

УДК 523.165

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ОСТАТКОВ СВЕРХНОВЫХ ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ ЗЕРКАЛЬНЫМИ ЧЕРЕНКОВСКИМИ ТЕЛЕСКОПАМИ ШАЛОН

В. Г. Синицина, В. Ю. Синицина

*Исследование источников гамма-квантов сверхвысоких энергий любыми методами, в том числе и зеркальными черенковскими телескопами, затрагивают проблему природы космических лучей и роль Галактики в их генерации. В наблюдениях телескопом ШАЛОН высокоточной обсерватории на Тянь-Шане получены спектральные энергетические распределения и изображения галактических остатков сверхновых оболочечного типа, находящихся на разных этапах эволюции, GK Per (Nova 1901), Тихо, Cas A,  $\gamma$ Cygni SNR и IC 443. Экспериментальные данные подтвердили предсказание теории об адронном механизме генерации гамма-квантов сверхвысоких энергий в остатках сверхновых Тихо, Cas A и IC 443.*

**Ключевые слова:** остатки сверхновых, GK Per (Nova 1901), Tycho's SNR, Cas A,  $\gamma$ Cygni SNR (G78.2+2.1), IC 443.

*Введение.* Большим достижением гамма-астрономии стала регистрация гамма-квантов от целого ряда галактических объектов, что даёт информацию для изучения источников космических лучей. С самого начала физики космических лучей была широко распространена гипотеза о том, что остатки сверхновых (ОСН) являются уникальными кандидатами в источники генерации и ускорения космических лучей. Присутствие электронной компоненты космических лучей видно по излучению, генерируемому ею в остатке сверхновой в широком диапазоне длин волн от радио до  $\gamma$ -излучения средних энергий, тогда как ядерная компонента космических лучей может быть обнаружена только по  $\gamma$ -излучению сверхвысоких энергий. Так гамма-астрономические наблюдения помогут в решении проблемы происхождения космических лучей.

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

Представлены результаты наблюдений галактических остатков сверхновых оболочечного типа Тихо, Cas A,  $\gamma$ Cygni SNR, IC 443 и, находящейся на самом раннем этапе эволюции ОСН, классической новой GK Per, полученных с помощью зеркального черенковского телескопа ШАЛОН.

*GK Per (Nova 1901)*. Nova Persei 1901 (GK Per) одна из наиболее интенсивно наблюдаемых и изучаемых во всём широком диапазоне электромагнитного спектра оболочек классических новых. Оптические данные [1] демонстрируют взаимодействие выбросов новой и окружающего газа. Более того, остаток новой был зарегистрирован радиотелескопом VLA как источник нетеплового, поляризованного радиоизлучения [2]. Результаты этих наблюдений демонстрируют существование сжатой ударной волны межзвёздной среды. В рентгене оболочка вокруг GK Per впервые была открыта в наблюдениях ROSAT, а затем наблюдения продолжились телескопом Chandra [3]. В наблюдениях Chandra, в частности, было обнаружено рентгеновское излучение от той же популяции электронов, что генерируют и радиоизлучение. Обнаружение рентгеновских лучей от оболочки остатка сверхновой, происходящих первично от тормозного излучения релятивистских электронов, ускоренных на ударной волне, предполагает существование  $\gamma$ -излучения как в результате  $\pi^0$ -распада, так и вторичных  $pp$ -взаимодействий [4], а также возможного вклада от обратного комптоновского рассеяния [4]. Результаты наблюдений Chandra показали, что GK Per имеет сходство с классом остатков сверхновых, которые взаимодействуют с молекулярными облаками, подобно ОСН IC 443 ( $(3 - 30) \times 10^3$  лет), но находящихся на более ранних этапах эволюции.

В рамках долгосрочных исследований метагалактических источников  $\gamma$ -излучения, на высокогорных зеркальных черенковских телескопах ШАЛОН проведены наблюдения активной галактики NGC 1275 – центральной галактики Скопления Персея [5–10]. В поле зрения телескопа ШАЛОН, на расстоянии  $\sim 3^\circ$  на север от NGC 1275, находится известный источник нетеплового радио- и рентгеновского излучения, остаток классической новой GK Per (или Nova 1901). Таким образом, благодаря большому полю зрения телескопа ШАЛОН,  $> 8^\circ$ , наблюдения NGC 1275 автоматически сопровождаются наблюдениями GK Per.

