

УДК 524.1

TAIGA – КОМПЛЕКС УСТАНОВОК С ГИБРИДНОЙ СИСТЕМОЙ СОВМЕСТНО РАБОТАЮЩИХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ГАММА-АСТРОНОМИИ И ФИЗИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЕ

© 2019 г. Н. М. Буднев^{1, *}, И. И. Астапов³, П. А. Безъязыков¹, А. Н. Бородин⁴, Р. Вишневский⁵, А. Ю. Гармаш^{6, 7}, А. Р. Гафаров¹, Н. В. Горбунов⁴, В. М. Гребенюк⁴, О. А. Гресс¹, Т. И. Гресс¹, А. А. Гринюк⁴, О. Г. Гришин¹, А. Н. Дячок¹, Д. П. Журов¹, А. В. Загородников¹, В. Л. Зурбанов¹, А. Л. Иванова¹, Ю. А. Казарина¹, Н. Н. Калмыков², Н. И. Карпов², В. В. Киндин³, П. С. Кириленко⁶, С. Н. Кирюхин¹, В. А. Кожин², Р. П. Кокоулин³, К. Г. Компаниец³, Е. Е. Коростелева², Е. А. Кравченко^{6, 7}, Л. А. Кузьмичев^{1, 2}, М. Куннас⁸, А. Кьявасса⁹, А. А. Лагутин¹⁰, В. В. Ленок¹, Б. К. Лубсандоржиев¹¹, Н. Б. Лубсандоржиев², Р. Р. Миргазов¹, Р. Мирзоян¹², Р. Д. Монхоев¹, Р. Нахтигал⁷, Э. А. Осипова², М. И. Панасюк², Л. В. Паньков¹, А. Л. Пахоруков¹, А. А. Петрухин³, В. А. Полещук¹, М. Попеску¹³, Е. Г. Попова², А. Порелли⁵, Е. Б. Постников², В. В. Просин², В. С. Птускин¹⁴, А. А. Пушкин¹, Р. И. Райкин¹⁰, Г. И. Рубцов¹¹, Я. И. Сагань⁴, В. С. Самолига¹, Л. Г. Свешникова², А. Ю. Сидоренков¹¹, А. А. Силаев², А. А. Силаев (мл.)², А. В. Скурихин², М. Слунечка⁴, А. В. Соколов^{6, 7}, В. П. Сулаков², В. А. Таболенко¹, А. Б. Танаев¹, Б. А. Тарашанский¹, Л. Г. Ткачев⁴, А. В. Ткаченко⁴, М. Тлужиконт⁸, О. Л. Федоров¹, Д. Хорнс⁸, К. Шпиринг⁵, И. И. Яшин³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский государственный университет", Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелевича, Москва, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

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

⁵Немецкий электронный синхротрон (DESY), Гамбург, Германия

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

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

⁸Университет Гамбурга, Институт экспериментальной физики, Гамбург, Германия

⁹Туринский университет, Турин, Италия

¹⁰Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный университет", Барнаул, Россия

¹¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

¹²Институт Макса Планка, Мюнхен, Германия

¹³Институт космических наук, Бухарест, Румыния

¹⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

В статье описывается актуальность и преимущества новой гамма-обсерватории TAIGA, создаваемой в Тункинской долине в 50-ти км от оз. Байкал. Основная задачи гамма-обсерватории TAIGA – исследование высокоэнергетической части спектра гамма-излучения и поиск Галактических ПэВатронов. К 2019 г. построена первая очередь гамма-обсерватории площадью 1 км², ее ожидаемая ин-

тегральная чувствительность для регистрации гамма-излучения с энергией 100 ТэВ при наблюдении в течение 300 ч за источником будет составлять $(2-5) \cdot 10^{-13}$ ТэВ см⁻² · с⁻¹. В дальнейшем планируется увеличить эффективную площадь гамма-обсерватории TAIGA до 10 км².

