. Установка позволяет измерять: направление оси ШАЛ с точностью $0,1\text{--}0,3^\circ$ (в зависимости от числа сработавших оптических станций); положение оси ШАЛ $\sim 5\text{--}10 \text{ м}$; энергию $\sim 10\text{--}15\%$; положение максимума ШАЛ $X_{\text{max}} \sim 20\text{--}25 \text{ г/см}^2$. Угол зрения станций $\sim 0,6 \text{ ср}$.

В результате обработки уже полученных с помощью установки TAIGA-HiSCORE экспериментальных данных восстановлены энергетический спектр (рис. 1) и массовый состав космических лучей (рис. 2). В области низких энергий полученный энергетический спектр хорошо согласуется с результатами спутниковых экспериментов, а также данными установки HAWC. Массовый состав при энергиях выше 1 ПэВ становится более тяжелым.

20 ноября 2020 г. из области источника в туманности Кокон созвездия Лебедь нейтринным телескопом IceCube было зарегистрировано нейтрино с энергией 150 ТэВ [22]. Ожидаемый поток гамма-квантов в этом случае обозначен черной звездочкой на рис. 3. С этого же направления

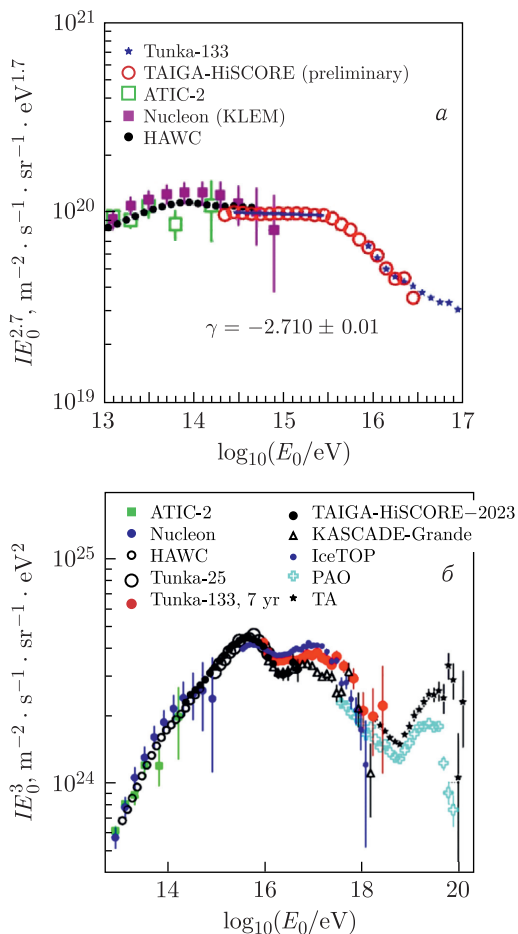


Рис. 1. а) Энергетический спектр космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE в сравнении с результатами некоторых других экспериментов [20]. б) Энергетические спектры, полученные на установках «Тунка-25», «Тунка-133» и TAIGA-HiSCORE, в сравнении с данными других экспериментов в широком диапазоне энергии [21]

в эксперименте «Ковер-2» (Баксанская нейтринная обсерватория) [23] было зарегистрировано резкое увеличение потоков фотонов с энергией более 300 ТэВ, на 4 порядка выше ожидаемого потока в этом диапазоне. В связи с этим был проведен анализ полученных на установке TAIGA-HiSCORE данных (18 ч за 13 сут наблюдения), близких по времени к максимуму гамма-вспышки, зафиксированной в эксперименте «Ковер-2», и времени обнаружения нейтрино в эксперименте IceCube. С учетом зарегистрированного в течение 18 ч наблюдения числа событий

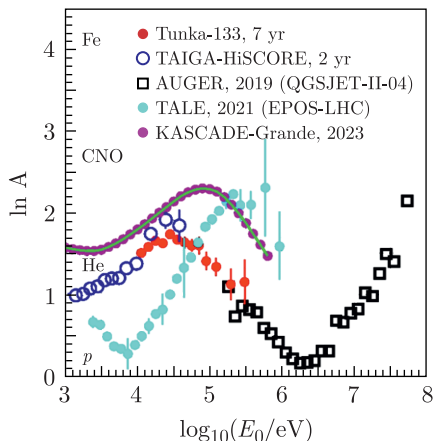


Рис. 2. Массовый состав космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE в сравнении с результатами некоторых других экспериментов

