

**ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СУГ X-3  
И  $\gamma$ СУГНИ SNR ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ  
ЗЕРКАЛЬНЫМИ ЧЕРЕНКОВСКИМИ ТЕЛЕСКОПАМИ  
ШАЛОН**

В. Г. Синицина, В. Ю. Синицина\*

*Область Лебеда (Сугнус X) содержит ряд мощных источников радио- и рентгеновского излучения, которые также рассматривают как потенциальные источники излучения высоких и сверхвысоких энергий. Одним из таких источников является массивная двойная система Суг X-3, систематически наблюдаемая на телескопе ШАЛОН с 1995 года по настоящее время. Результаты наблюдений Суг X-3 представлены спектрами  $\gamma$ -излучения и изображениями при энергиях 800 ГэВ – 85 ТэВ. В поле зрения телескопа ШАЛОН был обнаружен источник  $\gamma$ -излучения сверхвысоких энергий, располагающийся в  $\sim 2^\circ$  от Суг X-3 и по своим координатам совпадающий с известным источником радио- и рентгеновского излучения – остатком сверхновой  $\gamma$ Сугни SNR. Представлены спектры, спектральное энергетическое распределение и изображение  $\gamma$ Сугни SNR по данным телескопа ШАЛОН в диапазоне энергий 800 ГэВ – 50 ТэВ.*

**Ключевые слова:** остатки сверхновых,  $\gamma$ Сугни SNR, G78.2+2.1, массивная двойная система Суг X-3.

*Массивная двойная система CYGNUS X-3. Cygnus X-3 – пекулярная двойная рентгеновская система, открытая более 40 лет. Этот объект наблюдается во всём диапазоне электромагнитного спектра (рис. 1, [1]). Это один из наиболее ярких рентгеновских источников, проявляющий как быструю переменность, так и длительные периоды высокой и низкой интенсивности излучения. Также он является наиболее сильным источни-*

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; \*e-mail:sinits@sci.lebedev.ru.

ком радиоизлучения среди рентгеновских двойных систем; обнаруживает и гигантские радиовыбросы и релятивистские джеты. При этом активность в радиодиапазоне тесно связана с рентгеновским излучением на различных периодах [2, 3]. В настоящее время известно, что эта массивная двойная система состоит из звезды типа Вольфа–Райе [4] и компактного объекта, который, возможно, является чёрной дырой. Однако природа компактного объекта до настоящего времени не установлена [5]. Основываясь на регистрации высокоэнергичных гамма-лучей, было высказано предположение о том, что Cyg X-3 может быть одним из наиболее мощных источников заряженных частиц космических лучей в Галактике [6]. Впервые попытки детектирования ТэВ излучения от Cyg X-3 были предприняты в середине семидесятых и продолжались до середины 80-х годов. Два проекта были чрезвычайно важны: это Kiel [7] и выполненные в это же время наблюдения Haverá Park [8]. Результаты этих двух экспериментов показали очень большой поток при ультравысоких энергиях. Именно эти результаты стимулировали создание многих новых установок для исследований при сверхвысоких энергиях [9–13].

