

Энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности по данным астрофизического комплекса TAIGA в гибридном режиме наблюдений

Э.А. Окунева^{1,2*} от коллаборации TAIGA

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 02.06.2023; подписана в печать 28.08.2023)

Астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy) расположен в Тункинской долине на расстоянии 50 км от озера Байкал и предназначен для решения задач гамма-астрономии и физики космических лучей высоких энергий. Комбинированная работа (гибридный подход) атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) установки TAIGA-IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) и широкоугольных черенковских детекторов установки TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) нацелена на регистрацию гамма-квантов с энергиями более 40 ТэВ. По данным установки TAIGA-HiSCORE посредством амплитудно-временного анализа восстанавливается информация о направлении прихода ШАЛ и энергия первичной частицы, а также с помощью анализа полученного изображения в камере телескопа от черенковского света выделяются события от гамма-квантов из адронного фона с высокой точностью. В работе приводится описание методики восстановления параметров широких атмосферных ливней (ШАЛ), индуцированных гамма-квантами высоких энергий, результаты обработки экспериментальных данных наблюдения источника Крабовидная туманность (за 3 сезона в период 2019–2022 гг., более 150 ч наблюдений), полученных гибридным методом.

PACS: 96.50.S

УДК: 524.1

Ключевые слова: космические лучи, ШАЛ, гамма-астрономия, атмосферные черенковские телескопы.

ВВЕДЕНИЕ

Гамма-астрономия является перспективной областью исследований галактических и внегалактических источников гамма-излучения. Современные исследования показывают, что галактические объекты, такие как Крабовидная туманность, способны генерировать излучение с энергиями выше 100 ТэВ (HAWC [1], Tibet [2]). Это говорит о том, что в подобных объектах могут ускоряться протоны вплоть до энергий ПэВ и существующая теория происхождения галактических космических лучей обретает экспериментальное обоснование.

Однако до настоящего времени гамма-кванты с энергиями выше 100 ТэВ детектируются только наземными обсерваториями, регистрирующими заряженную компоненту ШАЛ. Это объясняется тем, что подобные инструменты способны проводить наблюдения независимо от погодных условий и времен года. Обсерватории, регистрирующие черенковское излучение ШАЛ, способны работать только в ясные безлунные ночи и для накопления существенной статистики необходимо иметь высокую эффективную площадь. Данная задача успешно решается в гамма-обсерватории TAIGA [3, 4].

1. ГАММА-ОБСЕРВАТОРИЯ TAIGA

В настоящее время на площади $\sim 1 \text{ км}^2$ в состав Астрофизического комплекса TAIGA [5] (рис. 1) входит три атмосферных черенковских телескопа установки TAIGA-IACT [6] (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope), 120 широкоугольных черенковских детекторов установки TAIGA-HiSCORE [7, 8] (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) и другие установки.

Для покрытия всего доступного для наблюдения энергетического диапазона, в эксперименте TAIGA используются три режима регистрации черенковского излучения ШАЛ: моноскопический, стереоскопический и гибридный (рис. 2).

Моноскопический режим применяется для регистрации гамма-квантов с энергиями более 2 ТэВ только одним АЧТ. Такой подход используется для детектирования более слабых источников, доступных для наблюдения в TAIGA. Для детектирования гамма-квантов с энергиями выше 8 ТэВ возможно применение стереоскопического подхода — ШАЛ регистрируется двумя и более АЧТ установки TAIGA-IACT.

Гибридный подход заключается в использовании совместных данных, полученных с помощью установок TAIGA-IACT и TAIGA-HiSCORE. Данный метод является уникальным для современных гамма-экспериментов и нацелен на регистрацию гамма-квантов с энергиями более 40 ТэВ. Восстановление энергии первичной частицы, направление и положе-

