

УДК 52.063

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ГАММА-КВАНТОВ ОТ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ ПО ДАННЫМ АСТРОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА TAIGA

© 2023 г. Л. Г. Свешникова^{1, *}, П. А. Волчугов^{1, 2}, Е. Б. Постников¹, И. И. Астапов⁴,
П. А. Безъязыков², Е. А. Бонвеч¹, А. Н. Бородин³, Н. М. Буднев², А. В. Булан¹, А. Вайдянатан⁵,
Н. В. Волков⁹, Д. М. Воронин⁶, А. Р. Гафаров², Е. О. Гресь², О. А. Гресь², Т. И. Гресь²,
О. Г. Гришин², А. Ю. Гармаш^{5, 8}, В. М. Гребенюк^{3, 10}, А. А. Гринюк³, А. Н. Дячок², Д. П. Журов²,
А. В. Загородников², А. Д. Иванова², А. Л. Иванова^{2, 5}, М. А. Илюшин², Н. Н. Калмыков¹,
В. В. Киндин⁴, С. Н. Кириухин², Р. П. Кокоулин², Н. И. Колосов², К. Г. Компаниец⁴,
Е. Е. Коростелева¹, В. А. Кожин¹, Е. А. Кравченко^{5, 8}, А. П. Крюков¹, Л. А. Кузьмичев¹,
А. Кьявасса¹¹, А. А. Лагутин⁹, М. В. Лаврова³, Ю. Е. Лемешев², Б. К. Лубсандоржиев⁶,
Н. Б. Лубсандоржиев¹, С. Д. Малахов², Р. Р. Миргазов², Р. Д. Монхоев², Э. А. Окунева¹,
Э. А. Осипова¹, А. Д. Панов¹, А. Л. Пахоруков², А. Пан³, Л. В. Паньков², А. А. Петрухин⁴,
Д. А. Подгрудков¹, Е. Г. Попова¹, В. В. Просин¹, В. С. Птускин⁷, А. А. Пушкин², А. Ю. Разумов¹,
Р. И. Райкин⁹, Г. И. Рубцов⁶, Е. В. Рябов², В. С. Самолига², И. Сатышев³, А. А. Силаев¹,
А. А. Силаев (мл.)¹, А. Ю. Сидоренков⁶, А. В. Скурихин¹, А. В. Соколов^{5, 8}, В. А. Таболенко²,
А. Б. Танаев², Б. А. Таращанский², М. Ю. Терновой², Л. Г. Ткачев^{3, 10}, Н. А. Ушаков⁶,
Д. В. Чернов¹, И. И. Яшин⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелыцина, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Иркутский государственный университет”, Научно-исследовательский институт прикладной физики,
Иркутск, Россия

³Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

⁵Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

⁶Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

⁷Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, 108840 Россия

⁸Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

⁹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

¹⁰Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Университет “Дубна”, Дубна, Россия

¹¹Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

*E-mail: tf110@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Проанализирован спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности в области энергий 4–100 ТэВ, полученный по данным двух атмосферных черенковских телескопов, в составе комплекса TAIGA. Описана методика выделения и восстановления энергии гамма-квантов, включающая процедуру восстановления энергетического спектра.

DOI: 10.31857/S0367676523701697, EDN: OQJOKJ

ВВЕДЕНИЕ

Гамма-излучение в энергетической области выше 1 ТэВ от Крабовидной туманности (Краба), впервые было зарегистрировано около 30 лет назад [1] с помощью атмосферного черенковского телескопа (АЧТ). Это открытие дало начало бурно развивающейся экспериментальной гамма-астрономии очень высоких энергий (VHE). В течение этих лет каждая новая гамма-обсерватория начинала свою работу с регистрации гамма-излучения от Краба, который рассматривается как “стандартный источник”, но только в самое последнее время от этого источника были зарегистрированы гамма-кванты с энергией выше 100 ТэВ [2–4], причем в эксперименте LHAASO наиболее энергичный гамма-квант оказался близок к энергии 1 ПэВ¹, что стимулировало дискуссию, не является ли Крабовидная туманность не только ускорителем электронов до энергий порядка ПэВ, как предсказывалось еще 25 лет назад, но и ускорителем протонов до данных энергий [5]. В высокогорных установках используется существенно другая, по сравнению АЧТ, методика выделения событий от гамма-квантов, основанная на выделении широких атмосферных ливней (ШАЛ) с малым числом мюонов. Представляется важным восстановить спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности и ряда других источников по черенковскому свету для получения, возможно новой, дополнительной информации об ускорении частиц в этих источниках.