Как источник, сопровождающий NGC 1275, GK Per систематически наблюдается телескопом ШАЛОН (111 часов с 1996 по 2012 год) в ясные безлунные ночи под зенитными 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. Методика выделения

$\gamma$ -ливней из ливней, генерированных протонами и ядрами космических лучей, используемая в эксперименте ШАЛОН, позволяет отсекают 99.92% фона [5–7]. При обработке данных наблюдений, ГК Per был зарегистрирован телескопом ШАЛОН при энергиях больше 2 ТэВ на уровне  $9.2\sigma$ , определяемом по Li&Ma [11]. 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 [5–7]. Соответствующие поправки на эффективное поле зрения внесены при определении характеристик источника. Среднее значение потока гамма-квантов при энергиях больше 2 ТэВ для ГК Per составляет  $I_{\text{GK Per}} = (2.9 \pm 1.3) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  (рис. 1 (а)). На рис. 1(б) представлены спектры как ON-событий, так и OFF-событий, необходимых для получения спектра  $\gamma$ -квантов, излучаемых ГК Per. Спектр  $\gamma$ -квантов, излучаемых ГК Per (рис. 1(а)), 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 NGC 1275 по критериям отбора относительно самого NGC 1275 и с привязкой к ГК Per, количество  $\gamma$ -ливней, общих и для первого и второго источника, составило менее 1%. Распознавание принадлежности общих ливней к каждому из перечисленных источников произведено по определению углового расстояния между направлением прихода ливня и координатами источника [5]. В результате количество  $\gamma$ -ливней от NGC 1275 уменьшилось на  $< 0.5\%$ , что не меняет величину приведённого в работах [5, 9, 10] потока  $\gamma$ -излучения от этого источника.

Интегральный спектр остатка сверхновой ГК Per в диапазоне энергий 2–15 ТэВ,  $F(E_0 > 2 \text{ ТэВ}) \propto E^{k_\gamma}$ , где  $k_\gamma = -1.90 \pm 0.35$ , приведён на рис. 1(а). На рис. 2 представлено спектральное энергетическое распределение ГК Per (рис. 2(а)), а также изображение источника в ТэВ-ом диапазоне энергий, полученное с помощью телескопа ШАЛОН (рис. 2(б)). Анализ направлений прихода  $\gamma$ -ливней выявил основную область излучения, совпадающую с положением центрального источника ГК Per, и наличие слабого излучения от оболочки, видимого также и в рентгене телескопом Chandra. [3] (рис. 2(б)).

*Остаток сверхновой Кассиопея А (1680 год).* Кассиопея А (Cas A) самый молодой из исторических остатков сверхновых в нашей Галактике. Яркость излучения Cas A во всем наблюдаемом электромагнитном спектре делает этот источник уникальным объектом для изучения явлений в остатках сверхновых при высоких и сверхвысоких энергиях.

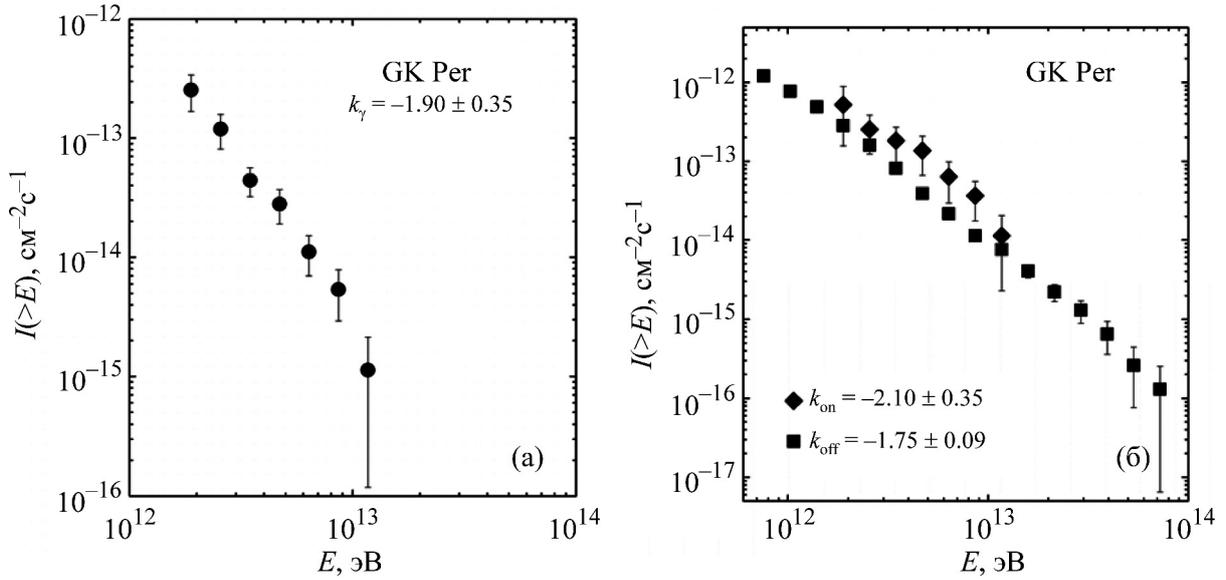


Рис. 1: Характеристики источника *GK Per* (*Nova 1901*): (а) интегральный спектр  $\gamma$ -квантов со степеньным показателем  $k_\gamma = -1.90 \pm 0.35$ ; (б) спектр событий, прошедших критерии отбора, без вычета фона  $k_{\text{on}} = -2.10 \pm 0.35$  и спектр фоновых событий, наблюдаемых одновременно с источником  $k_{\text{off}} = -1.75 \pm 0.09$ .

