

## ПОИСК ИСТОЧНИКОВ ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЭНЕРГИЯХ СВЫШЕ $10^{14}$ ЭВ

Д. Бенко<sup>2</sup>, А. Варга<sup>2</sup>, Е. Н. Гудкова<sup>1</sup>, Н. М. Нестерова<sup>1</sup>, Г. Эрдеш<sup>2</sup>

*С целью поиска локальных источников первичного космического излучения (ПКИ) при энергиях  $10^{14} - 10^{15}$  эВ проведен анализ результатов, полученных на отдельной установке Тянь-Шаньской станции, предназначенной для непрерывных исследований. Определены направления прихода в экваториальных координатах для 35 миллионов зарегистрированных широких атмосферных ливней (ШАЛ) от ПКИ. Выделены те направления, где стандартное отклонение числа событий превысило определенную величину. Это могут быть направления, по которым от источников ПКИ приходят нейтральные первичные космические частицы ( $\gamma$ -кванты и др.). Отдельные направления совпадают с результатами других установок и положением пульсаров.*

**Ключевые слова:** локальные источники первичного космического излучения высоких энергий. Космические источники гамма-излучения высоких энергий.

Целью работы являлся поиск локальных источников первичного космического излучения (ПКИ) с энергией  $10^{14} - 10^{15}$  эВ.

Задача заключалась в выделении направлений прихода широких атмосферных ливней (ШАЛ) ПКИ от нейтральных первичных космических частиц ( $\gamma$ -квантов и др.), не отклоняющихся в магнитных полях межгалактического пространства, на общем фоне изотропно распределенных заряженных частиц. Природа источников  $\gamma$ -квантов пока окончательно не ясна. Предполагается, что источниками могут быть пульсары, оболочки сверхновых, остатки выбросов вещества из центра Галактики.

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; nester@sci.lebedev.ru

<sup>2</sup> Центральный институт физических исследований (КФКИ) Венгерской академии наук.

При меньших энергиях регистрация  $\gamma$ -квантов обычно проводится путем поиска избытка ШАЛ телескопами, регистрирующими черенковское излучение в атмосфере в безоблачные ночи. Первые такие наблюдения были проведены в Крыму в 1960–1963 гг. сотрудниками ФИАН под руководством А. Е. Чудакова [1]. Сейчас этот метод широко используется во всем мире.

При энергиях  $\geq 10^{14}$  эВ интенсивность ПКИ мала и поиск источников осуществляется на наземных установках, предназначенных для изучения ШАЛ под всеми видимыми углами на уровне наблюдения.

*Методы регистрации.* На Тянь-Шаньской станции была создана специальная установка, позволяющая регистрировать, отбирать, записывать угловые и временные параметры ШАЛ, одновременно проводя самоконтроль ее работы. Эта установка действовала отдельно от большой комплексной установки ШАЛ [2, 3] и отличалась от нее тем, что функционировала непрерывно, не требуя регулярных остановок на профилактику.

Настоящие данные основаны на анализе экспериментального материала, полученного на этой отдельной установке, в совместной работе сотрудников ФИАН и ЦИФИ (Центральный институт физических исследований) Венгерской академии наук (КФКИ) по исследованию анизотропии ПКИ с энергией  $E_0 \geq 10^{14}$  эВ путем регистрации направлений прихода и плотности потока электронов ШАЛ. Электронная аппаратура была разработана в ЦИФИ.

Установка состояла из системы “Хронотрон”, системы газоразрядных счетчиков и системы “КЛАРА”. Система “Хронотрон” предназначалась для определения направлений прихода ПКИ путем измерения углов наклона ШАЛ: измерялась разность во времени прихода фронта ШАЛ между двумя противоположными пунктами регистрации. В каждом пункте было установлено по два сцинтилляционных (СЦ) детектора площадью  $1 \text{ м}^2$  с фотоумножителями. “Хронотрон” регистрировал ШАЛ в случае четырехкратных совпадений сигналов от одной или более частиц, прошедших через СЦ детекторы, в каждом из 4-х пунктов. Сигналы о времени прихода с каждого ФЭУ поступали через регулируемые линии задержки на преобразователи время–амплитуда–код в системе “КЛАРА”.