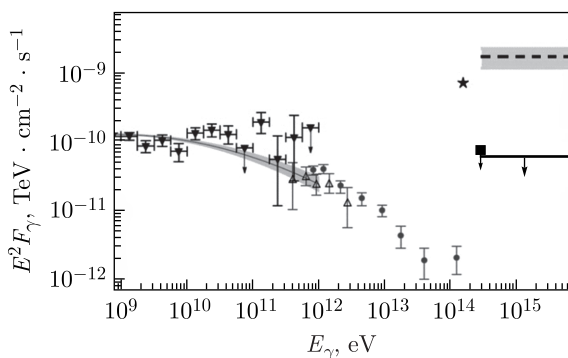


Рис. 3. Энергетический спектр гамма-излучения из области источника в туманности Кокон созвездия Лебедь, измеренный на различных установках. Серая линия — усредненная по времени модель потока 4FGL [24]; серые треугольники — данные эксперимента ARGO [25]; серые кружки — данные, полученные в эксперименте HAWC [26]; черные треугольники — вспышка, зарегистрированная Fermi-LAT [24]; черная штриховая полоса — γ -вспышка, зарегистрированная в эксперименте «Ковер-2» [23]; черный квадрат — ограничение для периода вне вспышки по данным установки «Ковер-2» [23]; черная звездочка — оценка потока из данных по нейтрину IceCube [22]; черная линия — верхний предел на поток вспышки в октябре 2020 г. по данным TAIGA-HiSCORE [27]

в направлении на источник получена оценка на верхний предел потока гамма-квантов с этого направления: $\text{Upperlimit } F(E)E^2 = ((\text{Excess} + 3,2\sigma)E^2)/(St) = 6 \cdot 10^{-11} \text{ ТэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, где E — энергия гамма-кванта, S — площадь установки в период измерений ($0,45 \text{ км}^2$), t — время наблюдения (18 ч). Доверительный интервал $3,2\sigma$ указывает на 90%-ю

вероятность регистрации сигнала от источника ниже указанного верхнего предела [23]. Полученное ограничение на поток частиц представлено на рис. 3 черной линией.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ ГАММА-КВАНТОВ С ПОМОЩЬЮ ЧЕРЕНКОВСКИХ УСТАНОВОК КОМПЛЕКСА TAIGA-1

Атмосферные черенковские телескопы комплекса TAIGA-1 [19] представляют собой телескоп-рефлекторы системы Дэвиса–Коттона, совокупная площадь их составных зеркал около $9,6 \text{ м}^2$, общий диаметр — $4,3 \text{ м}$, фокусное расстояние — $4,75 \text{ м}$. В фокусе зеркал трех телескопов установлены камеры на базе 600 оснащенных конусами Винстона ФЭУ ХР1911 диаметром 19 мм . Угол обзора камеры — $9,6^\circ$ (каждый пиксель имеет апертуру $0,36^\circ$).

Первые три АЧТ установлены в вершинах треугольника со сторонами около 300 , 400 и 500 м (рис. 4).

Выделение порожденных гамма-квантами ШАЛ из адронного фона осуществляется на основе результатов анализа свойств их изображений в черенковском свете, регистрируемых в камерах АЧТ. Для этого