Астрофизический комплекс TAIGA [6–9] (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy), расположен в Тункинской долине (51.49 с.ш., 103.04 в.д.), в 50 км от озера Байкал и является самой северной гамма-обсерваторией в мире. Это позволяет исследовать источники с высокими склонениями. На Астрофизическом комплексе реализован гибридный метод регистрации гамма-квантов, основанный на регистрации одного ШАЛ широкоугольной установкой TAIGA-HiSCORE и хотя бы одним атмосферным черенковским телескопом (АЧТ) [7–9]. В 2017 был введен в строй первый АЧТ01, а в апреле 2022 года третий — АЧТ03. Первые результаты по наблюдения Крабовидной туманности первым телескопом в моно-режиме были представлены в работе [10], где констатировалось наблюдение сигнала с достоверностью около 6σ. В настоящей работе представлены результаты наблюдения Краба в двух сезонах 2019–2020 и 2020–2021 как при работе в моно-режиме, так и при регистрации гамма-квантов в стереорежиме двумя телескопами. Рассмотрены методы восстановления энергии и угла прихода ШАЛ. Обсуждается процедура восстановления энергетического спектра и

калибровка Монте-Карловских расчетов по экспериментальным данным.

АТМОСФЕРНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП. ПРОЦЕДУРА СЛЕЖЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Атмосферный черенковский телескоп TAIGA-IACT имеет составное зеркало системы Дэвиса—Коттона площадью ~ 10 м² и фокусным расстоянием — 4.75 м. В фокусе зеркал установлена регистрирующая камера, содержащая около 600 ФЭУ с диаметром фотокатода 19 мм. Диаметр угла обзора камеры — 9.6°. Угол обзора каждого пикселя — 0.36°. Описание системы сбора информации, триггерной системы и калибровки можно найти в [11, 12]. Наблюдения Крабовидной туманности были выполнены в режиме наведения *wobble*, предложенным в [13] и реализованным в эксперименте TAIGA [14]. Наблюдения проводятся с августа по май с разделением времени между несколькими основными источниками. Первичная процедура реконструкции параметров изображений ШАЛ в нашем эксперименте подробно описана в работах [6, 7, 10]. Все параметры Хилласа [15], включая *dist* (угол между центром тяжести изображения и положением источника в камере) и *alpha* (угол между основной осью эллипса Хилласа и вектором, направленным из центра тяжести изображения на положение источника), восстанавливаются, как для истинного положения источника в камере (ON-события), так и для точки в камере, смещенной на определенный угол относительно положения источника (OFF-события). Таких точек для отбора OFF-событий может выбрано несколько (5–8), и это приводит к уменьшению ошибки среднего числа фоновых событий, и, соответственно, к увеличению значимости сигнала от гамма-источника при том же времени наблюдения. Определение энергии и угла прихода ливня было разным для моно- и стерео-методик наблюдения и описано в последующих разделах.

МОНТЕ-КАРЛО РАСЧЕТЫ ОТКЛИКА ТЕЛЕСКОПА И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА

В эксперименте TAIGA моделирование ШАЛ выполняется с помощью пакета CORSIKA версии 7.35 с моделью QGSJET-II-04 для высокоэнергетических взаимодействий и GHEISHA-2002d для низкоэнергетических взаимодействий. Подробности и ссылки можно найти в ссылке [16]. Определялся набор параметров изображений, позволяющий наиболее эффективно подавить фон и зарегистрировать гамма-кванты. Один из наиболее важных для восстановления энергии ШАЛ параметр — коэффициент перехода от числа фо-

¹ Результат LHAASO еще не прошел независимую проверку, поэтому к нему стоит относиться с осторожностью.