На высокогорном (3340 м) зеркальном черенковском телескопе ШАЛОН ведутся уникальные долговременные наблюдения массивной двойной системы Cygnus X-3. Наблюдения такого класса объектов при сверхвысоких энергиях необходимы для понимания процессов формирования и динамики зон активности при высоких плотностях и сильных магнитных полях в источниках. Рентгеновская двойная система Cyg X-3 систематически наблюдается телескопом ШАЛОН с 1995 года [13–15] (всего 246 часов) со средним значением потока  $\gamma$ -квантов  $F(E_0 > 0.8 \text{ ТэВ}) = (6.8 \pm 0.5) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [16–25]. Достоверность регистрации Cyg X-3 телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ составляет  $29.8\sigma$  по определению Li&Ma [26]. Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов в наблюдаемом диапазоне энергий от 0.8 ТэВ до 85 ТэВ описывается единым степенным законом  $F(E_0 > 0.8 \text{ ТэВ}) \sim E^{k_\gamma}$ , где  $k_\gamma = -1.25 \pm 0.10$  (см. рис. 2(а)). Наблюдения проводились по стандартной для телескопа ШАЛОН методике получения информации о фоне космических лучей и ливнях, инициированных  $\gamma$ -квантами, в одном и том же сеансе наблюдений. В 2006 году Cyg X-3 вошёл в фазу вспышечной активности в радио- и рентгеновском диапазоне энергий и в мае–июле 2006 года телескопом ШАЛОН наблюдалось существенное увеличение потока  $\gamma$ -квантов при энергиях выше 0.8 ТэВ:  $(1.47 \pm 0.24) \times 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [20, 22, 25]. Ранее, в 2003 и 1997 годах, также наблюдалось увеличение потока до значений  $(1.79 \pm 0.33) \times 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $(1.2 \pm 0.5) \times 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  соответственно [20, 22, 25]. По данным наблюдений телескопом ШАЛОН были обнаружены выбросы-джеты, напоминающие джеты квазаров и активных галактик [22, 25]

(см. рис. 2(б), (в)). Последние повышения потока источника были отмечены в мае 2009 года и октябре 2011. Они коррелировали с активностью Суг X-3 в области низких энергий в рентгене и с активностью, наблюдаемой при высоких энергиях телескопом Fermi LAT [27]. Переменность излучения, а также корреляция активности источника в широком диапазоне энергий может нести существенную информацию как о природе источника, так и о механизмах генерации частиц вплоть до сверхвысоких энергий.

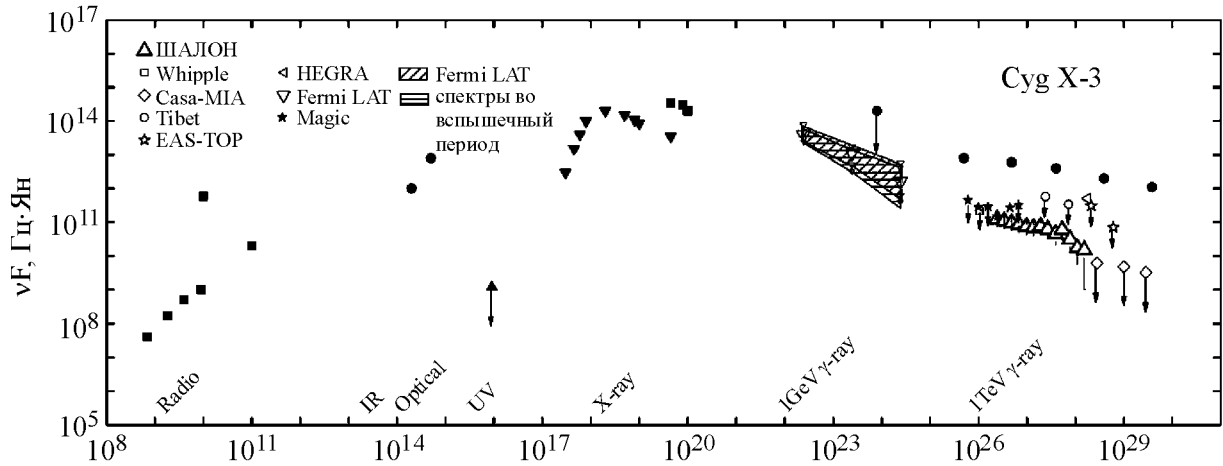


Рис. 1: Спектральное энергетическое распределение гамма-излучения от Суг X-3.  $\Delta$  – данные наземного черенковского телескопа ШАЛОН (за период 1995 – 2012 гг.) в сравнении с данными других экспериментов (см. текст). Чёрные точки представляют архивные данные из [1]. Стрелка означает, что точка является верхним пределом.

*Остаток сверхновой  $\gamma$  Cygni SNR.* Область Лебеда (Cygnus-X), к которой относится и описанная двойная система Суг X-3, содержит ряд потенциальных источников ГэВ-го и ТэВ-го излучения, некоторые из которых были обнаружены при высоких энергиях телескопом Fermi LAT [28–30] и ранее телескопом EGRET [31, 32], а также при сверхвысоких энергиях ( $\sim 35$  ТэВ) установкой Milagro [33] и черенковскими телескопами Whipple [34] и HEGRA [35].