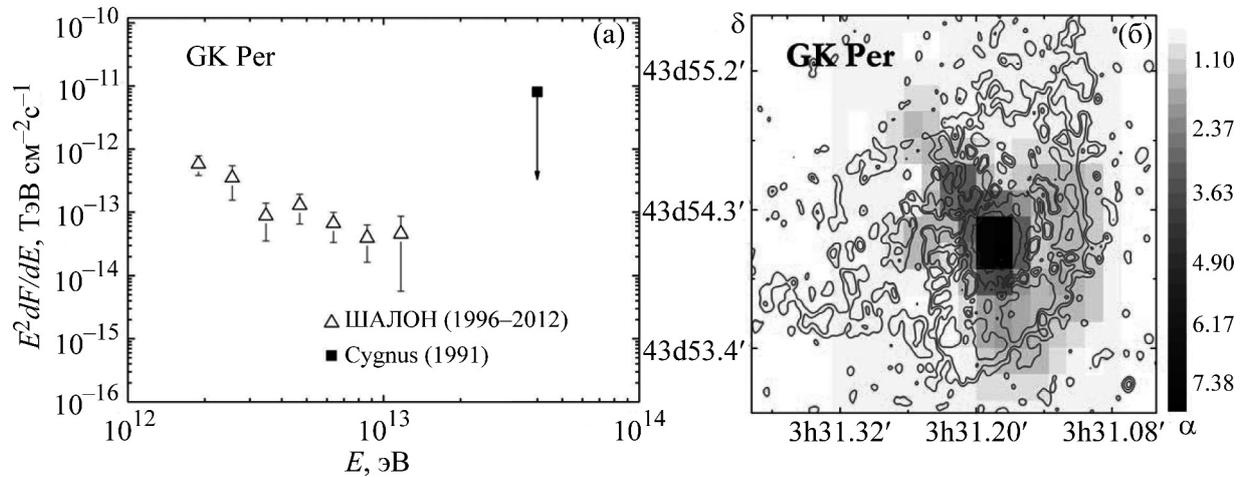


Рис. 2: (а) Спектральное энергетическое распределение  $\gamma$ -излучения сверхвысоких энергий от *GK Per* (*Nova 1901*) по данным телескопа ШАЛОН; (б) изображение *GK Per* (*Nova 1901*) по данным телескопа ШАЛОН и его энергетическое изображение в области энергий  $> 0.8$  ТэВ (чёрно-белая шкала); контурами представлено изображение *GK Per* в рентгене, полученное телескопом *Chandra* [3].

Cas A наблюдался телескопом ШАЛОН 68 ч в 2010–2013 гг. и был зарегистрирован с потоком  $(0.64 \pm 0.10) \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [7] при энергиях  $> 0.8 \text{ ТэВ}$  на уровне  $16.1\sigma$ , определяемом по методу Li&Ma [11]. Спектр  $\gamma$ -квантов в диапазоне энергий от 0.8 до 30 ТэВ хорошо описывается степенным законом с экспоненциальным обрезанием  $I(> E_\gamma) = (0.64 \pm 0.10) \times 10^{-12} \times E_\gamma^{-0.91 \pm 0.11} \exp(-E_\gamma/10.3 \text{ ТэВ})$  (см. рис. 3). На рис. 3 справа представлено изображение Cas A в рентгеновском диапазоне (см. линии), полученное телескопом Chandra [12], в сравнении с данными телескопа ШАЛОН в области энергий 0.8–30 ТэВ.

Для описания спектра  $\gamma$ -излучения Cas A, наблюдаемого в диапазоне энергий 500 МэВ – 10 ТэВ, рассматриваются два основных механизма генерации  $\gamma$ -квантов высоких и сверхвысоких энергий: обратное комптоновское рассеяние и распад  $\pi^0$ -мезонов, рожденных в столкновениях ядер космических лучей с межзвездным газом [13, 14]. На рис. 3 слева представлено спектральное энергетическое распределение излучения Cas A по данным телескопа ШАЛОН ( $\blacktriangle$ ) вместе с теоретическими предсказаниями для данного источника [13, 14] и в сравнении с данными других экспериментов: Fermi LAT [13], HEGRA [15], MAGIC [16], VERITAS [17], верхние пределы EGRET [18], CAT [19], Whipple [20]. Сплошными линиями показаны спектры в случае адронного происхождения  $\gamma$ -излучения сверхвысоких энергий [13, 14]. В работе [13] также представлены результаты расчетов лептонной модели происхождения  $\gamma$ -излучения в предположении двух значений индукции магнитного поля  $B$ . Поток  $\gamma$ -лучей, рожденных в процессе обратного комптоновского рассеяния при  $B = 0.3 \text{ мГс}$ , имеет значение в 5–8 раз меньше наблюдаемого в экспериментах; при  $B = 0.12 \text{ мГс}$  спектр  $\gamma$ -квантов имеет обрезание при энергиях  $\sim 10 \text{ ТэВ}$ .