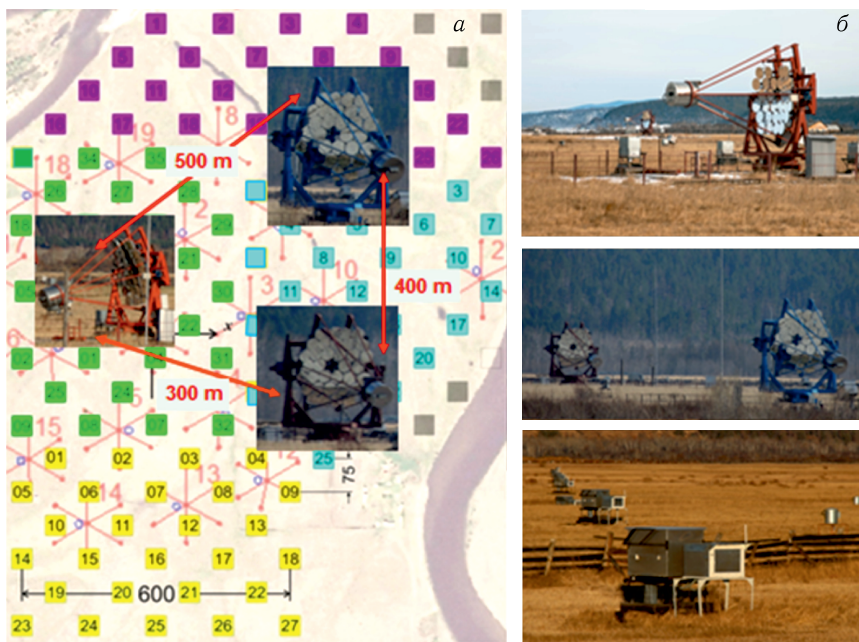


Рис. 4. Схема расположения (а) и внешний вид (б) трех АЧТ и оптических станций широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE комплекса TAIGA-1

используются параметры Хилласа: size, dist, width и т.д., значения которых определяются на основе результатов моделирования. Процедура обработки представлена в работах [28–30].

Для оценки фоновых событий и изучения систематики при наблюдении источников гамма-излучения используется специальный «гуляющий режим» (wobbling mode) [31]. В этом режиме АЧТ наводится не прямо на источник, а немного в сторону от него, со сменой направления через небольшие промежутки времени, одновременно измеряется число событий в направлении на источник $N_{\text{он}}$ и определяется фон (число событий $N_{\text{оф}}$ в направлении без источника), а также оцениваются возможные систематические ошибки.

Исследования потоков гамма-излучения с помощью черенковских установок комплекса TAIGA-1 ведутся в трех режимах.

1. Монорежим. В этом случае с помощью одного АЧТ ведется поиск избытка гамма-подобных ШАЛ в направлении, близком к направлению на тот или иной источник. Энергетический порог такого режима 2–3 ТэВ, подавление адронного фона 10^{-4} .

2. Стереорежим. В этом случае анализируются черенковские изображения ШАЛ, полученные с помощью двух и более АЧТ. Энергетический порог такого режима около 8 ТэВ, подавление адронного фона $5 \cdot 10^{-5}$.

3. Гибридный режим. В этом случае энергия, положение и направление оси ШАЛ восстанавливаются по данным установки TAIGA-NiSCORE, а для выделения порожденных гамма-квантами ШАЛ используются данные АЧТ об изображении ШАЛ в черенковском свете. Энергетический порог режима около 40 ТэВ.

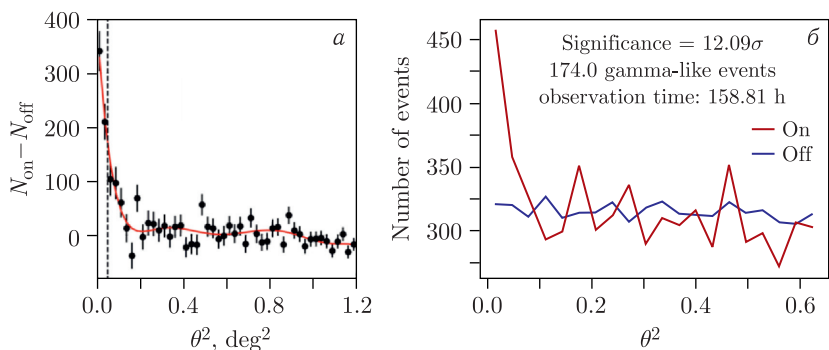


Рис. 5. а) Распределение разности числа зарегистрированных АЧТ-1 гамма-подобных ШАЛ в направлении на источник в Крабовидной туманности и фоном в зависимости от квадрата угла от θ^2 за 150 ч наблюдений в монорежиме; б) распределения гамма-подобных ШАЛ $N_{\text{он}}$ и $N_{\text{оф}}$, зарегистрированных в стереорежиме АЧТ-1 и АЧТ-2, в зависимости от θ^2 для источника в Крабовидной туманности