Группы высокостабильных газоразрядных счетчиков (ГС) располагались в тех же 4-х пунктах над СЦ детекторами и состояли из 36 счетчиков, площадью  $320 \text{ см}^2$  каждый.

Система “КЛАРА” регистрировала показания “Хронотрона” и ГС, а также проводила контроль работы установки. Записывались: номер (код) сработавшего канала “Хро-

нотрона”, код суммарного числа частиц в 4-х группах ГС и время прихода каждого ШАЛ. Показания счетчиков записывались в восемь дискретных интервалов в зависимости от суммарного числа зарегистрированных электронов. Каждому интервалу присваивался определенный код. В системе детекторов поддерживалась постоянная температура. Также регистрировалось число дней и часов за данный год, когда велась запись.

*Обработка и результаты.* Для перехода к основной величине ШАЛ – полному числу электронов  $N_e$ , характеризующей энергию первичной космической частицы  $E_0$ , – было проведено моделирование ШАЛ с отбором “искусственных” событий, учитывающим конкретные условия регистрации системой “Хронотрон – ГС–КЛАРА” и реальный спектр ливней по  $N_e$ , а также пространственные распределения электронов на глубине Тянь-Шаня, измеренные ранее комплексной установкой “ШАЛ” [3].

Затем из разыгранных ШАЛ отбирались события, соответствующие данному интервалу по суммарному числу электронов во всех ГС. Получены распределения по  $N_e$  и определены их средние значения для каждого из 8-ми интервалов показаний ГС.

После тщательных технических отбраковок из общего банка данных было выбрано 23580 часов кондиционной работы установки. Данные за это время признаны надежными и вошли в обработку. Общее число таких ливней было более **35 МИЛЛИОНОВ**. Такой значительный объем банка выгодно выделяет наши данные в ряду аналогичных экспериментов.

По показаниям “Хронотрона” для каждого ШАЛ определялись зенитный ( $\Theta$ ) и азимутальный ( $\varphi$ ) углы наклона оси в местной системе координат. Характеристики  $\Theta, \varphi, t$  (где  $t$  – время прихода ливня) были преобразованы в экваториальную систему координат по “Прямому восхождению” ( $\alpha$ ) и “Склонению” ( $\delta$ ). Получены распределения по числу ШАЛ в ячейках  $\delta \times \alpha = 5^\circ \times 7.5^\circ$ , нормированные на время наблюдения каждой ячейки.

Из-за особенностей регистрации в дальнейшую обработку отбирались события с  $\Theta = [20^\circ, 60^\circ]$ . Ошибки измерения углов  $\Theta$  и  $\varphi$  не превышали  $2.5^\circ - 3^\circ$  в рассматриваемом диапазоне по  $\Theta$ . Была проведена дополнительная отбраковка событий по “видимости ячейки”. Так, если в момент прихода события из некоторой ячейки звездного неба хотя бы один из углов этой ячейки не был виден установке под углом  $\Theta = [20^\circ, 60^\circ]$ , то информация о событии из дальнейшего анализа исключалась. Таким образом, в окончательную обработку вошло более 18.6 миллионов ливней или 62% от начального количества (в основном из-за отбора событий с  $\Theta = [20^\circ, 60^\circ]$ ).

Т а б л и ц а 1

Общая информация о банке по годам

Год	Время надежных наблюдений, час	Общей число ливней	Число ливней с $\Theta = [20^\circ, 60^\circ]$
I	3419	52060695	3428637
II	5521	8264501	4400329
III	5764	8533368	5572122
IV	5002	7711029	5011155
V	3875	5623498	3637696
Всего	23581	35393091	22049939

Чтобы учесть поглощение в атмосфере частиц ШАЛ, приходящих под разными зенитными углами, введены поправки на угловое распределение по зенитному углу  $\Theta$  для событий, прошедших окончательный отбор. С этой целью было получено распределение по  $\Theta$  в интервалах  $0.3^\circ$ , нормированное к полному числу этих событий –  $K(\Theta)$ . Затем, для  $\Theta$ , представленных в данной ячейке  $\delta \times \alpha = 5^\circ \times 7.5^\circ$ , вводилась поправка на число ШАЛ, равная  $K(\Theta)^{-1}$  с учетом средней статистической ошибки  $K(\Theta)$ .