Обнаружение  $\gamma$ -излучения от Cas A при энергиях 5–30 ТэВ и жесткий спектр при энергиях  $< 1 \text{ ТэВ}$  свидетельствует об адронном происхождении  $\gamma$ -лучей в Cas A.

*Остаток сверхновой Тихо (1572 год).* Остаток сверхновой Тихо произошел от сверхновой типа Ia, вспыхнувшей в 1572 г. В наблюдениях телескопом Chandra было получено качественное изображение Tycho's SNR, на котором был обнаружен “пузырь” расширяющегося вещества внутри более быстро двигающейся оболочки высокоэнергичных электронов. Сверхзвуковое расширение вещества создает две, прямую и обратную, ударные волны, излучающие рентген. Такой характер смещения ударной волны относительно поверхности “разрыва” расширяет возможности эффективного ускорения космических лучей на ударной волне.

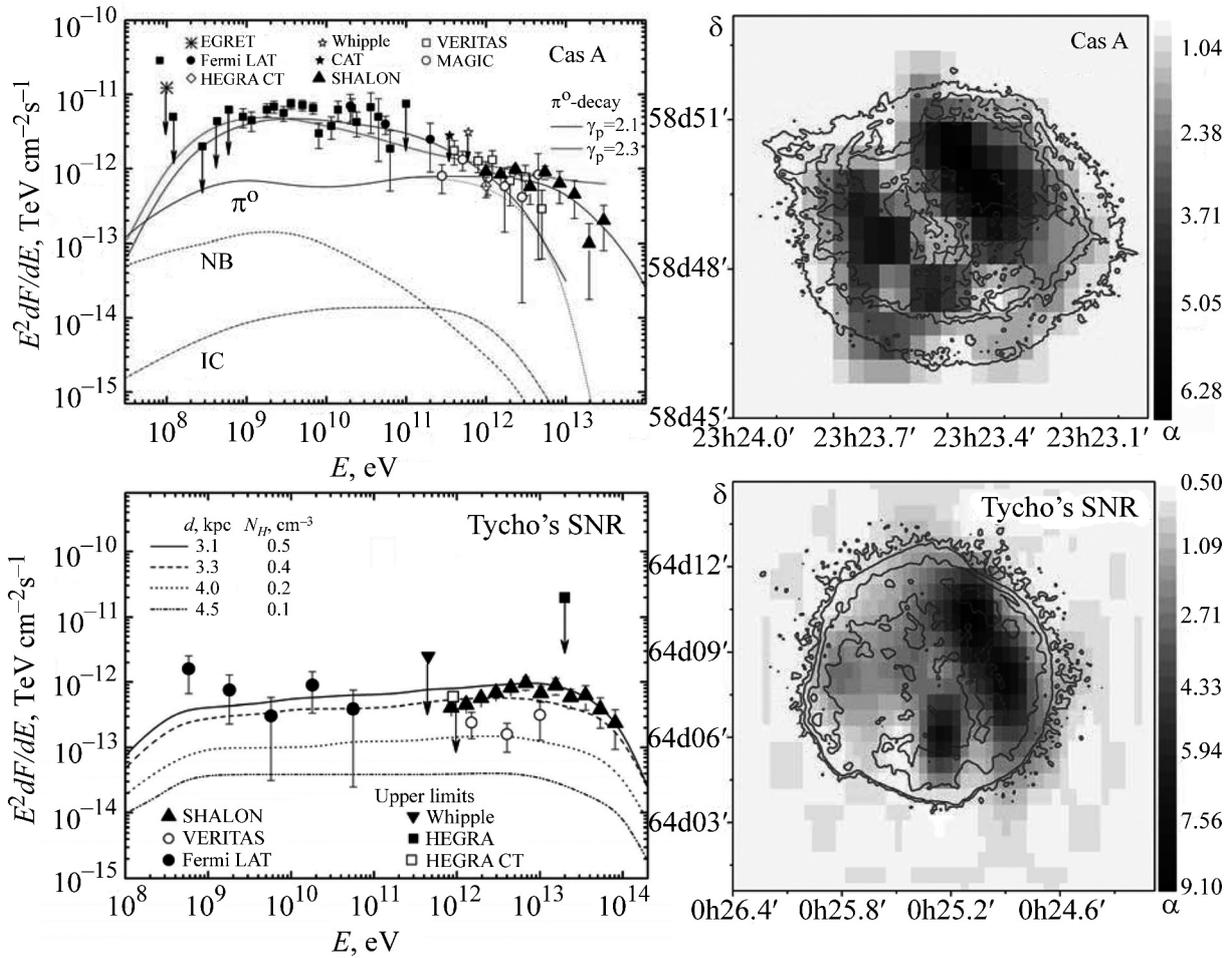


Рис. 3: Характеристики остатков сверхновых оболочечного типа Cas A, Tycho's SNR. Слева: спектральные энергетические распределения  $\gamma$ -излучения высоких и сверхвысоких энергий по данным телескопа ШАЛОН ( $\Delta$ ) в сравнении с данными других экспериментов (см. текст). NB – поток нетеплового тормозного излучения [14], IC – поток  $\gamma$ -излучения от обратного комптоновского рассеяния [14];  $d$  – расстояние до источника;  $N_H$  – плотность межзвёздной среды вокруг остатка сверхновой.  $\gamma_p$  – показатель спектра протонов. Справа: изображения остатков сверхновых при энергиях  $> 0.8$  ТэВ по данным телескопа ШАЛОН (чёрно-белая шкала); контурами представлено излучение в рентгене по данным эксперимента Chandra.

Наблюдения остатка сверхновой Тихо Браге проводились телескопом ШАЛОН в разные годы (с 1996 по 2010 гг.) [6–10]. ОСН Тихо был обнаружен телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне  $17\sigma$ , определяемом по методу Li&Ma