* lina.okuneva.97@mail.ru

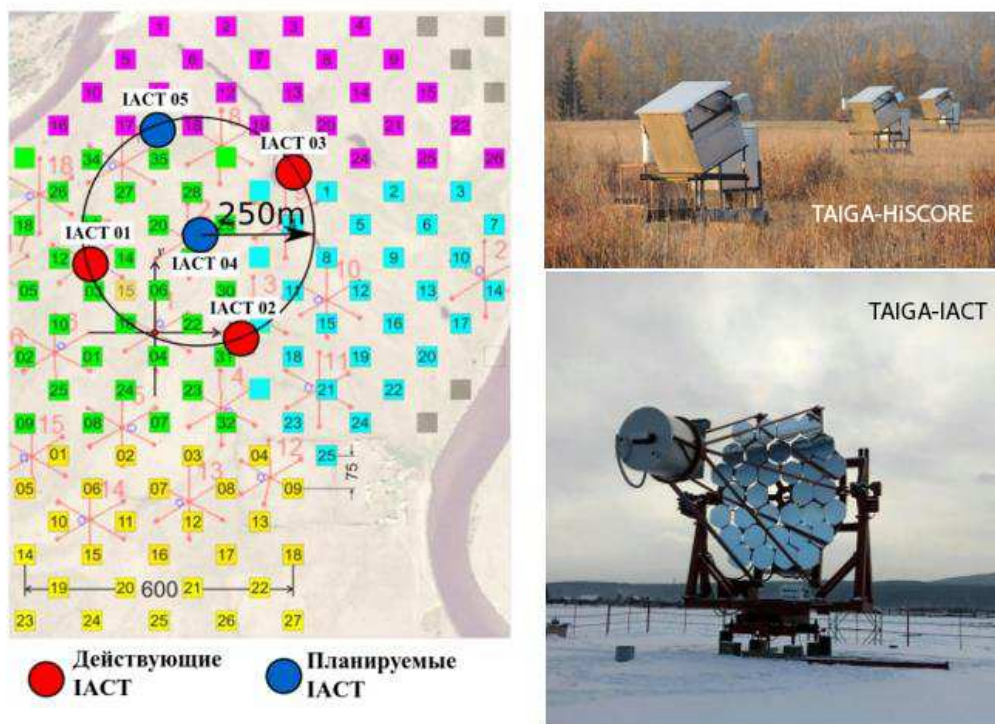


Рис. 1. Гамма-обсерватория TAIGA

2. УСТАНОВКА TAIGA-HISCORE

Установка TAIGA-HiSCORE (рис. 3) — это сеть из 120 широкоугольных черенковских детекторов (станций), расположенных на площади 1.1 км², сгруппированных в 4 кластера и предназначенных для регистрации черенковского излучения ШАЛ. Расстояние между детекторами составляет 106 м.

Каждая оптическая станция включает в себя 2 контейнера. Первый содержит 4 фотоэлектронных умножителя (ФЭУ) диаметром 20 см (ET 9352 и Hamamatsu R5912), оснащенные конусом Винстона диаметром 0.4 м и углом обзора 30°, для увеличения площади светосбора в 4 раза. Во второй контейнер передаются аналоговые сигналы с анодов и пятого динода каждого ФЭУ, где происходит суммирование, оцифровка и отбор сигналов. Сигналы с промежуточных динодов и анодов оцифровываются с шагом 0.5 нс, после чего восстанавливаются параметры ШАЛ: направление прихода ШАЛ и энергия первичной частицы.

При срабатывании 4 станций, точность восстановления направления прихода ШАЛ составляет 0.4°–0.5° [9]. Энергетический порог установки при этом составляет ~40 ТэВ. В случае срабатывания 10 и более станций, точность восстановления положения источника составляет ~0.1°.

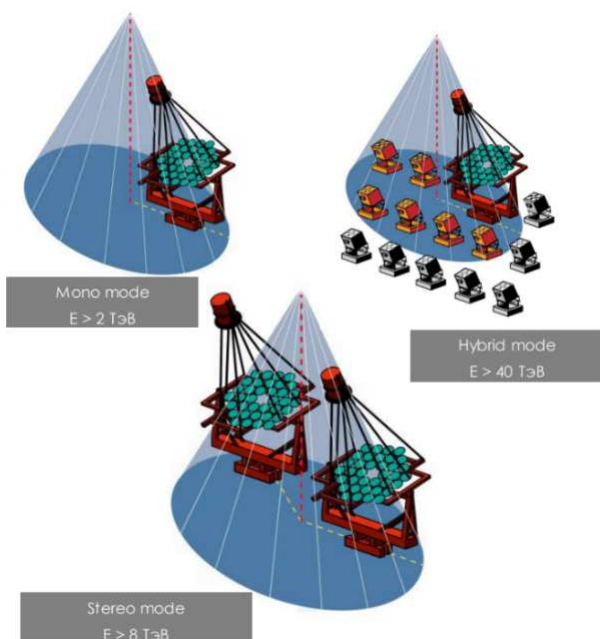


Рис. 2. Режимы регистрации ШАЛ в эксперименте TAIGA

ние оси ШАЛ проводится посредством анализа данных установки TAIGA-HiSCORE. Для определения типа первичной частицы, породившей ШАЛ, используются данные установки TAIGA-IACT [5].