В поле зрения телескопа ШАЛОН на расстоянии  $\sim 2^\circ$  на юго-запад от Суг X-3 находится известный источник радио- и рентгеновского излучения, остаток сверхновой (ОСН)  $\gamma$  Cygni SNR (или G78.2+2.1). Таким образом, благодаря большому полю зрения телескопа ШАЛОН ( $> 8^\circ$ ), наблюдения Суг X-3 автоматически сопровождаются наблюдениями ОСН  $\gamma$  Cygni.

$\gamma$  Cygni SNR – близкий остаток сверхновой оболочечного типа (1–2 кпк), который имеет угловые размеры  $\sim 1^\circ$  и оболочечную структуру, видимую в радио- и рентгенов-

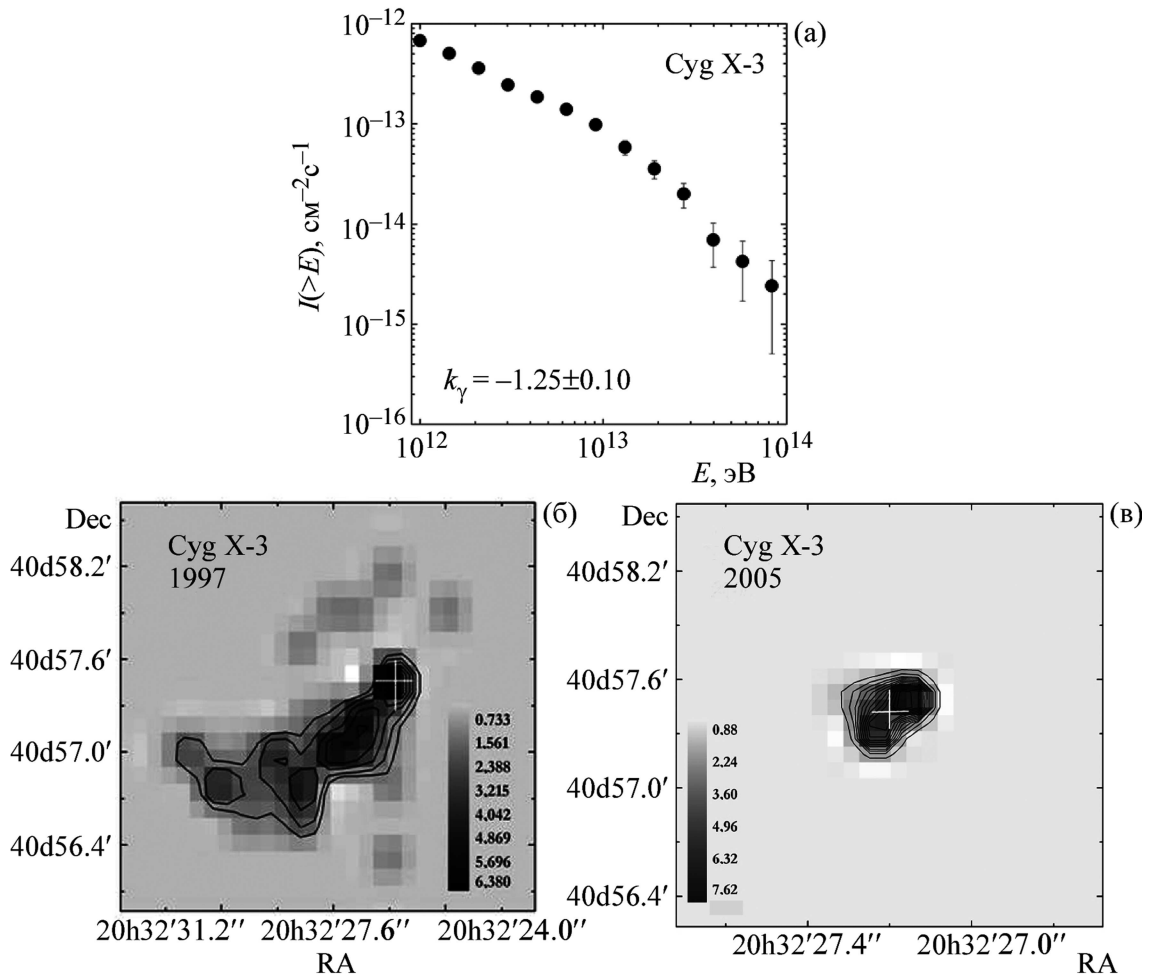


Рис. 2: (а) Спектр гамма-излучения от *Cyg X-3* по данным телескопа ШАЛОН за весь период наблюдений со степенным показателем  $k_\gamma = -1.25 \pm 0.10$ . Изображения источника *Cyg X-3* при энергиях  $> 0.8$  ТэВ по данным ШАЛОН; (б) активный период 1997 года и (в) спокойный период – 2005 год. Цветовая шкала в единицах превышения над минимальным детектируемым сигналом.

ском диапазоне энергий [36].  $\gamma$ Cygni SNR существенно старше таких остатков сверхновых как Cas A и Tycho's SNR, его возраст оценивается как 5000–7000 лет [36, 37] и, предположительно, ОСН  $\gamma$ Cygni находится на стадии раннего адиабатического расширения. Наблюдения остатков сверхновых на разных этапах эволюции могут помочь в установлении механизмов ускорения космических лучей до энергий вплоть до  $10^{15}$  эВ.

Как источник, сопровождающий *Cyg X-3*,  $\gamma$ Cygni SNR систематически наблюдается телескопом ШАЛОН (с 1995 по настоящее время) в ясные безлунные ночи под зенит-