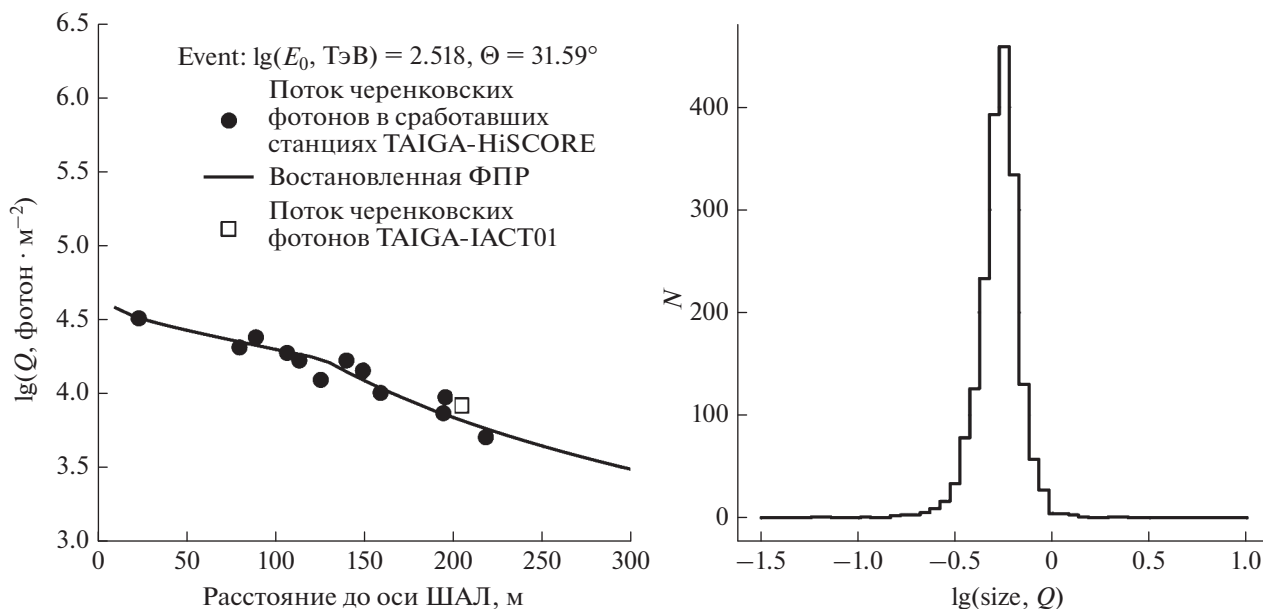


Рис. 1. Пример гибридного события (а). Черные круги — экспериментальные точки ФПР по станциям HiSCORE, сплошная кривая — аппроксимация этой ФПР, черный квадрат — поток света в точке расположения телескопа, пересчитанный из события, зарегистрированного телескопом с коэффициентом $R_{\text{м-к}} = 0.63$. Распределение по коэффициенту $R_{\text{эксп}}$ (б).

тоэлектронов в изображении $size$ к потоку фотонов I (фот/м²), падающих на зеркала телескопа, $R = size/I$. В расчетах Монте-Карло оценки этого коэффициента ($R_{\text{м-к}}$) связаны с рядом неопределенностей (отражение света от зеркал, учет прохождения света через входное окно камеры, отражение света от конусов Винстона, квантовая чувствительность фотоумножителей и т.д.), поэтому необходима независимая оценка этой величины. В эксперименте TAIGA величина отношения $size$ к потоку фотонов ($R_{\text{эксп}}$) получена по гибридным событиям, зарегистрированным телескопом и станциями HiSCORE. Для таких событий известна энергия E , восстановленная по плотности фотонов на расстоянии 200 м от оси ШАЛ, и функция пространственного распределения фотонов (ФПР), восстановленная по данным станций HiSCORE, с точностью около 10% [17]. По ФПР можно получить число фотонов в точке положения телескопа I , сравнить с числом фотоэлектронов в изображении, регистрируемом телескопом, и получить величину отношения $R_{\text{эксп}} = size/I$. Коэффициент, полученный по банку событий оказался равным $R_{\text{эксп}} = 0.56 \pm 0.03 + 0.07 \text{ сист.}$. В Монте-Карло расчетах $R_{\text{м-к}} = 0.63 \text{ р.э.} \pm 0.03$, что в пределах ошибки согласуется с экспериментальным значением и подтверждает правильность выполненного моделирования. Пример гибридного события приведен на рис. 1а. Черные точки — экспериментально измеренные ФПР по станциям HiSCORE, сплошная линия — аппрок-

симация этой ФПР, квадрат — поток света в точке расположения телескопа. Распределение по коэффициенту $R_{\text{эксп}}$ приведено на рис. 1б.

АНАЛИЗ ДАННЫХ И СПЕКТР ГАММА-КВАНТОВ В МОНО-РЕЖИМЕ

Рассмотрим результаты наблюдения Краба телескопом АЧТ01 в двух сезонах 2019–2020 (101 ч) и 2020–2021 (49 ч) в виде восстановленного спектра гамма-квантов. В обработку включались сеансы наблюдений с оценкой погоды не ниже 4 (по пятибалльной шкале, принятой в эксперименте TAIGA), отбирались события только в интервале зенитных углов 29° – 42° и двухминутные порции данных с темпом счета ШАЛ выше 5 Гц. Суммарное время наблюдения составило около 150 ч.