Рис. 3. Оптические станции установки TAIGA-HiSCORE

3. УСТАНОВКА TAIGA-IACT

Выделение первичных гамма-квантов высоких энергий методами наземной гамма-астрономии требует решения задачи гамма-адронного разделения с очень высокой точностью. С этой задачей достаточно хорошо справляются атмосферные черенковские телескопы.

Каждый АЧТ установки TAIGA-IACT (рис. 4) имеет альт-азимутальное крепление, отражатель диаметром 4.3 м и регистрирующую камеру в фокусе. Отражатель состоит из отдельных сферических зеркал системы Дэвиса–Коттона площадью $\sim 10 \text{ м}^2$ и фокусным расстоянием 4.75 м [10]. Дополнительно каждый телескоп оборудован CCD камерой для контроля положения телескопа во время наблюдений [11].

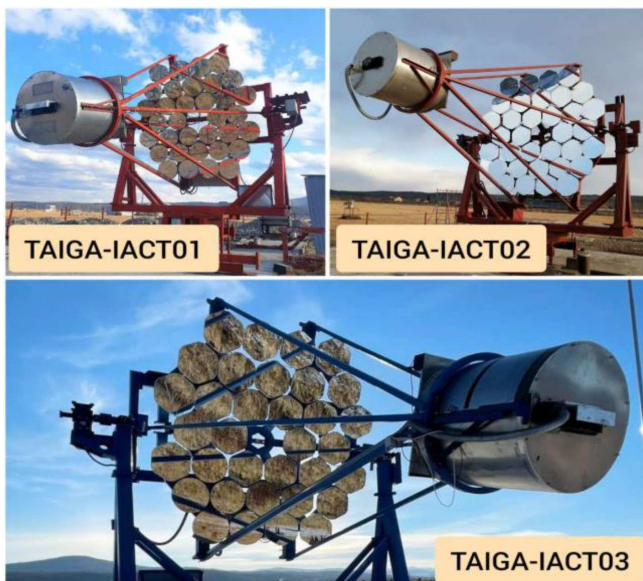


Рис. 4. Атмосферные черенковские телескопы установки TAIGA-IACT

Камеры телескопов обеспечивают угловой обзор 9.6° и включают в себя матрицы, состоящие из ~ 600

ФЭУ (пикселей) с диаметром фотокатода 2 см каждый (XP1911). Каждый пиксель обладает угловым размером 0.36° и оснащен конусом Винстона, увеличивающим площадь светосбора в ~ 4 раза [12]. Пиксели сгруппированы в минимальные структурные единицы камеры — кластеры. Каждая камера содержит 22 кластера, большая часть из которых включает 28 ФЭУ. Помимо пикселей, каждый кластер так же включает в себя плату обработки сигналов на основе 64-канальной микросхемы ASIC MAROC3, 4 платы делителей высокого напряжения, 4 высоковольтных источника питания, вспомогательную плату с разъемами, ЦАП для управления высоким напряжением и АЦП для измерения анодных токов ФЭУ.

3.1. Реконструкция событий установки TAIGA-IACT

Обработка данных установки TAIGA-IACT состоит из следующих этапов:

1. Восстановление амплитудной матрицы $A_m(X_i, Y_i)$ (X_i, Y_i — пиксельные координаты): вычитание значений пьедестала в каждом пикселе, пересчет амплитудных значений токов в фотоэлектронны, введение поправок на чувствительность ФЭУ.
2. Процедура Cleaning — очистка черенковского изображения ШАЛ в камере телескопа от пикселей, амплитуда сигнала в которых связана с флуктуациями светового фона.
3. Процедура Wobbling [13]. Данная методика применяется для слежения за источником и одновременной оценки количества фоновых событий.
4. Удаление пикселей со звездой. При попадании яркой звезды в пиксель камеры, происходит повышение тока ФЭУ, в результате чего данный пиксель не участвует в выработке триггера.
5. Расчет параметров Хилласа (параметров черенковского изображения ШАЛ).