Первым объектом исследования в гамма-обсерватории TAIGA стал источник в Крабовидной туманности, который как калибровочный источник удобен для сравнения с результатами других экспериментов в перекрывающейся части энергетического спектра. На рис. 5, *а* приведено распределение разности числа зарегистрированных первым атмосферным черенковским телескопом (АЧТ-1) в монорежиме гамма-подобных ШАЛ в направлении на источник в Крабовидной туманности и фоном в зависимости от квадрата угла от направления на источник θ^2 . За 150 ч превышение числа гамма-подобных ШАЛ в направлении на источник в Крабовидной туманности составило 563 события, значимость 12σ [29]. На рис. 5, *б* приведены результаты измерения N_{on} и N_{off} гамма-подобных ШАЛ, зарегистрированных в стереорежиме АЧТ-1 и АЧТ-2, в зависимости от θ^2 для того же источника. За 159 ч превышение $N_{\text{on}} - N_{\text{off}}$ составило 174 события, значимость также 12σ . Выше 100 ТэВ зарегистрировано 12 событий.

На рис. 6 приведен энергетический спектр источника в Крабовидной туманности, включающий результаты восстановления спектра по данным АЧТ-1 и установки TAIGA-HiSCORE в составе 50 оптических станций в гибридном режиме.

Помимо основных задач в области гамма-астрономии АЧТ комплекса TAIGA позволяют при работе в гибридном режиме совместно с широкоугольной установкой TAIGA-HiSCORE исследовать массовый состав заряженных космических лучей. Для этого используются различия в черенковских изображениях ШАЛ, порожденных частицами легкой компоненты (протоны и гелий) и тяжелой компоненты первичных космических лучей. На рис. 7 представлено распределение по ширине изображений, зарегистрированных АЧТ и установкой TAIGA-HiSCORE, полученное в результате моделирования методом Монте-Карло гибридных событий.

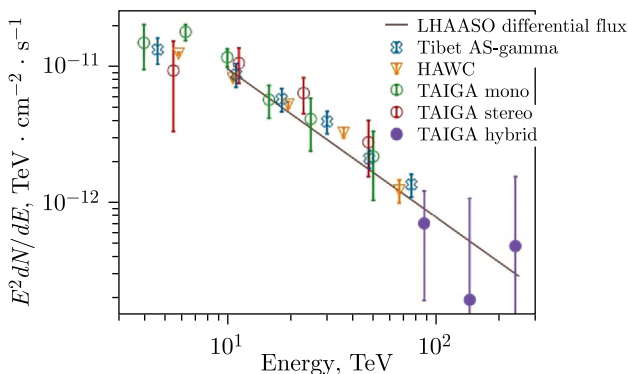


Рис. 6. Энергетический спектр источника в Крабовидной туманности, включающий результаты восстановления спектра по данным АЧТ-1 и установки TAIGA-HiSCORE в составе 50 оптических станций в гибридном режиме [32]

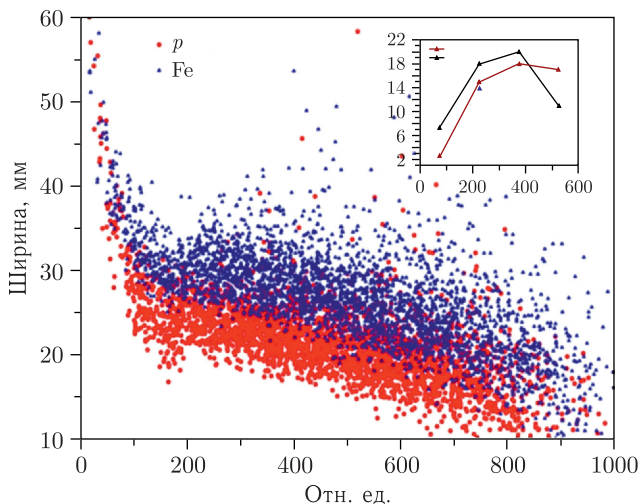


Рис. 7. Распределение по ширине зарегистрированных АЧТ изображений ШАЛ от протонов и железа по результатам моделирования методом Монте-Карло

Первые результаты применения гибридного метода показывают, что удастся определить поведение спектров легкой компоненты в области излома 200 ТэВ – 2 ПэВ. Анализ данных продолжается.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТА TAIGA

В 2024 г. планируется установить камеру на монтажку четвертого АЧТ комплекса TAIGA-1, а в 2025 г. — пятого. В результате эффективная площадь комплекса с пятью АЧТ при работе в стереорежиме приблизится к 1 км² при энергии выше 100 ТэВ (рис. 8).