DOI: 10.1134/S0367676519080106

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени наиболее значимые результаты в гамма-астрономии высоких энергий получены с помощью установок, включающих в себя от 2 до 5 т. н. Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT) с диаметром составного зеркала от 4 до 28 м и многоканальными камерами, регистрирующими изображение черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ). Для достоверного восстановления параметров ШАЛ и определения природы породившей его частицы, ШАЛ должны регистрироваться несколькими IACT (стереоскопический режим), поэтому в существующих установках они расположены на расстоянии порядка 100 м друг от друга. Высокая стоимость установок на базе IACT с площадью, измеряемой квадратными километрами, необходимой для исследования высокоэнергетической части спектра гамма-излучения, сдерживает их создание.

В последние годы в Тункинской долине в 50 км от оз. Байкал в рамках проекта по созданию гамма-обсерватория TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) с гибридной системой совместно работающих детекторов развивается принципиально новый подход к исследованиям гамма-излучения сверхвысоких энергий. Основная его особенность состоит в том, что прецизионное восстановление энергии, положения и направления оси ШАЛ осуществляется по данным о пространственно-временных характеристиках черенковских импульсов ШАЛ, которые измеряются с помощью сети широкоугольных детекторов установки TAIGA-HiSCORE [1]. При наличии такой информации выделение гамма-квантов из адронного фона возможно с помощью только одного IACT, т.е. в монорежиме, поэтому расстояние между дорогостоящими IACT может быть увеличено, как минимум, до 600 м, а возможно и до 1000 м.

1. ШИРОКОУГОЛЬНАЯ ЧЕРЕНКОВСКАЯ УСТАНОВКА TAIGA-HiSCORE

Каждая оптическая станция установки TAIGA-HiSCORE включает в себя два контейнера. В одном из них (черенковском) расположены 4 фотоэлектронных умножителя (ФЭУ) с диаметром фотокатода 20 или 25 см (ET9352KB, R5912 и R7081). Каждый ФЭУ снабжен конусом Винстона, изготовленным из зеркального материала, что увеличивает эффективную площадь светосбора в

4 раза. Угол обзора конуса $\pm 30^\circ$ (~ 0.6 стер). Аналоговые сигналы с анодов и с 5-ого динода каждого ФЭУ (для расширения динамического диапазона) передаются во второй расположенный рядом "электронный контейнер", где происходит их суммирование, оцифровка и предварительный отбор по заданным критериям. 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 включает два уровня: электронику сбора данных оптических станций, которая находится в термостабилизированных контейнерах, расположенных рядом с черенковскими контейнерами, и центральную электронику кластера, расположенную в геометрическом центре кластера. Каждая оптическая станция соединена с центральной электроникой кластера оптическим кабелем, по которому происходит передача данных и синхронизация. Последняя осуществляется с субнаносекундной точностью с помощью гибридной системы, которая объединяет систему традиционной синхронизации на частоте 100 МГц и White Rabbit Ethernet-based временную систему [2], она обеспечивает привязку к центральным часам на базе GPS-disciplined Rubidium Oscillator (GPSDO) с точностью порядка 0.2 нс.

В течение зимнего сезона 2017–2018 гг. в измерениях участвовало 43 оптических станции первого кластера установки TAIGA-HiSCORE, распределенных на площади 0.4 км² в узлах регулярной сетки с расстоянием между станциями 106 м.

Восстановление параметров ШАЛ по данным установки TAIGA-HiSCORE проводится с помощью методик и алгоритмов, разработанных для обработки данных установки Tunka-133 [3, 4]. 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 с точностью около 15%. Угловое разрешение около 0.10° для событий с более чем 10 сработавшими станциями. Это было проверено при регистрации света от лидера, установленного на МКС [5].

2. УСТАНОВКА TAIGA-IACT

Телескопы установки TAIGA-IACT представляют собой телескоп-рефлекторы системы Дэви-