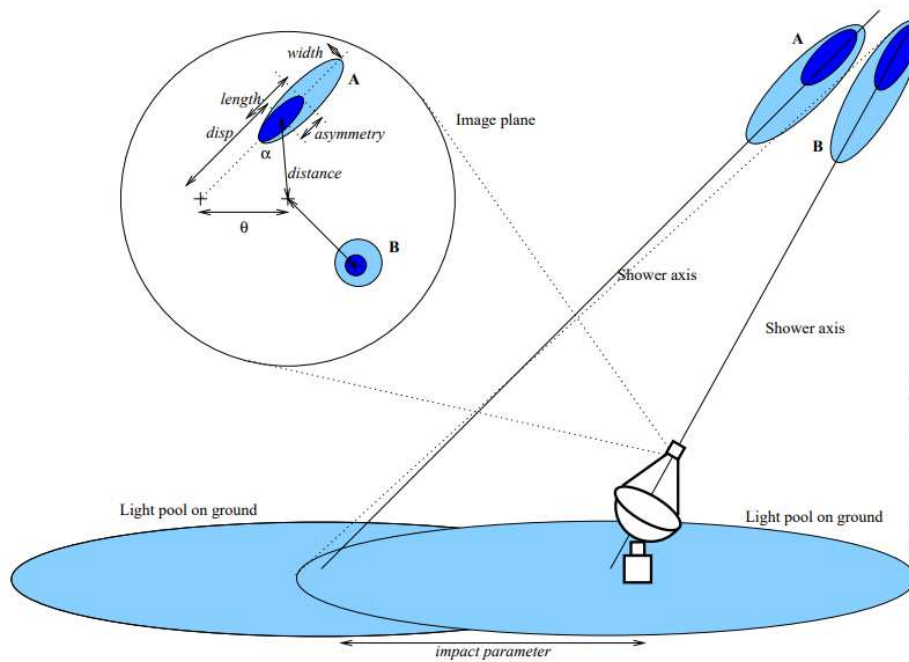


Рис. 5. Параметры Хилласа, используемые для оценки изображения [15]

Выделение событий, порождаемых гамма-квантами высоких энергий, осуществляется на основе анализа формы черенковского изображения ШАЛ по методике, предложенной Хилласом [14] (рис. 5). В зависимости от типа первичной частицы, полученные изображения в камере телескопа имеют разную форму, что позволяет с помощью моделирования получать ограничения на параметры Хилласа, которые используются для выделения гамма-квантов на адронном фоне.

4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Наблюдение источника Крабовидная туманность ($RA = 83.63^\circ$, $DEC = 22.01^\circ$) установками обсерватории TAIGA проводилась в течении трех сезонов в период с 2019 по 2022 гг. Полное время наблюдения составило ~ 250 ч, из которых ~ 200 ч были отобраны как совместные события в окне совпадения 3000 нс. На рис. 6 представлено распределение по углам RA и DEC, восстановленных по данным установки TAIGA-HiSCORE, для гибридных событий. Среднее значение распределения совпадает с положением источника.

Для выделения гамма-подобных событий по данным TAIGA-IACT используются следующие параметры:

1. *Dist* — расстояния от центра эллипса до точки, в которой расположен источник и анти-источник (фоновая точка);
2. *Width* — мера среднеквадратичного отклонения вдоль малой оси эллипса;

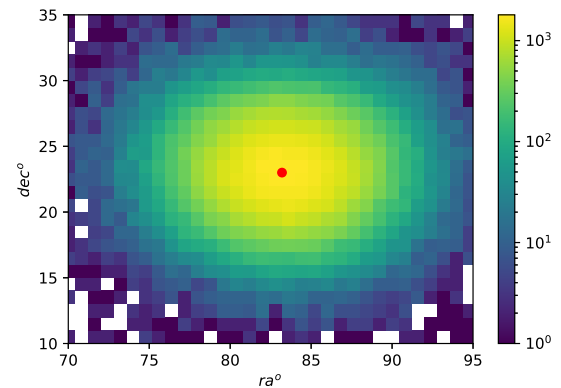


Рис. 6. Распределение по углам RA и DEC гибридных событий. Красная точка — положение источника Крабовидная туманность

3. *Size* — суммарное число фотоэлектронов в событии.