На первом этапе подавление фона и выделение группы гамма-подобных ливней проводилось по следующим основным критериям, настроенным по Монте-Карло симуляции:

$$\begin{aligned} size &> 120 \text{ ф.э.}; 0.36^\circ < dist < 1.44^\circ, \\ 0.024 < width < (0.068^\circ \cdot \lg(size) - 0.047^\circ), \quad (1) \\ length &< 0.145^\circ \cdot \lg(size). \end{aligned}$$

На финальном этапе для выделения гамма-подобных событий строилось распределение по параметру θ^2 , где θ — угол между направлением на источник и направлением прихода ШАЛ. Для телескопов, работающих в моно-режиме θ может

быть определен методом $disp$, предложенным в работе [18]. $disp$ это угловое расстояние между взвешенным центром имиджа вдоль основной оси эллипса и положением источника в камере, которое можно оценить, опираясь на Монте-Карло симуляции. В данной работе использовалось следующее выражение для [18]:

$$disp = \xi(dist, size) \cdot (1 - width/length). \quad (2)$$

Коэффициент ξ зависит от параметров $dist$ и $size$, и был получен из данных Монте-Карло симуляций. Угол θ связан с параметром $disp$ и параметрами Хилласа $dist$ и $alpha$:

$$\theta^2 = disp^2 + dist^2 - 2disp \cdot dist \cos(alpha). \quad (3)$$

Моделирование Монте-Карло показало, что примененный метод позволяет добиться точности определения θ^2 для гамма-квантов $\sim 10\%$. Каждому экспериментальному событию был приписан угол θ , на основе чего было построено распределение по θ^2 : $N_{on}(\theta^2)$ гамма-подобных событий уже отобранных по критериям (1). Для фоновых событий, отобранных по тем же критериям (1) строилось усредненное распределение по 5 точкам фона $\langle N_{off}(\theta^2) \rangle$. Разница этих распределений $N_{on}(\theta^2) - \langle N_{off}(\theta^2) \rangle$ приведена на рис. 2. В распределение однозначно виден избыток частиц в области $\theta^2 < (0.05^\circ)^2$: $N_{on} = 2173$ и $\langle N_{off} \rangle = 1610$, избыток оказался равным 563 события, которые получены с достоверностью $\sim 12\sigma$ по формуле S17 из работы [19].

Для получения энергетического распределения отобранных ливней с $\theta^2 < 0.05$ необходимо приписать энергию каждой частице. Энергия первичного ливня зависит от полного числа фотоэлектронов в изображении (параметр $size$) и расстояния от оси ШАЛ до телескопа (параметр $R0$). Для отобранных гамма-подобных ливней, параметр $dist$ пропорционален $R0$. Настройка метода определения энергии проходила по данным Монте-Карло симуляций для гамма-квантов в интервале энергий $E = 2-20$ и $20-200$ ТэВ, наигранных с первичным степенным спектром с показателем $\gamma = -2.6$. Все события были разбиты на 5 групп по параметру $dist(i)$ с интервалом 0.36° . В каждой группе методом наименьших квадратов было проведено фитирование линейной функцией $\lg(E_{true}) = a + b \cdot \lg(size)$ и получен набор коэффициентов, $a(i)$ и $b(i)$ для каждой группы, по которым восстанавливалась реконструированная энергии гамма-квантов $\lg(E_r) = a(i) + b(i) \cdot \lg(size)$. Точность восстановления энергии одиночного гамма-кванта оказалась около 30% и не зависит от энергии в исследуемом диапазоне. Для построения энергетического спектра строилась гистограмма с шагом 0.2 по логарифму энергии, в которую заносились все гамма-подобные события по

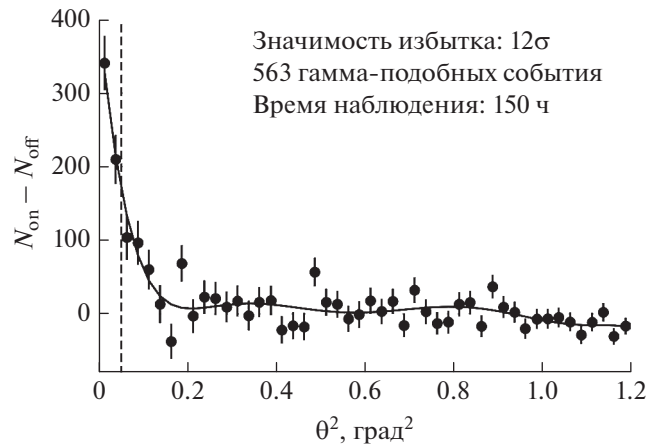


Рис. 2. Распределение $(N_{on}(\theta^2) - \langle N_{off}(\theta^2) \rangle)$ после подавления фона по критериям (1) в моно-режиме наблюдений.