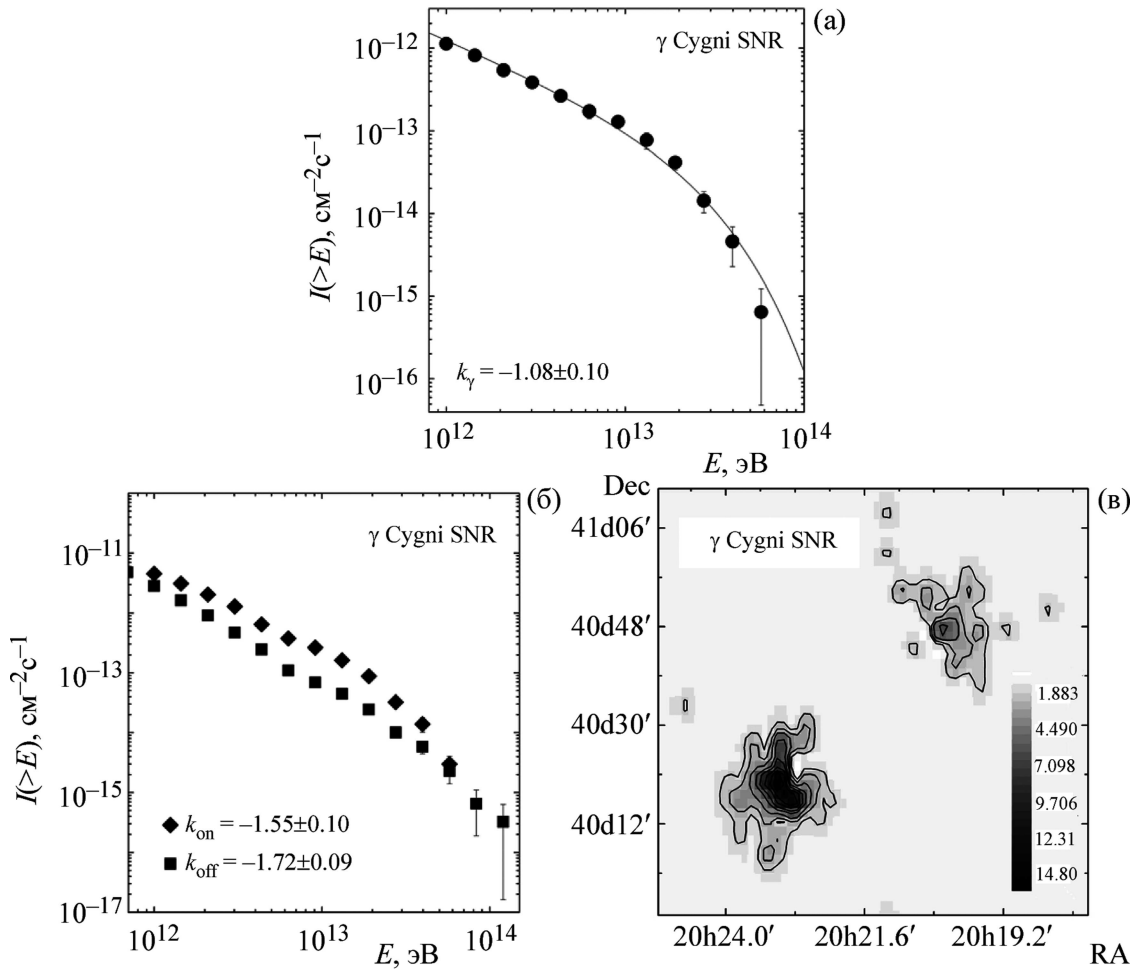


Рис. 3: (а) Спектр гамма-излучения от  $\gamma$  Cygni SNR (см. пояснения в тексте); (б) спектр событий от  $\gamma$  Cygni SNR, прошедших критерии отбора, без вычета фона с показателем  $k_{ON} = -1.55 \pm 0.10$  и спектр фоновых событий, наблюдаемых одновременно с источником, с показателем  $k_{OFF} = -1.72 \pm 0.09$ ; (в) изображение источника гамма-квантов  $\gamma$  Cygni SNR в области энергий  $> 0.8$  ТэВ, полученное с помощью телескопа ШАЛОН (цветовая шкала в единицах превышения над минимальным детектируемым сигналом).

ными углами от 5 до 35 градусов. Наблюдения проводились по стандартной для телескопа ШАЛОН методике получения информации о фоне космических лучей и ливнях, инициированных  $\gamma$ -квантами, в одном и том же сеансе наблюдений. Основой способа выделения ливней от  $\gamma$ -квантов на в  $\sim 10^3$  раз большем фоне ливней, генерируемых космическими лучами, служит различие каскадных процессов их образования и погло-