Также в ближайшие два года планируется развернуть внешнее кольцо широкоугольных оптических станций установки TAIGA-HiSCORE, что позволит увеличить ее эффективную площадь до 1,5–2 км². Бу-

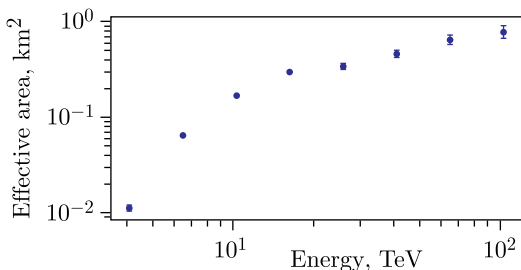


Рис. 8. Эффективная площадь комплекса TAIGA-1 с пятью АЧТ при работе в стереорежиме [33]

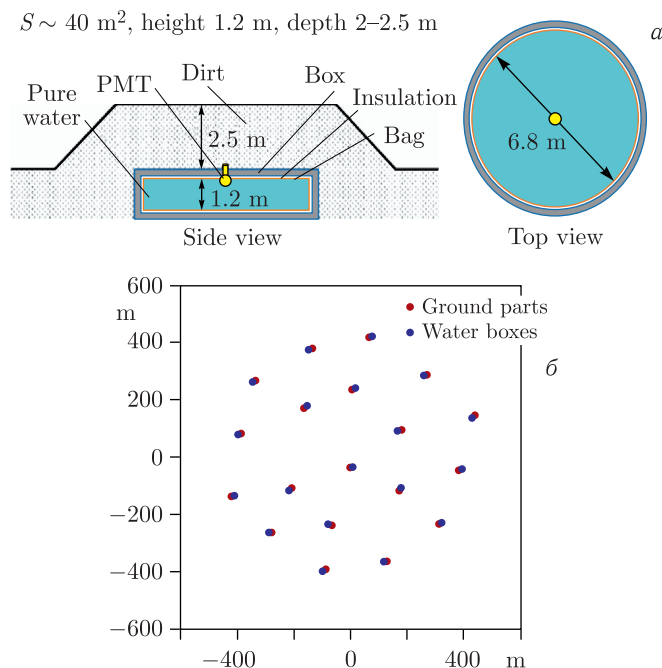


Рис. 9. а) Схематическое представление подземного водного черенковского детектора. б) Перспективная схема расположения детекторов в составе комплекса TAIGA-1

дет развернуто пять кластеров сцинтилляционных детекторов установки TAIGA-Muon, в каждом из которых будет по 16 подземных счетчиков мюонов площадью 1 м^2 и по четыре таких же наземных счетчика, что позволит увеличить точность восстановления массового состава космических лучей.

Еще одним важным направлением работы являются разработка проекта и создание экспериментальных подземных водных черенковских детекторов площадью порядка 40 м^2 каждый. На рис. 9, а показан проект такого детектора. По результатам моделирования методом Монте-Карло сеть из 19 детекторов (рис. 9, б) позволит при совместной работе с установкой TAIGA-HiSCORE подавить адронный фон как минимум в 100 раз при энергии протонов выше 1 ПэВ [33] и провести исследования с высокой чувствительностью одновременно большого числа источников гамма-излучения сверхвысоких энергий, лежащих в широком диапазоне углов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты первых лет работы комплекса TAIGA-1 экспериментально продемонстрировали перспективность заложенного в проект гибридного подхода к решению задач гамма-астрономии высоких энергий. Впер-

вые по черенковским данным как в рамках стерео-, так и гибридного подходов зарегистрировано гамма-излучение источника в Крабовидной туманности в области энергий выше 100 ТэВ. Наши результаты хорошо согласуются со спектром, полученным на установке LHAASO при регистрации заряженных частиц. Также комплекс TAIGA-1 позволяет исследовать с высокой точностью массовый состав космических лучей с энергией выше 200 ТэВ. Актуальность таких измерений связана с тем, что до настоящего времени сохраняются существенные противоречия в зависимости массового состава космических лучей от энергии, в то время как его знание очень важно для выбора адекватных моделей ускорения космических лучей и их источников.

В ближайшие несколько лет планируется дополнить действующий комплекс TAIGA-1 новыми детекторами, что позволит существенно повысить его чувствительность и точность измерений, а в последующем, опираясь на полученный в ходе создания и эксплуатации комплекса TAIGA-1 опыт, перейти к созданию комплекса TAIGA-100 с гибридной системой детекторов на площади до 100 км². Эта установка позволит в том числе перейти к гамма-астрономии ПэВ-ных энергий, у нее не будет в ближайшие десятилетия конкурентов в области энергии выше 1 ПэВ.