реконструированной энергии. Из этой гистограммы по реконструированной энергии была получена гистограмма по истинной энергии с помощью метода unfolding (деконволюция) [20]. Метод основывается на линейной модели связи между вектором S гистограммы истинной энергии и вектором Y гистограммы измеренной энергии: $Y = MS$, и решении некорректно поставленной обратной задачи определения S по Y . Матрица M моделируется методом Монте-Карло [21]. Сетка гистограммы Y измеренной энергии была выбрана отличной от сетки гистограммы S , был осуществлен перебор сеток и из них отобрана такая, для которой минимальное число событий, для которых энергия восстанавливается с большой ошибкой, попадут в последний бин гистограммы, с энергией ~ 100 ТэВ. Значения S , полученные из Y решением линейного уравнения, представляют собой число гамма-квантов в бинах. После нормировки на эффективную площадь установки (рис. 3) и время наблюдения получаем результирующий спектр источника. На рис. 4 представлен спектр частиц в сравнении со спектрами от Краба, измеренными в экспериментах с черенковскими атмосферными телескопами [22–25], а также спектрами, полученными на высокогорных установках [2–4]. В целом, спектр частиц, полученный по данным одного АЧТ, хорошо согласуется с мировыми данными, пороговая энергия около ~ 5 ТэВ. В последнем бине (30–80 ТэВ) содержится 16 событий.

АНАЛИЗ ДАННЫХ И СПЕКТР ГАММА-КВАНТОВ В СТЕРЕО-РЕЖИМЕ

Наблюдения Крабовидной туманности в стерео-режиме проводились первыми двумя телескопами установки TAIGA-IACST с октября по

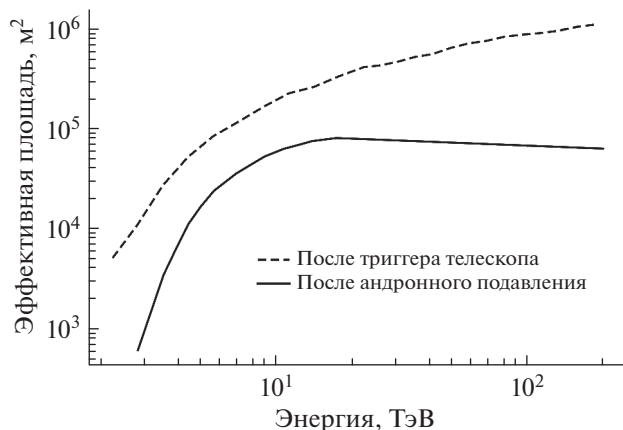


Рис. 3. Эффективная площадь АЧТ01. Пунктирная кривая — эффективная площадь до применения критериев отбора гамма-подобных событий. Сплошная — эффективная площадь телескопа после применения критериев отбора гамма-подобных событий.

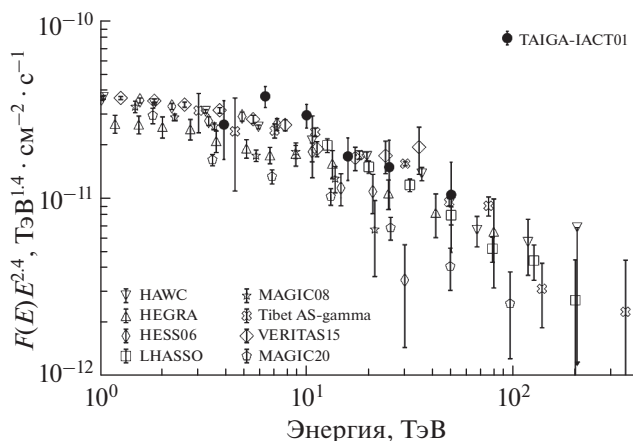


Рис. 4. Восстановленный спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности по данным первого телескопа эксперимента TAIGA в сравнении с результатами измерений других обсерваторий.