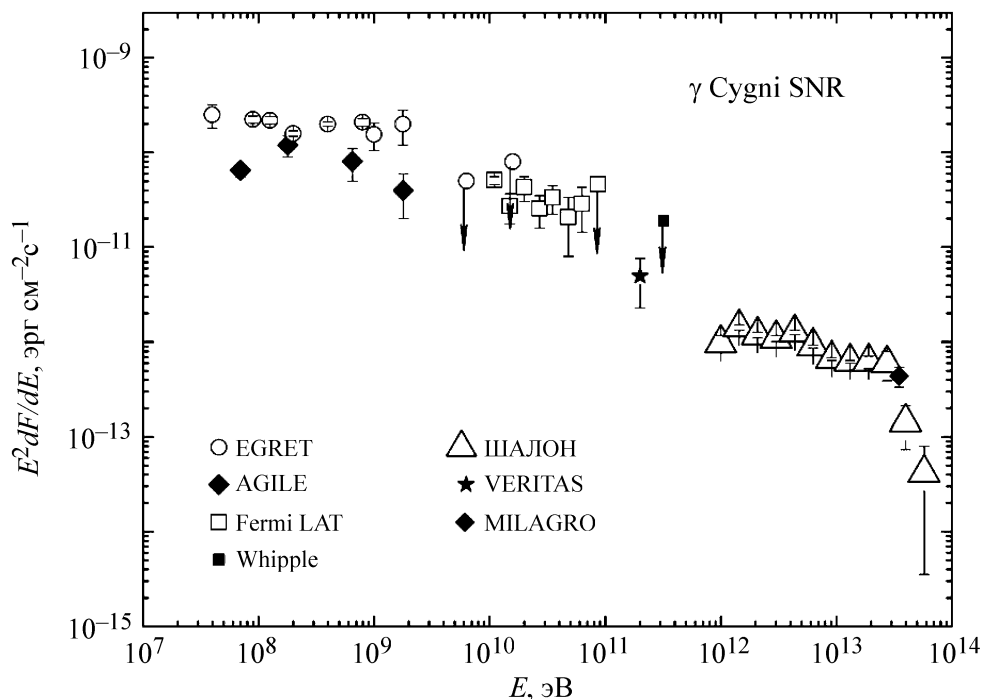


Рис. 4: Спектральное энергетическое распределение гамма-излучения от  $\gamma$  Cygni SNR.  $\Delta$  – данные наземного черенковского телескопа ШАЛОН в сравнении с данными других экспериментов (см. текст).

щения в атмосфере. Выделение электронно-фотонных ливней среди ШАЛ, образованных протонами и ядрами космических лучей, улучшается путем увеличения точности определения направления оси ливня, которое соответствует направлению на источник первичных  $\gamma$ -квантов. Методика выделения  $\gamma$ -ливней из ливней, генерированных протонами и ядрами космических лучей, используемая в эксперименте ШАЛОН, позволяет отсекал 99.92% фона [12, 38]. При обработке данных наблюдений  $\gamma$  Cygni SNR был зарегистрирован телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне  $14\sigma$ , определяемом по Li&Ma [26]. Достоверность регистрации в данном случае ниже, чем у источников с данным потоком и спектром за указанное количество часов наблюдений, т.к. источник наблюдался в меньшем эффективном поле зрения по сравнению со стандартной процедурой наблюдения источников в эксперименте ШАЛОН [13, 38]. Соответствующие поправки на эффективное поле зрения внесены при определении характеристик источника. Среднее значение потока при энергиях больше 0.8 ТэВ для  $\gamma$  Cygni SNR составляет  $I_{\gamma Cygni SNR} = (1.27 \pm 0.11) \times 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  (рис. 3(а)). На рис. 3(б) представлены как спектры ON-событий так и OFF-событий (фона), необходимых для

получения спектра  $\gamma$ -квантов, излучаемых ОЧН  $\gamma$ Cygni. Спектр  $\gamma$ -квантов, излучаемых  $\gamma$ Cygni SNR (рис. 3(a)), получен вычитанием спектра фоновых событий, зарегистрированных одновременно с наблюдениями источника –  $I_{\text{Off}} \propto E^{\text{koff}}$ , из спектра событий, пришедших от источника  $I_{\text{On}} \propto E^{\text{kon}}$ . При обработке данных наблюдений Cyg X-3 по критериям отбора с привязкой к самому Cyg X-3 и с привязкой к  $\gamma$ Cygni SNR, количество  $\gamma$ -ливней общих для первого и второго источника составило 2.4%. Распознавание принадлежности общих ливней к каждому из перечисленных источников произведено по определению углового расстояния между направлением прихода ливня и координатами источника. В результате количество  $\gamma$ -ливней от Cyg X-3 уменьшилось на  $\sim 1\%$ , что не меняет величину приведённого выше потока гамма-излучения от источника.

Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов остатка сверхновой  $\gamma$ Cygni в наблюдаемом диапазоне энергий от 0.8 ТэВ хорошо описывается степенным законом с экспоненциальным обрезанием  $I(> E_{\gamma}/(1 \text{ ТэВ})) = (1.12 \pm 0.11) \times 10^{-12} \times (E_{\gamma}/(1 \text{ ТэВ}))^{-0.93 \pm 0.09} \exp(-E_{\gamma}/20 \text{ ТэВ})$ . Энергетический спектр остатка сверхновой  $\gamma$ Cygni SNR в диапазоне энергий 0.8–28 ТэВ,  $F(E_0 > 0.8 \text{ ТэВ}) \propto E^{k_{\gamma}}$ , где  $k_{\gamma} = -1.08 \pm 0.10$  (см. рис. 3(a)). Также представлено изображение источника в ТэВ-ом диапазоне энергий, полученное с помощью телескопа ШАЛОН, и энергетическое изображение  $\gamma$ Cygni SNR (рис. 3(в)). Анализ направлений прихода  $\gamma$ -ливней выявил две области излучения в  $\gamma$ Cygni SNR: основная на юго-востоке оболочки ОЧН, и вторая на севере. В  $\gamma$ Cygni SNR при энергиях  $> 0.8$  ТэВ область наибольшего энерговыделения и область максимальной интенсивности излучения  $\gamma$ -квантов совпадают. При рассматриваемых энергиях основной вклад как в поток частиц, так и в поток по энергии даёт область юго-восточного края оболочки источника.