Рассматривались события в диапазонах по  $\delta = [-15^\circ, +90^\circ]$  и  $\alpha = [0^\circ, 360^\circ]$ .

Для каждого интервала  $\delta$  и  $\alpha$  (в ячейке  $5^\circ \times 7.5^\circ$ ) вычислены значения  $\sigma$  – стандартной ошибки отклонения от среднего значения числа ШАЛ. Проводился поиск направлений, в которых избыток ШАЛ превышает определенное число стандартных отклонений от среднего.

Получены карты, на которых в экваториальных координатах  $\delta$  и  $\alpha$  выделены направления прихода ШАЛ, где отклонение от среднего числа событий составляет:  $[1.6-2.0] \cdot \sigma$ ,  $[2.0-3.0] \cdot \sigma$  и  $> 3.0 \cdot \sigma$ .

В настоящей работе все события были разделены на две группы по  $N_e$ .

На рис. 1 показаны результаты для первой группы ШАЛ со средним значением  $N_e = 2.5 \cdot 10^5$  ( $E_0 \approx 7 \cdot 10^{14}$  эВ), а на рис. 2 – для второй группы со средним значением  $N_e = 8 \cdot 10^4$ , ( $E_0 \approx 2 \cdot 10^{14}$  эВ).

Число ячеек, где имеются эти отклонения, несколько превышает стандартное (ожидаемое по “нормальному” закону). Часть из них могут быть направлениями на источники ПКИ, откуда приходят ливни, образованные первичными нейтральными частицами ( $\gamma$ -квантами).

*Обсуждение и выводы. Сравнение с другими экспериментальными данными и положением некоторых космических объектов.* Мы сравнили наши результаты с данными,

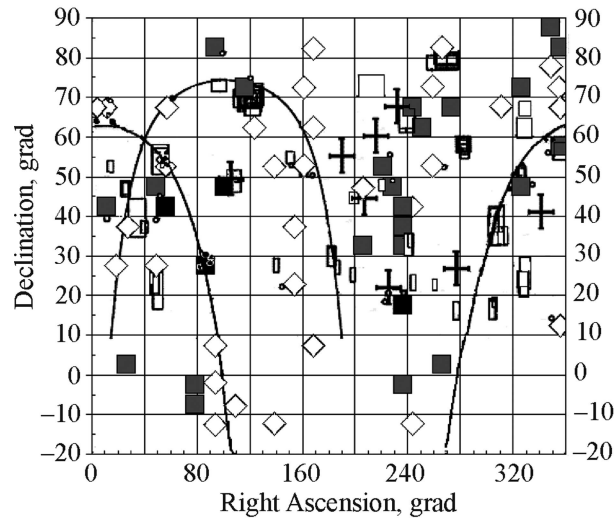


Рис. 1: Направления на возможные источники ПКИ (эваториальные координаты). Настоящая работа ( $E_0 \approx 7 \cdot 10^{14}$  эВ): стандартное отклонение ( $\sigma$ ): черные квадраты:  $> 3\sigma$ , серые квадраты:  $(2.0 - 3.0)\sigma$ , белые ромбы:  $(1.6 - 2.0)\sigma$ . Работа [7]:  $E_0 = (4 - 6) \cdot 10^{14}$  эВ. Кресты (ливни без мюонов и адронов). Работа [8]: “ШАЛ МГУ”.  $E_0 \approx 10^{15}$  эВ. Черно-белые прямоугольники разной площади – области с повышенной интенсивностью ШАЛ. Белые кружки – пульсары, черные точки – остатки сверхновых. Кривыми линиями показаны плоскости Галактики и Сверхгалактики.