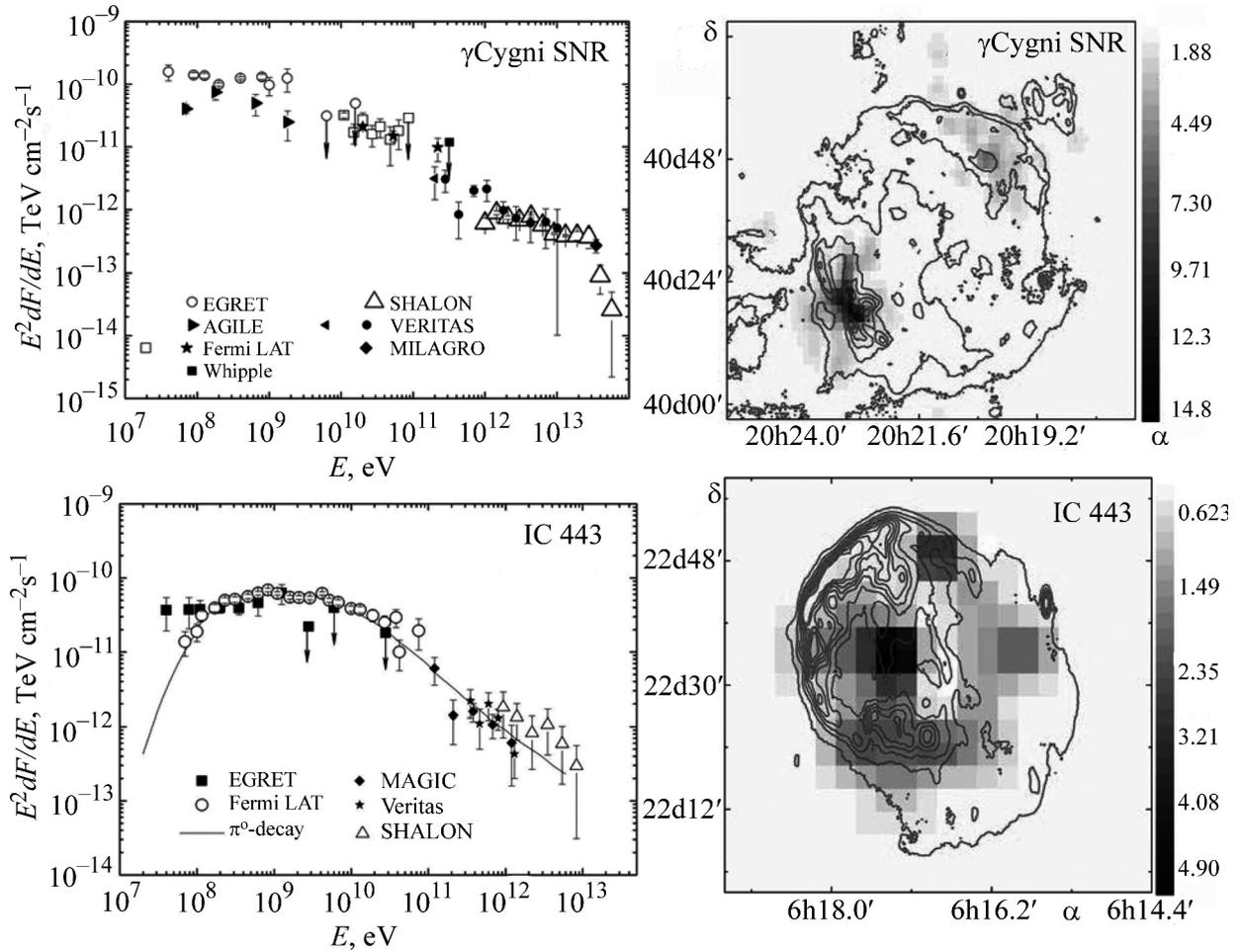


Рис. 4: Характеристики остатков сверхновых оболочечного типа  $\gamma$  Cygni SNR и IC 443. Слева: спектральные энергетические распределения  $\gamma$ -излучения высоких и сверхвысоких энергий по данным телескопа ШАЛОН ( $\Delta$ ) в сравнении с данными других экспериментов (см. текст). Справа: изображения остатков сверхновых при энергиях  $> 0.8$  ТэВ по данным телескопа ШАЛОН (чёрно-белая шкала); контурами представлено излучение в радиодиапазоне по данным CGPS.

[11] с потоком  $(5.2 \pm 0.4) \times 10^{-13}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов Tucho's SNR, по данным ШАЛОН в диапазоне энергий от 0.8 до 80 ТэВ, описывается степенным законом с экспоненциальным обрезанием  $I(> E_\gamma) = (0.41 \pm 0.05) \times 10^{-12} \times E_\gamma^{-0.93 \pm 0.09} \exp(-E_\gamma/35 \text{ ТэВ})$ . Также представлено изображение источника в диапазоне 0.8–80 ТэВ, полученное с помощью телескопа ШАЛОН (рис. 3). Недавно ОСН Тихо был также зарегистрирован телескопом VERITAS в наблюдениях 2008–2010 гг. и 2011 г. [21].

Согласно расчетам [22] поток  $\gamma$ -квантов  $F$  от распада  $\pi^0$  пропорционален  $E^{-1}$  и простирается выше 30 ТэВ, тогда как поток  $\gamma$ -лучей, рожденных в процессе обратного комптоновского рассеяния, имеет обрезание при энергиях  $\sim 10$  ТэВ. Таким образом, регистрация телескопом ШАЛООН  $\gamma$ -квантов от ОСН Тихо при энергиях 10–80 ТэВ является свидетельством адронного происхождения потока  $\gamma$ -квантов в данном объекте. Благодаря высококачественным данным, полученным с помощью обсерваторий XMM-Newton и Chandra, стали доступны уточненные параметры ОСН Тихо, необходимые для расчетов, такие как, например, энергия взрыва сверхновой  $E_{\text{SN}} = 1.2 \times 10^{51}$  эрг. Заключение относительно расстояния до ОСН Тихо сильно разнятся. Так в литературе указываются значения, оцененные разными