В области высоких энергий данные по  $\gamma$ Cygni SNR были получены в разные годы, на спутниковых экспериментах EGRET в 1995 [31, 32], Fermi LAT (2009–2011) [30], AGILE (2010) [39]; на наземном телескопе VERITAS [40] при энергии 200 ГэВ был зарегистрирован протяжённый источник VERJ2019+407, коррелирующий с положением северной части оболочки ОЧН. При сверхвысоких энергиях  $\sim 35$  ТэВ излучение из области ОЧН было обнаружено на установке MILAGRO [33]. На рис. 4 представлено сравнение спектрального энергетического распределения Cygni SNR по данным телескопов ШАЛОН (1995–2012), EGRET (1995) [32], AGILE (2010) [39], Fermi LAT (2009–2011) [28–30], VERITAS (2009)[40], MILAGRO (2011) [33].

*Заключение.* Представлены результаты наблюдений области Лебеда с центральным объектом Cyg X-3. Двойная система Cyg X-3 систематически наблюдается на телеско-

пе ШАЛОН с 1995 года по настоящее время и получены спектры и изображения в широком диапазоне энергий от 800 ГэВ до 85 ТэВ. Были зарегистрированы вспышки излучения, коррелирующие с активностью источника в области низких энергий в рентгене и с активностью, наблюдаемой при высоких энергиях телескопом Fermi LAT. По данным наблюдений телескопом ШАЛОН были обнаружены выбросы-джеты, напоминающие джеты квазаров и активных галактик. Обнаружен источник излучения с энергиями 800 ГэВ – 50 ТэВ, располагающийся на расстоянии  $2^\circ$  от Cyg X-3, и положение которого согласуется по своим координатам с остатком сверхновой  $\gamma$ Cygni SNR (G78.2+2.1); представлены его основные характеристики.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] F. A.-D. Cordova, *Los Alamos Science*, Spring, 39 (1986).
- [2] M. L. McCollough, C. R. Robinson, and S. N. Zhang, *Astrophys. J.* **517**, 951 (1999).
- [3] S. A. Trushkin, N. A. Nizhelskij, N. N. Bursov and E. K. Majorova, *Proc. of IAU Symposium No. 238, 2006 "Black Holes from Stars to Galaxies – Across the Range of Masses"* eds. V. Karas & G. Matt (International Astronomical Union, 2007), p. 463.
- [4] M. H. van Kerkwijk, P. A. Charles, T. R. Geballe et al., *Nature* **355**, 703 (1992).
- [5] A. M. Cherepashchuk and A. F. J. Moffat, *Astrophys. J.* **454**, L53 (1994).
- [6] J. W. Cronin, *Nuovo Cimento* **19C**, 847 (1996).
- [7] M. Samorscki and W. Stamm, *Astrophys. J.* **268**, L17 (1983).
- [8] J. Lloyd-Evans, R. N. Coy, A. Lambert et al., *Nature*.**305**, 784 (1983).
- [9] A. M. Hillas, *Nuovo Cimento* **19C**, 701 (1996).
- [10] A. M. Hillas, *Nature* **312**, 50 (1984).
- [11] C. M. Hofman, C. Sinnis, P. Fleury, et al., *Rev. Mod. Phys.* **71**, 897 (1999).
- [12] Ю. И. Нешпор, А. В. Жовтан, Н. А. Жоголев и др., *Изв. РАН (Сер. Физ.)* **73**(5), 694 (2009).
- [13] V. G. Sinitsyna, *Nuovo Cimento* **19C**, 965 (1996).
- [14] V. G. Sinitsyna, *Proc. of Towards a Major Cherenkov Detector-V*, ed. O.C. de Jager (Wesprint-Potchefstrom, South Africa, 1997), vol. 3, p. 273.
- [15] А. Ю. Алавердян, Р. М. Мирзафатихов, В. Г. Синицина и др., *Изв. РАН (Сер. Физ.)* **61**(3), 603 (1997).
- [16] V. G. Sinitsyna et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **175–176**, 544 (2008); **151**, 489 (2006); **122**, 247, 409 (2003); **97**, 215, 219 (2001); **75A**, 352 (1999).
- [17] V. G. Sinitsyna, *Proc. 16th European Cosmic Ray Symposium*, ed. J. Medina (Alcalá de Henares:Universidad de Alcalá, Spain, 1998), p. 383, 367.
- [18] V. G. Sinitsyna, *AIP (Conf. Proc.)* **515**, 205, 293 (2000).