февраль сезона 2020–2021. Анализ подразумевает стандартный расчет параметров Хилласа для каждого события (относительно 7 положений фона и одного источника), а также расчет дополнительных параметров, необходимых для проведения стереоскопической реконструкции геометрии ШАЛ. Для определения направления прихода ШАЛ проводится расчет положений главных осей изображений в камере каждого телескопа. Точка пересечения этих осей в общем поле зрения телескопов соответствует положению источника гамма-квантов. Точность восстановления положения источника была определена на основе Монте-Карло моделирования и составляет 0.245° . Положение оси ШАЛ, в плоскости перпендикулярной направлению прихода ливня, определяется как точка пересечения прямых, проходящих через центр тяжести изображения и положения источника в камере [26]. Моделирование показывает, что точность восстановления положения оси составляет 18 м при энергии гамма-квантов 20 ТэВ и 15 м при энергии 200 ТэВ. Гамма-адронное разделение при стерео-методе регистрации ШАЛ в настоящее время проводится посредством наложения критериев отбора на два параметра: угол θ и нормализованная ширина. Угол θ определяется как разность между истинным положением источника и восстановленным. Нормализованная ширина определяется по формуле [27]:

$$w = \frac{1}{N_{tel}} \left[\sum_i^{N_{sig}} \frac{width_i - w_m(r_i, size_i)}{w_{MAD}(r_i, size_i)} \right],$$

где N_{tel} — количество сработавших телескопов, $width_i$ — ширина изображения в данном сработавшем телескопе, $w_m(r_i, size_i)$ — медианное значение ширины, характерное для событий с заданным $size_i$

и расстоянием до оси ливня (r_i). $w_{MAD}(r_i, size_i)$ — медианное абсолютное отклонение распределения ширин для событий в том же диапазоне значений r_i и $size_i$. Для отбора гамма-подобных событий, на параметры θ и w накладываются ограничения. Критерии отбора были получены из моделирования и составляют 0.25° и 0.6 для θ и w соответственно. Коэффициент подавления адронов составляет $3.8 \cdot 10^{-5}$. При применении критериев отбора к экспериментальным данным, было отобрано 37 гамма-подобных событий за 36 ч наблюдения. Значимость избытка составила 5.3σ (рис. 4а). Для отобранных гамма-подобных событий было проведено восстановление энергии, с использованием значений трех параметров событий: $size$, $R0$, глубина максимума развития ШАЛ (X_{max}). Восстановление X_{max} проводилось на основе процедуры описанной в [27]. Для этого предварительно проводится реконструкция положения оси ШАЛ и, при известном направлении на максимум развития ливня (положения центра тяжести эллипса в камере), можем определить высоту максимума развития ШАЛ из геометрических соображений по формуле: $h_{max} = R0[m]/dist[rad]$, где $R0$ — расстояние от телескопа до оси ШАЛ. На основе модели стандартной атмосферы, для положения астрофизического комплекса и соответствующей среднегодовой температуры, проводится пересчет высот в толщину атмосферы в $г/см^2$ [28]. Точность восстановления X_{max} была определена из Монте-Карло моделирования и составила $24 г/см^2$ для событий с энергией выше 20 ТэВ. Для определения энергии событий, на основе моделирования создается таблица соответствия различных диапазонов по X_{max} , $size$ и $R0$ определенной энергии. Энергия 37 гамма-подобных событий, отобранных в эксперименте, была определена посред-