методами, от 2.0–2.8 кпк до 3.1–4.5 кпк [23]. Чтобы поставить ограничения на значения таких параметров источника, как расстояние  $d$  и плотность межзвездной среды вокруг остатка  $N_H$ , сравним полученные в расчетах [23] спектральные энергетические распределения с распределениями из результатов наблюдений данного источника в ТэВ-ой области. Дополнительная информация о параметрах источника ОСН Тихо получена в рамках нелинейной кинетической теории [23, 24] из данных телескопа ШАЛООН: расстояние  $d$  находится в пределах 3.1–3.3 кпк, плотность межзвездной среды  $N_H = 0.4 - 0.5 \text{ см}^{-3}$ , при этом спектр  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$  будет простирается почти до 100 ТэВ.

*Остаток сверхновой  $\gamma$ Cygni SNR (возраст  $\sim (5 - 7) \times 10^3$  лет).*  $\gamma$ Cygni SNR – близкий остаток сверхновой оболочечного типа (1.5 кпк), с угловыми размерами  $\sim 1^\circ$  и оболочечной структурой, видимой в радио- и рентгеновском диапазоне энергий [25].  $\gamma$ Cygni SNR существенно старше таких остатков сверхновых как Cas A и Tycho's SNR, его возраст оценивается как 5000–7000 лет [25, 26] 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 ШАЛООН с 1995 г. по настоящее время. При обработке данных наблюдений,  $\gamma$ Cygni SNR был зарегистрирован телескопом ШАЛООН [9, 10] при энергиях  $> 0.8$  ТэВ на уровне  $14\sigma$  [11]. Среднее значение потока при энергиях больше 0.8 ТэВ для  $\gamma$ Cygni SNR составляет  $I_{\gamma\text{Cygni SNR}} = (1.27 \pm 0.11) \times 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Достоверность регистрации в данном случае ниже, чем обычно у источников с данным потоком и спектром, т.к. источник наблюдался в меньшем эффективном поле зрения по сравнению со стандартной

процедурой наблюдения источников в эксперименте ШАЛОН [5–7] и соответствующие поправки внесены при определении характеристик источника.

Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов ОСН  $\gamma$ Cygni при энергиях  $> 0.8$  ТэВ описывается степенным законом с экспоненциальным обрезанием  $(1.12 \pm 0.11) \times 10^{-12} \times E_{\gamma}^{-0.93 \pm 0.09} \exp(-E_{\gamma}/20 \text{ ТэВ})$  [9, 10]. На рис. 4 представлено изображение источника при энергиях 0.8–50 ТэВ, полученное с помощью телескопа ШАЛОН, в сравнении с радиоструктурой  $\gamma$ Cygni SNR (CGPS линии). Анализ направлений прихода  $\gamma$ -ливней выявил две области излучения в  $\gamma$ Cygni SNR: основная на юго-востоке оболочки ОСН, и вторая на севере. При рассматриваемых энергиях  $> 0.8$  ТэВ основной вклад как в поток частиц, так и в поток энергии даёт область юго-восточного края оболочки ОСН. На наземном телескопе VERITAS [27] при энергии 200 ГэВ был зарегистрирован протяжённый источник VERJ2019+407, коррелирующий с положением северной части оболочки источника. На рис. 4 представлено спектральное энергетическое распределение  $\gamma$ Cygni SNR по данным телескопов ШАЛОН, EGRET [18], AGILE [28], Fermi LAT [29–31], VERITAS [27, 32] и MILAGRO [33].

*Остаток сверхновой IC 443 (возраст  $\sim (3 - 30) \times 10^3$  лет).* Остаток сверхновой IC 443 является известным источником радио, оптического, рентгеновского и МэВ – ТэВ-го  $\gamma$ -излучения. IC 443 – это ОСН оболочечного типа, имеющий угловой размер  $\sim 45'$  в радиодиапазоне. Он имеет сложную структуру и состоит из двух оболочек-сегментов разного радиуса. Возраст этого остатка не определён: некоторые оценки указывают на то, что это ОСН с возрастом  $(3 - 4) \times 10^3$  лет, другие авторы дают оценки  $\sim (20 - 30) \times 10^3$  лет. IC 443 является одним из ОСН, который наилучшим образом подходит для исследования связи между остатками сверхновых, молекулярными облаками и источниками  $\gamma$ -квантов высоких и сверхвысоких энергий. Близкое расположение плотных выметаемых молекулярных облаков и областей ГэВ–ТэВ  $\gamma$ -излучения [34], зарегистрированных EGRET, Fermi LAT, MAGIC и VERITAS позволяет рассматривать этот остаток сверхновой в качестве источника космических лучей. IC 443 был зарегистрирован телескопом ШАЛОН с потоком  $(1.69 \pm 0.58) \times 10^{-12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [5] при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне  $9.7\sigma$  [11]. Интегральный спектр IC 443 описывается степенным законом с показателем  $k_{\gamma} = -1.94 \pm 0.16$ . Для описания спектра  $\gamma$ -излучения IC 443 с энергиями 100 МэВ – 7 ТэВ как основной механизм генерации рассматривается распад  $\pi^0$ -мезонов, рождённых в столкновениях ядер космических лучей с межзвёздным газом. Обратное комптоновское рассеяние не объясняет наблюдаемый спектр, т.к. нет известного яркого источника фотонов в данной области. На рис. 4 представлено спектральное энергетическое

ческое распределение излучения IC 443 по данным телескопов ШАЛОН ( $\Delta$ ), EGRET, Fermi LAT, MAGIC, VERITAS [34]. Сплошной линией показан спектр  $\gamma$ -квантов сверхвысоких энергий адронного происхождения. Представлено изображение источника в ТэВ-ом диапазоне энергий, полученное с помощью телескопа ШАЛОН (рис. 4 справа) в сравнении с радиоизображением IC 443 (CGPS линии). Анализ направлений прихода  $\gamma$ -ливней выявил корреляцию максимумов излучения в диапазоне энергий 800 ГэВ – 7 ТэВ с излучением, наблюдаемым Fermi LAT [34], также ТэВ-ое излучение на юге и юго-западе коррелирует с расположением плотных выметаемых молекулярных облаков.