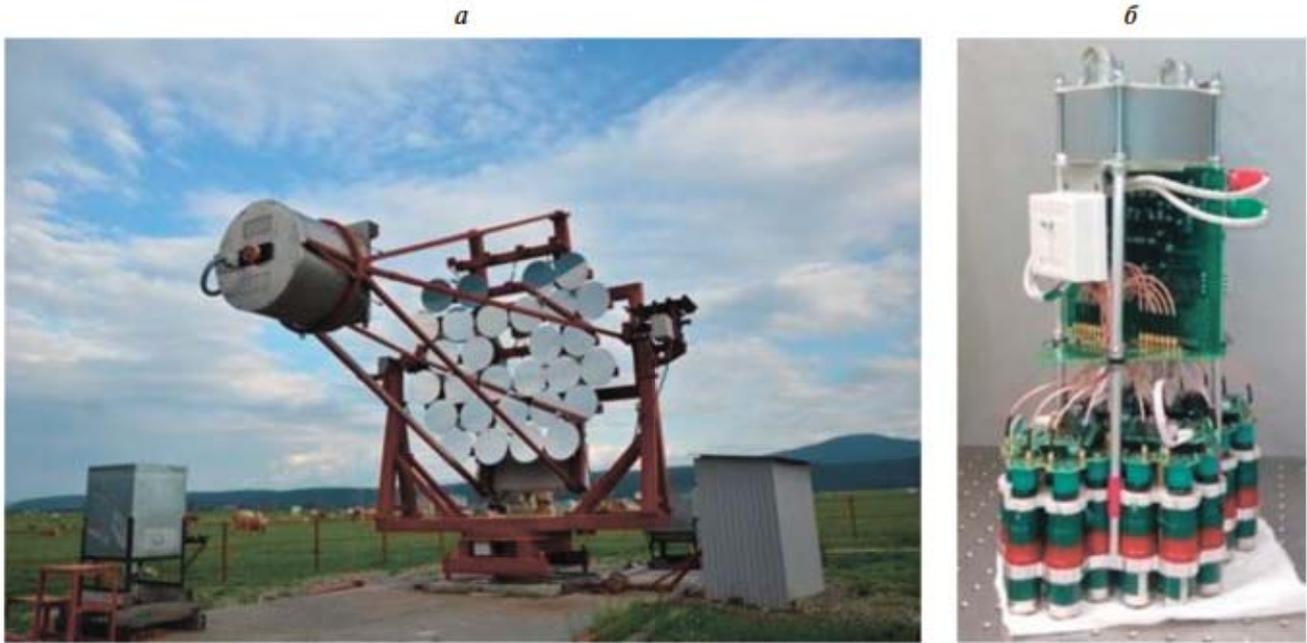


Рис. 1. Первый АТЧ в гамма-обсерватории TAIGA (а), кластер ФЭУ камеры АЧТ установки TAIGA-IACT (б).