- [19] V. G. Sinitsyna, S. I. Nikolsky, et al., *The Universe viewed in Gamma Rays*, Eds. R. Enomoto, M. Mori (Universal Academy Press, INC, 2003), p. 211, 235.
- [20] V. G. Sinitsyna, *Journal of the Physical Society of Japan, Supplement A* **78**, 92 (2009).
- [21] С. И. Никольский, В. Г. Сеницина, *Ядерная физика* **67**(10), 1923 (2004).
- [22] В. Г. Сеницина, С. И. Никольский, В. Ю. Сеницина и др., *Изв. РАН (Сер. Физ.)* **69**(3), 422, (2005); **75**(3), 467 (2011).
- [23] V. G. Sinitsyna et al., *Int. J. Mod. Phys. A* **29**, 7023 (2005).
- [24] V. G. Sinitsyna, *Rad. Phys. and Chem.* **75**, 880 (2006).
- [25] V. G. Sinitsyna, V. Y. Sinitsyna, et al., *Proc. 32nd International Cosmic Ray Conference (Beijing, China)* (International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), 2011), vol. 7/11, p. 67.
- [26] T-P. Li and Y-Q. Ma, *Astrophys. J.* **272**, 317 (1983).
- [27] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Science* **326**, 1512 (2009).
- [28] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **187**, 460 (2010).
- [29] P. L. Nolan, A. A. Abdo, M. Ackermann, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 31 (2012) (second catalogue).
- [30] J. Lande, M. Ackermann, A. Allafort, et al., *Astrophys. J.* **756**(1), 5 (2012).
- [31] D. J. Thompson, D. L. Bertsch, B. L. Dingus, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **101**, 259 (1995).
- [32] J. A. Esposito, S. D. Hunter, G. Kanbach, and P. Sreekumar, *Astrophys. J.* **461**, 820 (1996).
- [33] A. A. Abdo, B. T. Allen, T. Aune, et al., *Astrophys. J.* **734**, 28 (2011).
- [34] J. H. Buckley, C. W. Akerlof, D. A. Carter-Lewis, et al., *Astron. & Astrophys.* **329**, 639 (1998).
- [35] C. Prosch, E. Feigl, R. Plaga, et al., *Astron. & Astrophys.* **314**, 275 (1996).
- [36] Т. А. Лозинская, В. В. Правдикова и А. В. Финогенов, *Письма в Астрономический Журнал* **26**(2), 102 (2000).
- [37] Y. Uchiyama, T. Takahashi, F. A. Aharonian, and J. R. Mattox, *Astrophys. J.* **571**, 866 (2002).
- [38] В. Г. Сеницина и В. Ю. Сеницина, *Письма в Астрономический Журнал* **37**(9), 676 (2011).
- [39] A. W. Chen, G. Piano, M. Tavani, et al., *Astron. & Astrophys.* **525**, A33 (2011).
- [40] A. Weinstein, *ArXiv:0912.4492*. 2009.

Поступила в редакцию 5 апреля 2013 г.