По данным TAIGA-HiSCORE используются:

1. X_s , Y_s — восстановленное положение оси ШАЛ на земле;
2. R_{tel} — расстояние от оси ШАЛ до телескопа;
3. *Energy* — восстановленная энергия ШАЛ;
4. d_{gam} — угол между направлением на источник (фон) и восстановленным направлением прихода

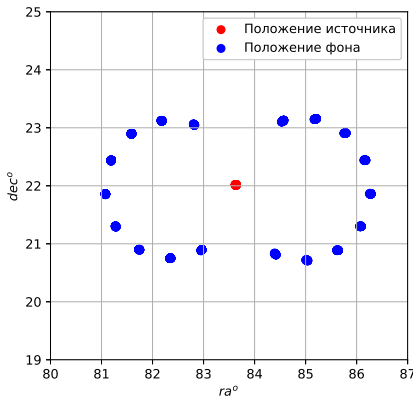


Рис. 7. Распределение положений источника и фона в небесных координатах)

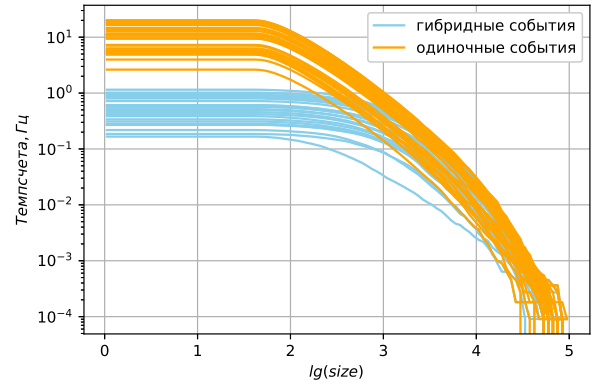


Рис. 8. Интегральный спектр по параметру *size*

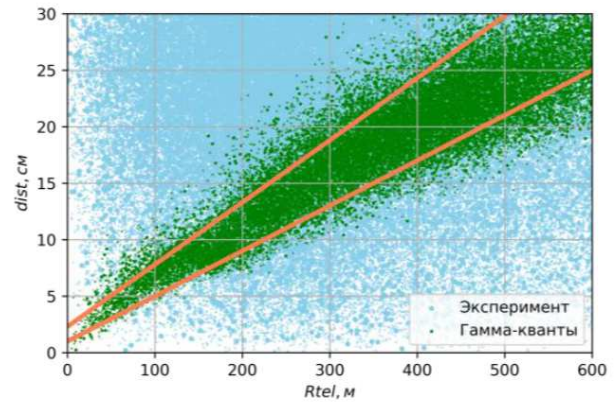
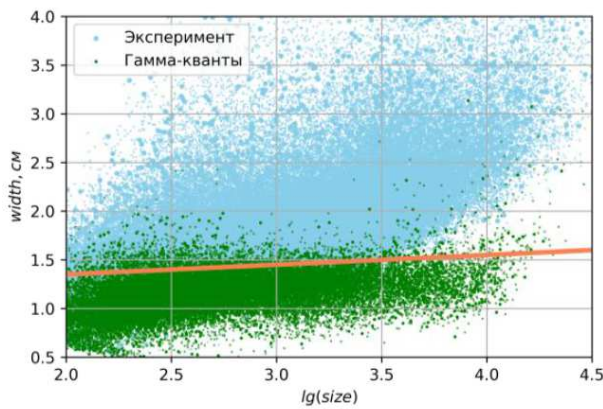


Рис. 9. Зависимость параметра *width* от *size* (слева); зависимость параметра *dist* от расстояния от оси ШАЛ до телескопа (справа)

да ШАЛ. Является основным параметром оценки полученных результатов.

Для увеличения статистической значимости наблюдаемого сигнала, расчет которой проводится по выражению Li&Ma [16], оценка фоновых событий проводится по 9 точкам. Каждая фоновая точка в камере телескопа была пересчитана в небесные координаты (рис. 7), что позволяет использовать одно и тоже положение фона для двух установок, от которых и отсчитывается параметр *dgam*.