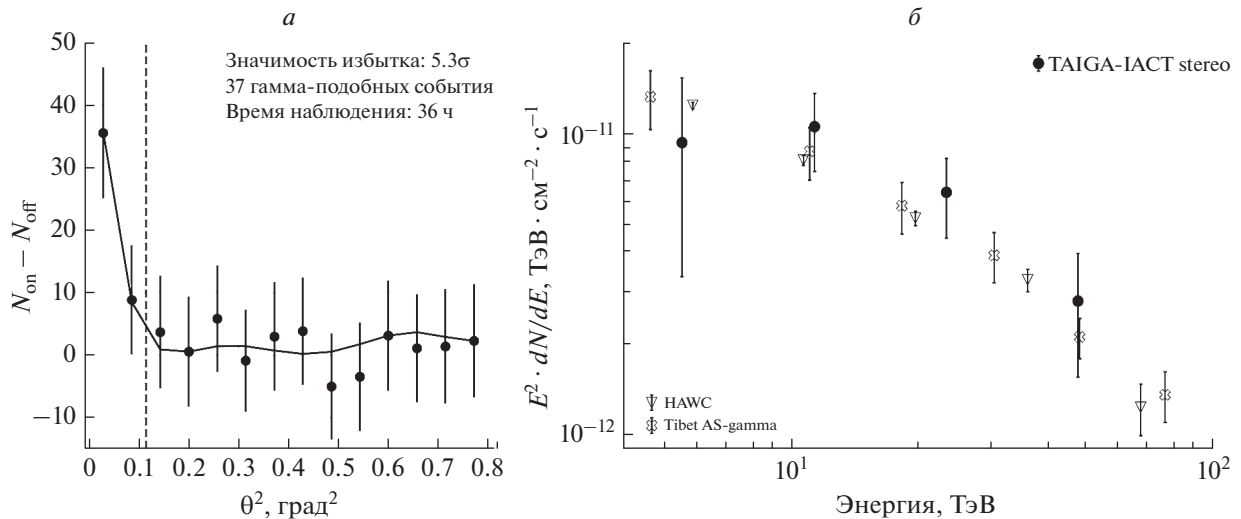


Рис. 5. Распределение по параметру θ^2 в стерео-режиме (а). Восстановленный спектр гамма-квантов по данным стерео-наблюдений первых двух атмосферных черенковских телескопов TAIGA в сравнении результатами измерений других обсерваторий (б).

ством данного метода, в результате чего был построен спектр гамма-квантов в области энергий выше 5 ТэВ (рис. 5б). Последний бин спектра в диапазоне от 34 до 69 ТэВ содержит 6 гамма-подобных событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты по восстановлению энергетического спектра гамма-квантов от Крабовидной туманности по данным первого телескопа (рис. 4) и первых двух телескопов, работающих в стерео-режиме (рис. 5) в диапазоне 4–80 ТэВ. После ввода в строй трех АЧТ и 120 станций установки TAIGA-HiSCORE мы ожидаем 40–60 событий за 300 ч наблюдения Краба с энергией выше 100 ТэВ, восстановленных гибридным методом. В высокогорных установках используется существенно другая, по сравнению с АЧТ методика выделения событий от гамма-квантов, основанная на выделении ШАЛ с малым числом мюонов. Представляется важным восстановить спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности и ряда других источников по черенковскому свету для получения, возможно новой, дополнительной информации об ускорении частиц в этих источниках.

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; разделы 3,4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Weekes T.C., Cawley M.F., Fegan D.J. et al. // *Astrophys. J.* 1989. V. 342. P. 379.
- Amenomory M., Bao Y.W., Bi X.J. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 123. Art. No. 051101.
- Abeysekara A.U., Albert A., Alfaro R. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2020. V. 124. No. 2. Art. No. 021102.
- Cao Z., Aharonian F.A., An Q. et al. // *Nature*. 2021. V. 594. P. 33.
- Ruo-Yu Liu, Xiang-Yu Wang // *Astrophys. J.* 2021. V. 2. P. 221.
- Кузьмичев Л.А., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2018. Т. 81. № 1. С. 1; Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezzyazekov P.A. et al. // *Phys. Atom. Nucl.* 2018. V. 81. No. 4. P. 497.
- Budnev N., Astapov I., Bezzyazekov P. et al. // *J. Instrum.* 2020. V. 15. No. 9. P. 1.
- Gluczykont M., Hampf D., Horns D. et al. // *Astropart. Phys.* 2014. V. 56. P. 42.
- Kuzmichev L. et al. (TAIGA Collaboration) // *NIM A*. 2020. V. 952. Art. No. 161830.
- Свешникова Л.Г., Астапов И.И., Безъязыков П.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 8. С. 1061; Sveshnikova L.G., Astapov I.I., Bezzyazekov P.A. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 8. P. 922.
- Lubsandorzhev N. et al. (TAIGA Collaboration) // *Proc. 35 ICRC (Busan, 2017)* P. 757.
- Budnev N. et al. (TAIGA Collaboration) // *Proc. 35 ICRC (Busan, 2017)* P. 768.
- Fomin V.P., Stepanian A., Lamb R. et al. // *Astropart. Phys.* 1994. V. 2. No. 2. P. 137.
- Zhurov D., Gress O., Sidorov D. et al. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1181. Art. No. 012045.
- Hillas A.M. // *Proc. 19th ICRC. V. 3. (La Jolla, 1985).* P. 445.