полученными ранее на основной комплексной Тянь-Шаньской установке “ШАЛ” в работе [7]. В этой работе для выделения ливней от первичных гамма-квантов отбирались события, не содержащие мюонов и адронов. Комплексная установка “ШАЛ” [3] кроме электронов регистрировала мюоны с энергией больше 5 ГэВ и адроны с энергией свыше 30 ГэВ. В работе [7] из 7700 ШАЛ, оси которых прошли непосредственно через калориметр (площадь  $36 \text{ м}^2$ ) были обнаружены 8 событий от ПКИ с  $E_0 = (4 - 6) \cdot 10^{14}$  эВ, в которых отсутствовали мюоны и адроны. Их координаты (направления на возможные источники) изображены на рис. 1 крестами. Направления некоторых из них совпадают (в пределах точности измерений) с выделенными направлениями в нашей работе.

Затем было проведено сопоставление наших данных с результатами [8], полученными в НИИ ядерной физики МГУ на установках “ШАЛ МГУ” и “ПРО-1000”. В работе [8] на карте неба представлены области с повышенной интенсивностью ШАЛ (светлые прямоугольники разного размера на рис. 1, 2). Способ отбора этих областей описан в [8]. Мы совместили на рис. 1 наши данные для больших энергий ( $E_0 \approx 7 \cdot 10^{14}$  эВ) с данными

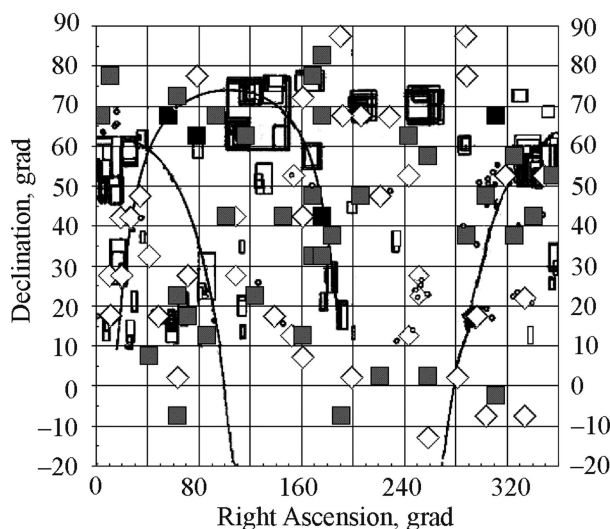


Рис. 2: Направления на возможные источники ПККИ (эваториальные координаты). Настоящая работа ( $E_0 \approx 2 \cdot 10^{14}$  эВ): стандартное отклонение ( $\sigma$ ): черные квадраты:  $> 3\sigma$ , серые квадраты:  $(2.0 - 3.0)\sigma$ , белые ромбы:  $(1.6 - 2.0) \cdot \sigma$ . Работа [8]: “ПРО-1000”. ( $E_0 \geq 2 \cdot 10^{14}$  эВ). Черно-белые прямоугольники разной площади – области с повышенной интенсивностью ШАЛ. Белые кружки – пульсары, черные точки – остатки сверхновых. Кривыми линиями показаны плоскости Галактики и Сверхгалактики.

“ШАЛ МГУ” при  $N_e = (1 - 1.6) \cdot 10^5$  ( $E_0 \approx 10^{15}$  эВ), а на рис. 2 наши данные для меньших энергий ( $E_0 \approx 2 \cdot 10^{14}$  эВ) – с данными “ПРО-1000”  $N_e = (2 - 3) \cdot 10^4$  ( $E_0 \geq 2 \cdot 10^{14}$  эВ).

Направление с координатами  $\{\alpha = 235^\circ - 245^\circ, \delta = 62^\circ - 67^\circ\}$  выделено во всех четырех экспериментах (рис. 1): в нашей работе (избыток ШАЛ равен  $2.6 \cdot \sigma$ ), в работе [8] на обеих установках: как на “ШАЛ МГУ”, так и “ПРО-1000”, а в работе [7] в этой области зарегистрирован ШАЛ от первичных гамма-квантов, не содержащий мюонов и адронов.