На рис. 8 представлен интегральный спектр по параметру *size* для одиночных и гибридных событий — темп счета гибридных событий ниже, чем одиночных, что является ожидаемым результатом.

Для отбора гамма-подобных событий с помощью моделирования Монте–Карло были получены оптимальные критерии отбора (каты) на параметры Хиллса, при которых происходит максимальное подавление адронного фона, но сохраняется значительная доля гамма-квантов (рис. 9). В качестве фона использо-

вались экспериментальные события. Были подобраны следующие ограничения:

$$\begin{aligned}
 &Rtel < 400 \text{ м}; \quad size \geq 140 \text{ ф.э.}; \\
 &0.2 < width < 1.15 + 0.1 \times \lg(size); \\
 &2.3 + 0.055 \times Rtel < dist < 1 + 0.04 \times Rtel.
 \end{aligned}$$

Используя полученные ограничения, было построено распределение по параметру *dgam* (рис. 10). Максимум событий находится в области до 0.25° , где усредненное число фоновых событий составляет 199, число событий от источника — 224. Наблюдаемый максимум событий источника имеет статистическую значимость при использовании 9 фоновых точек $\sim 1.6\sigma$. Ожидается, что увеличение времени наблюдения и обновленная методика анализа данных позволит получить более достоверный результат.

Для отобранных событий был построен спектр по энергиям (рис. 11) за 200 ч наблюдений в гибридном режиме. В диапазоне энергий до 100 ТэВ полученное число гамма-квантов содержит высокую неопределен-

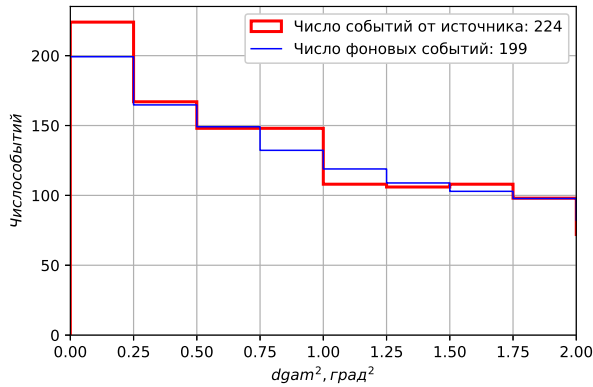


Рис. 10. Распределение по параметру $dgam$ после применения оптимальных ограничений на параметры совместных событий

ность, поскольку сказывается близость к энергетическому порогу установки TAIGA-HiSCORE. Оценка пороговой энергии для отобранных гамма-подобных событий составляет ~ 75 ТэВ.

Методика восстановления энергии ШАЛ описана в [17]. Энергетический спектр описывается соотношением:

$$F(E) = \frac{F_{on}(E) - \langle F_{off}(E) \rangle}{S_{eff}T} \times [ТэВ^{-1}см^{-2}с^{-1}].$$

где $S_{eff} = 0.25$ км² — эффективная площадь, T — время наблюдения.

Неопределенность в значениях восстановленной энергии в области выше 100 ТэВ связана с малой статистикой числа зарегистрированных гамма-квантов в каждом рассматриваемом бине. Расчет ошибок проводится в соответствии с [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была отработана методика поиска высокоэнергетических гибридных событий и за 3 се-

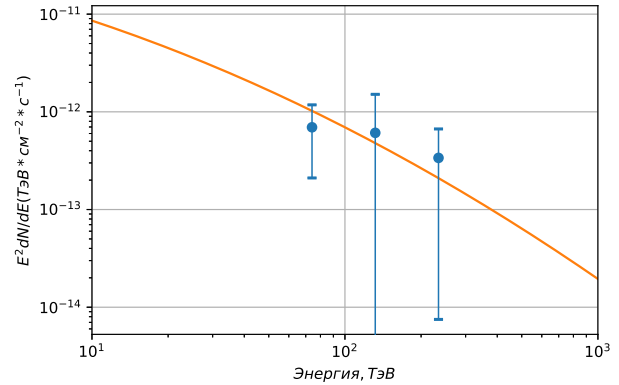


Рис. 11. Энергетический спектр; оранжевая линия — аппроксимация энергетического спектра источника Крабовидная туманность, полученная обсерваторией HAWC [1]

зона наблюдения источника Крабовидная туманность. Был построен энергетический спектр в области 100 ТэВ. Предварительная оценка пороговой энергии для отобранных гамма-подобных событий составляет ~ 75 ТэВ.