16. Grinyuk A., Postnikov E., Sveshnikova L. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 83. P. 262.
17. Budnev N.M., Chiavassa A., Gress O.A. et al. // Astropart. Phys. 2020. V. 117. Art. No. 102406.
18. Lessard R.W., Buckley J.H., Connaughton V. et al. // Astropart. Phys. 2001. V. 15. No. 1. P. 1.
19. Li T.-P., Ma Y.-Q. // Astrophys. J. 1983. V. 272. P. 317
20. Anykeyev V.B., Spiridonov A.A., Zhigunov V.P. // NIM A. 1991. V. 303. P. 350.
21. Albert J., Aliu E., Anderhub A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2007. V. 583. P. 494.
22. Kevin M. et al. (VERITAS Collaboration) // Proc. 34ICRC (Hague, 2015). P. 792.
23. Aharonian F. et al. (HESS Collaboration) // Astropart. Phys. 2011. V. 34. P. 738.
24. Acciari V.A., Ansoldi S., Antonelli L.A. et al. (MAGIC Collaboration) // arXiv: 2001.09566v1. 2020.
25. Aharonian F. et al. (HEGRA Collaboration) // arXiv: astro-ph/0407118. 2004.
26. Grinyuk A., Postnikov E., Volchugov P. et al. // Proc. Sci. ICRC2021 (Berlin, 2021). Art. No. 713.
27. Hofmann W., Lampeit W., Konopelko H., Krawczynski H. // Astropart. Phys. 2000. V. 12. No. 4. P. 207.
28. Krawczynski H., Carter-Lewis D., Duke C. et al. // Astropart. Phys. 2006. V. 25. No. 6. P. 380.
29. Просин В.В. Энергетический спектр и массовый состав космических лучей в диапазоне энергий 10^{15} – 10^{17} эВ по данным установок для регистрации черенковского света от широких атмосферных ливней. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2006. 196 с.

The energy spectrum of gamma-rays from the Crab Nebula according to the TAIGA astrophysical complex

L. G. Sveshnikova^{a,*}, P. A. Volchugov^a, E. B. Postnikov^a, I. I. Astapov^d, P. A. Bezyazeev^b,
 E. A. Bonvech^a, A. N. Borodin^c, N. M. Budnev^b, A. V. Bulan^a, A. A. Vaidyanathan^e, N. V. Volkovⁱ,
 D. M. Voronin^f, A. P. Gafarov^b, E. O. Gress^b, O. A. Gress^b, T. I. Gress^b, O. G. Grishin^b,
 A. Yu. Garmash^{e,h}, V. M. Grebenyuk^{c,j}, A. A. Grinyuk^a, A. N. Dyachok^b, D. P. Zhurov^b,
 A. V. Zagorodnikov^b, A. D. Ivanova^b, A. L. Ivanova^{b,e}, M. A. Iliushin^b, N. N. Kalmykov^a, V. V. Kindin^d,
 S. N. Kiryuhin^b, R. P. Kokoulin^d, N. I. Kolosov^b, K. G. Kompaniets^d, E. E. Korosteleva^a, V. A. Kozhin^a,
 E. A. Kravchenko^{e,h}, A. P. Kryukov^a, L. A. Kuzmichev^a, A. Chiavassa^k, A. A. Lagutinⁱ, M. V. Lavrova^c,
 Yu. E. Lemeshev^b, B. K. Lubsandorzhiev^f, N. B. Lubsandorzhiev^a, S. D. Malakhov^b, R. R. Mirgazov^b,
 R. D. Monkhoev^b, E. A. Okuneva^a, E. A. Osipova^a, A. D. Panov^a, A. L. Pakhorukov^b, A. Pan^c,
 L. V. Pankov^b, A. A. Petrukhin^d, D. A. Podgrudkov^a, E. G. Popova^a, V. V. Prosin^a, V. S. Ptuskin^g,
 A. A. Pushnin^b, A. Yu. Razumov^a, R. I. Raikinⁱ, G. I. Rubtsov^f, E. V. Rjabov^b, V. S. Samoliga^b,
 I. Satyshev^c, A. A. Silaev^a, A. A. Silaev, Jr.^a, A. Yu. Sidorenkov^f, A. V. Skurikhin^a, A. V. Sokolov^{e,h},
 V. A. Tabolenko^b, A. B. Tanaev^b, B. A. Tarashansky^b, M. Yu. Ternovoy^b, L. G. Tkachev^{c,j},
 N. A. Ushakov^f, D. V. Chernov^a, I. I. Yashin^d

^a Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^b Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia

^c Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

^d National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409 Russia

^e Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia

^f Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

^g Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia

^h Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

ⁱ Altai State University, Barnaul, 656049 Russia

^j Dubna State University, Dubna, 141980 Russia

^k National Institute for Nuclear Physics, Torino, 10125 Italy

*e-mail: tf110@mail.ru

We studied the spectrum of gamma-rays from the Crab Nebula in the energy range of 4–100 TeV, obtained from the data of two atmospheric Cherenkov telescopes, as part of the TAIGA complex. We described a technique for selection and reconstruction of gamma-rays energy, including a procedure for reconstruction the energy spectrum.