*Заключение.* Представлены результаты наблюдений галактических остатков сверхновых оболочечного типа, находящихся на разных этапах эволюции: GK Per (Nova 1901), Кассиопея А, Тихо,  $\gamma$ Cygni SNR и IC 443, полученных с помощью зеркального черенковского телескопа ШАЛОН. Впервые было обнаружено излучение сверхвысоких энергий от классической новой GK Per (Nova 1901), являющейся, по-видимому, ОСН оболочечного типа на раннем этапе эволюции, и её оболочки, видимой и в рентгеновском диапазоне энергий. Экспериментальные данные подтвердили предсказание теории об адронном механизме генерации  $\gamma$ -квантов сверхвысоких энергий в остатках сверхновых Тихо, Cas A и IC 443.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. J. Slavin, T. J. O'Brien, and J. S. Dunlop, *MNRAS* **276**, 353 (1995).
- [2] S. P. Reynolds and R. A. Chevalier, *Astrophys. J.* **281**, L33 (1984).
- [3] S. Balman, *Astrophys. J.* **627**, 933 (2005).
- [4] E. G. Berezhko and H. Völk, *Astropart. Phys.* **7**, 183 (1997).
- [5] В. Г. Синицина, В. Ю. Синицина, *Письма в Астрономический журнал* **40**(2–3), 93 (2014).
- [6] V. G. Sinitsyna, *Nuovo Cimento* **19C**(6), 965 (1996).
- [7] В. Г. Синицина, В. Ю. Синицина, *Письма в Астрономический журнал* **37**(9), 676 (2011).
- [8] V. G. Sinitsyna et al., *Nuclear Physics B(Proc. Suppl.)* **97**, 215 (2001).
- [9] В. Г. Синицина, В. Ю. Синицина, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **40**(5), 9 (2013).
- [10] V. G. Sinitsyna, V.Y. Sinitsyna, in: “*Astroparticle, Particle, Space Physics and Detectors Physics Applications*” *Proc. 14th ICATPP, 2013* (Eds. S. Giani, C. Leroy, P. G. Rancoita, L. Price and R. Ruchti; Singapore: World Scientific) **8**, 20, 135, 142.
- [11] T.-P. Li and Y.-Q. Ma, *Astrophys. J.* **272**, 317 (1983).

- [12] F. D. Seward, W. H. Tucker, and R. A. Fesen, *Astrophys. J.* **652**, 1277 (2006).
- [13] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Astrophys. J.* **710**, L92 (2010).
- [14] E. G. Berezhko, G. Pühlhofer, and H. Völk, *Astron. Astrophys.* **400**, 971 (2003).
- [15] F. Aharonian, A. Akhperjanian, J. Barrio, et al., *Astron. Astrophys.* **370**, 112 (2001).
- [16] J. Albert, E. Aliu, H. Anderhub, et al., *Astron. Astrophys.* **474**, 937 (2007).
- [17] V. A. Acciari, E. Aliu, T. Arlen, et al., *Astrophys. J.* **714**, 163 (2010).
- [18] J. A. Esposito, S. D. Hunter, G. Kanbach, and P. Sreekumar, *Astrophys. J.* **461**, 820 (1996).
- [19] P. Goret, C. Gouiffes, E. Nuss, and D. C. Ellison, in: *Proc. 26th Inter. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City 1999*, ICRC **3**, 496 (1999).
- [20] R. W. Lessard, I. H. Bond, P. J. Boyle, et al., in: *Proc. 26th Inter. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City 1999*, ICRC **3**, 488 (1999).
- [21] V. A. Acciari et al., *ArXiv:astroph/1102.3871v1*.
- [22] E. G. Berezhko, in: *Proc. 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, Germany, 2001, Invited, Rapporteur and Highlight papers of ICRC 2001* (Copernicus Gesellschaft, Hamburg, 2002), p. 226.
- [23] E. G. Berezhko, H. Völk, and L. T. Ksenofontov, *Astronomy&Astrophysics* **483**, 529 (2008).
- [24] E. G. Berezhko, H. Völk, and L. T. Ksenofontov, *Adv. Space Res.* **41**, 473 (2008).
- [25] Т. А. Лозинская, В. В. Правдикова, А. В. Финогенов, *Письма в Астрономический журнал* **26**(2), 102 (2000).
- [26] Y. Uchiyama, T. Takahashi, F. A. Aharonian, and J. R. Mattox, *Astrophys. J.* **571**, 866 (2002).
- [27] A. Weinstein, *ArXiv:0912.4492*.
- [28] A. W. Chen, G. Piano, M. Tavani, et al., *Astron. & Astrophys.* **525**, A33 (2011).
- [29] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **187**, 460 (2010).
- [30] P. L. Nolan, A. A. Abdo, M. Ackermann, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 31 (2012).
- [31] J. Lande, M. Ackermann, A. Allafort, et al., *Astrophys. J.* **756**(1), 5 (2012).
- [32] A. Weinstein, *ArXiv:1303.2271*.
- [33] A. A. Abdo, B. T. Allen, T. Aune, et al., *Astrophys. J.* **734**, 28 (2011).
- [34] A. A. Abdo et al., *Astrophys. J.* **712**, 459 (2010).

Поступила в редакцию 14 октября 2014 г.