Финансирование. Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ–ИГУ». Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 23-72-00016 (разд. 2), 23-72-00019 (разд. 3)) и государственными заданиями Минобрнауки (FZZE-2023-0004, FZZE- 2024-0005).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weekes T. C., Cawley M. F., Fegan D. J. et al. // *Astrophys. J.* 1989. V. 342. P. 379.
2. Mirzoyan R. et al. (HEGRA Collab.) // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1994. V. 351. P. 513–526.
3. Aharonian F. et al. (H.E.S.S. Collab.) // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 457. P. 899–915.
4. Aleksić J. et al. (MAGIC Collab.) // *Astropart. Phys.* 2016. V. 72. P. 76–94.
5. Meagher K. (VERITAS Collab.) // *Proc. of the 33rd ICRC.* 2015. V. 34. P. 792.
6. Hillas A. M. // *Proc. of the 19th ICRC.* 1985. V. 3. P. 445.
7. Acharya B. S. et al. (CTA Consortium). World Sci. Publ., 2019; arXiv: 1709.07997; doi: 10.1142/10986.
8. Amenomori M. et al. (Tibet AS γ Collab.) // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 123. 051101.
9. Abeysekara A. U. et al. (HAWC Collab.) // *Astrophys. J.* 2019. V. 881. P. 134.
10. Zhen Cao (LHAASO Collab.) // *Astrophys. J. Suppl.* 2024. V. 271, No. 1. P. 25.
11. Kuzmichev L. et al. (TAIGA Collab.) // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2020. V. 952. P. 161830.

12. Budnev N. et al. (TAIGA Collab.) // Nucl. Instr. Meth. A. 2022. V. 1039. P. 167047.
13. Gress O. A. et al. (TUNKA Collab.) // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 1999. V. 75. P. 299–301.
14. Budnev N. M. et al. (TUNKA Collab.) // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2002. V. 66. P. 1563–1565.
15. Antokhonov B. A. et al. (TUNKA Collab.) // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 639. P. 42–45.
16. Budnev N. et al. (TUNKA Collab.) // Astropart. Phys. 2013. V. 50–52. P. 18–25.
17. Prosin V. et al. (TAIGA Collab.) // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 9. P. 1653–1659.
18. Gress O. et al. (TAIGA Collab.) // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 732. P. 290–294.
19. Budnev N. et al. (TAIGA Collab.) // J. Instrum. 2020. V. 15, No. 09. P. C09031.
20. Prosin V. V. et al. (TAIGA Collab.) // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2023. V. 87. P. 1043–1045.
21. Vaidyanathan A. (TAIGA Collab.) // PoS. ICRC2023. 2023. V. 444. P. 269.
22. IceCube Collab. // GRB Coordinates Network, Circular Service. 2020. V. 28927, No. 1.
23. Dzhappuev D. D. et al. // Astrophys. J. Lett. 2021. V. 916. P. L22.
24. Ackermann M. et al. (Fermi Collab.) // Science. 2012. V. 334. P. 6059.
25. Bartoli B. et al. (ARGO-YBJ Collab.) // Astrophys. J. 2014. V. 790. P. 152.
26. Abeyssekara A. et al. (HAWC Collab.) // Nature Astron. 2021. V. 5. P. 465–471.
27. Окунева Э. и др. (колл. TAIGA) // ЯФ. 2024. Т. 87, № 3. С. 162–169.
28. Budnev N. et al. (TAIGA Collab.) // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83, No. 6. P. 842–852.
29. Sveshnikova L. et al. (TAIGA Collab.) // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2023. V. 87. P. 904–909.
30. Volchugov P. et al. (TAIGA Collab.) // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86, No. 4. P. 483–488.
31. Fomin V. P. et al. // Astropart. Phys. 1994. V. 2. P. 137–150.
32. Elshoukrofy A. S. M. et al. (TAIGA Collab.) // PoS. ICRC2023. 2023. V. 444. P. 685.
33. Volchugov P. et al. (TAIGA Collab.) // Ibid. P. 686.
34. Dzhappuev D. D. et al. // Proc. of the 30th ICRC. 2007. V. 4. P. 19.