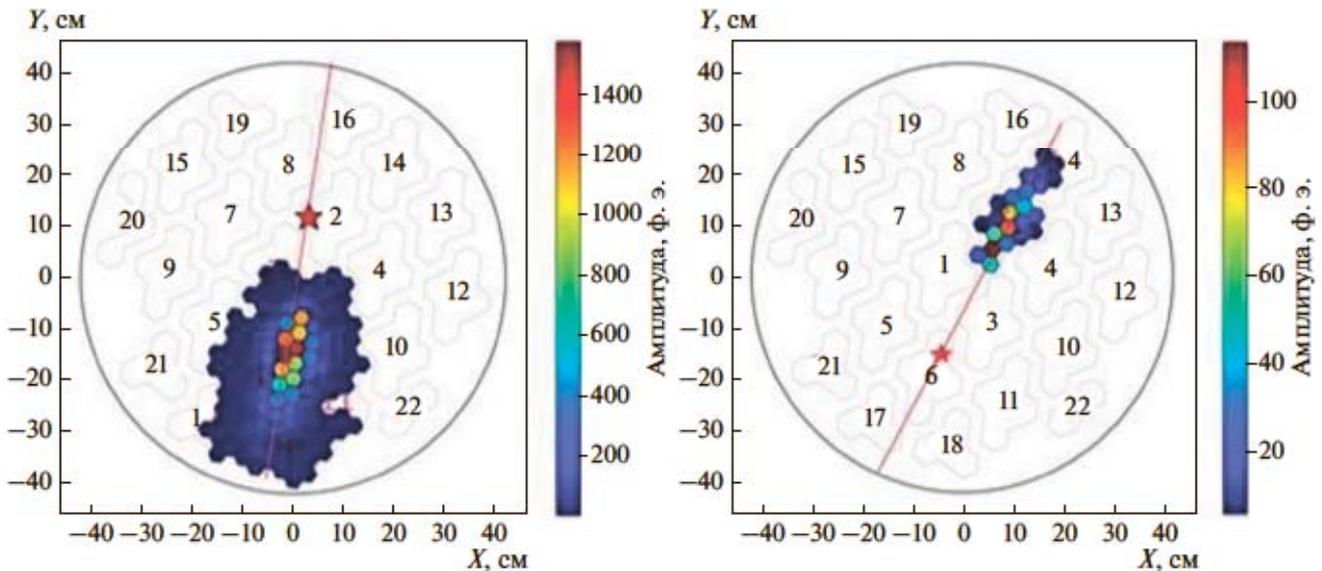


Рис. 2. Черенковские изображения ШАЛ: слева – алронно-подобное событие с параметрами: число сработавших пикселей – 124, сайз – 18500 ф. э, ширина – 0.38° , альфа – 11.2° , справа – гамма-подобное событие с параметрами: число сработавших пикселей – 23, сайз – 709 ф. э, ширина – 0.18° , альфа – 8.8° . Линии и звездочка – направление и положение оси ШАЛ, восстановленные по данным установки TAIGA-HiSCORE и пересчитанные в систему координат камеры телескопа.

са–Коттона (рис. 1а) Совокупная площадь составного зеркала около 10 м^2 , общий диаметр – 4.32 м, фокусное расстояние – 4.75 м. Для защиты от обмерзания все зеркала обдуваются подогретым воздухом. В фокусе зеркал телескопа установлена камера с углом обзора 9.72° , в которой черенковский свет ШАЛ регистрируется с помощью матрицы ФЭУ. Общий диаметр камеры около 110 см. Все 560 ФЭУ XP1911 камеры разделены на

кластеры, в каждом кластере 4 группы по 7 ФЭУ (рис. 1б), имеющих единую плату делителей и единый высоковольтный источник питания. Группы кластера объединяются одной кросс-платой, на которой установлен 64-х канальный блок оцифровки импульсов на основе специализированной интегральной микросхемы ASIC MAROC-3.

В течение зимнего сезона измерений 2017–2018 гг. установками TAIGA-HiSCORE и

TAIGA-IACT зарегистрировано больше 10 тысяч совместных событий, в том числе больше 300 событий в угле с раствором 0.7° относительно направления на Крабовидную туманность. Характеристики черенковского изображения большинства этих событий соответствуют ожидаемым для порожденных адронами ШАЛ (рис. 2а), но некоторые события, вероятно, связаны с гамма-квантами (рис. 2б).

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 км^2 , и 3 IACT. Ожидаемая интегральная чувствительность этого комплекса для регистрации гамма-излучения с энергией 100 ТэВ при наблюдении в течение 300 ч за источником будет примерно $2 \cdot 5 \cdot 10^{-13} \text{ ТэВ} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что выше, чем чувствительность эксплуатируемых и планируемых установок в этой области сверхвысоких энергий. В дальнейшем планируется увеличить эффективную площадь гамма-обсерватории TAIGA до 10 км^2 , количество оптических станций

установки TAIGA-HiSCORE до 1000, IACT до 16, а также развернуть 3000 м^2 подземных детекторов мюонов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (гос. задания 3.9678.2017/БЧ, 3.904.2017/ПЧ, 3.6787.2017/ИТР, 1.6790.2017/ИТР), РФФИ (проекты №№ 16-02-00738, 17-02-00905, 18-32-00460, 16-29-13035). Работа выполнена с использованием оборудования ТАЦКП в рамках выполнения соглашения с Министерством науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор RFMEFI59317X0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tluczykont M., Hampf D., Horns D. et al. // Astropart. Phys.* 2014. V. 56. P. 42.
2. *Porelli A., Bogorodskii D., Brückner M. et al. // J. Phys. Conf. Ser.* 2015. V. 632. Art. № 012041.
3. *Berezhnev S.F., Besson D., Brückner M. et al. // Nucl. Instr. Meth. Sec. A.* 2012. V. 692. P. 98.
4. *Бережнев С.Ф., Буднев Н.М., Бюкер М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 3. С. 381; *Berezhnev S.F., Budnev N.M., Büker M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. № 3. P. 348.
5. *Wischniewski R., Porelli A., Garmash A. et al. // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017).* P. 574.