В статье [8] особо отмечалась надежность выделенных координат  $\{\alpha = 120^\circ, \delta = 70^\circ\}$  и  $\{\alpha = 183^\circ, \delta = 30^\circ\}$ , где совпадают области с избытком ливней, обнаруженным на установках как “ШАЛ МГУ”, так и “ПРО-1000”. При дополнительном анализе и увеличенном массиве данных в этой работе, по сравнению с предыдущей [9], в первом направлении избыток ШАЛ превышает  $2.7 \cdot \sigma$  (рис. 1). Здесь расположен пульсар J0814+7429. Однако, во втором – существенного избытка не обнаружено. Есть еще ряд областей, где наблюдался повышенный поток ШАЛ установками и “ШАЛ МГУ” и “ПРО-1000”, которые совпадают с нашими результатами. Вблизи некоторых из этих

областей находятся пульсары, например: J2308+5547, J1549+2113 (рис. 1) [10].

В настоящей работе не обнаружено существенного увеличения числа ШАЛ от протяженного остатка сверхновой звезды, около центра которого находится молодой радиопульсар PSR B0656+14 [11].

На рис. 1, 2 нанесены некоторые пульсары (например, J0323+3944, J1115+5030 [10]) и галактические остатки вспышек сверхновых, расположенные вблизи тех направлений, где нами зарегистрирован избыток ШАЛ. Большинство этих пульсаров находятся на небольших расстояниях от Солнечной системы ( $\leq 3$  кпк).

Некоторые из выделенных нами направлений, совпадающие с другими экспериментами, а также с положением пульсаров и галактических остатков вспышек сверхновых, служат указанием на возможное положение источников ПКИ.

Авторы благодарят коллективы сотрудников КФКИ и Тянь-Шаньской станции ФИАН, принимавших участие в создании установки и проведении измерений, сотрудников Института ядерных исследований и атомной энергетики Болгарской академии наук, предоставивших высокостабильные газоразрядные счетчики, а также В. П. Павлюченко, С. Б. Попова, А. В. Урысон, К. В. Кусимова за консультации и помощь в процессе работы.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. E. Chudakov, V. I. Zatsepin, N. M. Nesterova, et al., J. Phys. Soc. Japan **17**, Suppl. A-111, 106 (1962).
- [2] N. M. Nesterova, A. P. Chubenko, P. A. Djatlov, et al., Proc. 24th ICRC, Roma **2**, 748 (1995).
- [3] D. S. Adamov, D. N. Afanasijev, V. V. Arabkin, et al., Proc. 20th ICRC, Moscow **5**, 460 (2004).
- [4] J. Koch, J. Kota, A. Somogyi, et al., KFKI-70 NEP P7, 1 (1970).
- [5] Д. Бенко, А. Варга, С. И. Никольский и др., Изв. РАН, Сер. физ. **68**(11), 1599 (2004).
- [6] К. В. Баркалов, П. В. Ставрев, Н. М. Нестерова и др., Препринт ФИАН N 19 (М., ФИАН, 1988).
- [7] J. N. Stamenov, S. Z. Ushev, S. I. Nikolsky, et al., Proc. 18th ICRC, Bangalore **6**, 54 (1983).

- [8] Г. В. Куликов и М. Ю. Зотов, Изв. РАН, Сер. физ. **73**(5), 612 (2009).
- [9] А. Варга, Е. Н. Гудкова, Н.М. Нестерова и др., Изв. РАН, Сер. физ. **75**(3), 368 (2011).
- [10] The ATNF Pulsar Database, <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>; R.N. Manchester, G.V. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, *Astrophys. J.* **129**, 1993 (2005).
- [11] S. E. Thorsett et al., *Astrophys. J. Lett.* **5**, 14 (2003).

Поступила в редакцию 1 марта 2011 г.