Дальнейшая работа предполагает проведение более детального моделирования совместных событий и на основе этого уточнить спектр источника в области 100 ТэВ, что является важным результатом для методики регистрации ШАЛ посредством детектирования черенковского излучения.

Автор выражает благодарность доктору физ.-мат. наук Л. Г. Свешниковой; профессору, докторе физ.-мат. наук Л. А. Кузьмичеву.

Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ», поддержана Минобрнауки России (соглашение ЕВ-075-15-2021-675, темы государственного задания (FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024, FSUS-2020-0039) и Российским научным фондом (проект № 23-72-00019 (раздел 3,4)).

[1] Abeysekara A.U., Albert A., Alfaro R. et al. // ApJ. **881**. 134. (2019).
 [2] Amenomori M., Bao Y. W., Bi X.J. et al. // Phys. Rev. Lett. **123**. 051101. (2019).
 [3] Budnev N.M., Astapov I.I., Bezyazeev P.A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. **958**. 162113. (2020).
 [4] Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezyazeev P.A. et al. // Phys. Atom. Nuclei. **81**. 497. (2018).
 [5] Astapov I.I., Bezyazeev P.A., Blank M. et al. // JET **134**. 469. (2022).
 [6] Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al. // Journal

of Physics: Conference Series. **675**. 032037. (2016).
 [7] Tluczykont M., Hampf D., Horns D. et al. // Astropart. Phys. **56**. 42. (2014).
 [8] Astapov I.I., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **81**. 460.
 [9] Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezyazeev P.A. et al. // EPJ Web Conf. **145**. 01001. (2017).
 [10] Кузьмичев Л.А., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Ядерная физика. **81**, № 4. 469. (2018).
 [11] Zhurov D.P., Gress O.A., Sidorov D.N. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. **1181**. 012045.

- [12] *Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezyazeev P.A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 952, 161830. (2020).*
- [13] *Свешникова Л.Г., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // Изв. РАН. Серия физическая. 85. 529. (2021).*
- [14] *Hillas A. // Space Science Reviews. 75. 17. (1996).*
- [15] *Lessard R.W., Buckley J.H., Connaughton V., Le Bohec S. // Astropart. Phys. 15. 1. (2001).*
- [16] *Li T.-P., Ma Y.-Q. // Astrophysical Journal. 272. 317. (1983).*
- [17] *Budnev N.M., Chiavassa A., Gress O.A. et al. // Astropart. Phys. 117. 10206. (2020).*

The energy spectrum of gamma quanta from the Crab nebula according to the TAIGA astrophysical complex in hybrid observation mode

Okuneva E.A.^{1,2}, from the TAIGA collaboration

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: lina.okuneva.97@mail.ru

The TAIGA Astrophysical complex (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy) is located in the Tunka Valley at a distance of 50 km from Lake Baikal and is designed to solve problems of gamma astronomy and high-energy cosmic ray physics. The combined operation (hybrid approach) of atmospheric Cherenkov telescopes of the TAIGA-IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) and wide-angle Cherenkov detectors of the TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) installation is aimed at registering gamma quanta with energies of more than 40 TeV. According to the data of the TAIGA-HiSCORE installation, information about the direction of arrival of the SHAL and the energy of the primary particle is restored by means of amplitude-time analysis. According to the TAIGA-IACT installation, events from gamma quanta from the hadron background are distinguished with high accuracy by analyzing the image obtained in the telescope camera from the Cherenkov light. The paper describes a technique for reconstructing the parameters of extensive air showers (EAS) induced by high-energy gamma quanta, the results of processing experimental data from the observation of the Crab Nebula source (for 3 seasons in the period 2019–2022, more than 150 hours of observations) obtained by the hybrid method.

PACS: 96.50.S

Keywords: cosmic rays, EAS, gamma-ray astronomy, Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope.

Received 02 June 2023.

Сведения об авторе

Окунева Эвелина Александровна — аспирантка 1 курса Физического факультета; e-mail: lina.okuneva.97@mail.ru.