

УДК 524.7

## Результаты наблюдений Cyg $\gamma$ -2, BL Lac, 3C 66A, Mk 501 и Крабовидной туманности на гамма-телескопе ГТ-48 в 2006 году

*Ю.И. Нешпор, А.В. Жовтан., Н.А. Жоголев, Е.М. Нехай, З.Н. Скирута,  
В.В. Фиделис, В.П. Фомин*

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 22 января 2008 г.

**Аннотация.** В НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” на гамма-телескопе ГТ-48 в 2006 году проведены наблюдения активных ядер галактик: BL Lac, 3C 66A, Mk 501, а также Крабовидной туманности и Cyg  $\gamma$ -2. От активных ядер галактик и Крабовидной туманности зарегистрированы потоки гамма-квантов сверхвысоких энергий (СВЭ) с высокой степенью достоверности ( $Q \geq 4$ ). При наблюдениях Cyg  $\gamma$ -2 зарегистрировано гамма-излучение СВЭ от неидентифицированного гамма-источника Cyg  $\gamma$ -2 и рентгеновского источника Cyg X-3.

RESULTS OF OBSERVATIONS OF Cyg G-2, BL Lac, 3C66A, Mk 501 AND CRAB NEBULA WITH THE GAMMA-TELESCOPE GT-48 IN 2006, by Yu.I. Neshpor, A.V. Zhovtan, N.A. Zhogolev, E.M. Nehai, Z.N. Skiruta, V.V. Fidelis, V.P. Fomin. The observations of active galactic nuclei BL Lac, 3C66A, Mk501, and also Crab nebula and Cyg g-2 with gamma-telescope GT-48 at the Crimean Astrophysical Observatory in 2006 were carried out. Fluxes of the very high energy gamma-quantums (VHE) at the high confidence level ( $Q \geq 4$ ) were registered from the active galactic nuclei and Crab nebula. Gamma-radiation VHE from unidentified gamma-source Cyg g-2 and x-ray source Cyg X-3 was recorded when observing Cyg g-2.

**Ключевые слова:** гамма-излучение, черенковские вспышки, активные ядра галактик.

---

## 1 Введение

Наблюдения гамма-излучения сверхвысоких энергий  $E > 10^{12}$  эВ (СВЭ) от галактических и внегалактических объектов методом регистрации черенковских вспышек в НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” ведутся с 1969 года (Степанян и др., 1975). С 1969 года по 1973 год (за четыре года) на гамма-телескопе первого поколения РЧВ-1 (Степанян и др., 1975) были проведены наблюдения 43-х небесных объектов. Среди этих объектов был рентгеновский источник Cyg X-3, от которого в 1972 году зарегистрировано гамма-излучение сверхвысоких энергий. Поэтому этому источнику было уделено особое внимание. Интенсивное изучение этого объекта началось после обнаружения мощной вспышки радиоизлучения 2-го сентября 1972 года. В результате наблюдений Cyg X-3 различными группами исследователей было зарегистрировано излучение от этого источника во всем диапазоне энергий вплоть до гамма-квантов СВЭ. Причем поток гамма-излучения

СВЭ был впервые в мире зарегистрирован в НИИ “КРАО”. Суг X-3 – это мощный переменный гамма, рентгеновский и радиоисточник, тесная двойная система, в состав которой, вероятно, входят нейтронная звезда (или черная дыра) и звезда Вольфа-Райе.

С 1989 года наблюдения гамма-излучения СВЭ-методом регистрации черенковских вспышек ведутся на новом гамма-телескопе ГТ-48 (гамма-телескоп второго поколения) (Владимирский и др., 1994). При наблюдениях в сентябре-октябре 1993 года рентгеновского источника Суг X-3 в поле зрения телескопа ГТ-48 попал новый источник. От этого объекта, расположенного вблизи рентгеновского источника Суг X-3 на угловом расстоянии 0.6 градуса, был зарегистрирован поток гамма-квантов СВЭ с высокой достоверностью (7 стандартных отклонений) (Нешпор и др., 1995). Этому источнику гамма-излучения СВЭ было дано название Суг  $\gamma$ -2 (Калекин и др., 1996). Подтверждения о наличии потока гамма-квантов СВЭ от этого источника очень долго не поступало. Наконец в 2003 году на 28-й Международной конференции по космическим лучам было сделано сообщение о регистрации потока гамма-квантов СВЭ от объекта Суг  $\gamma$ -2 (Суг OB2) при наблюдениях в период 1999–2002 гг. группой HEGRA (Гавин Роуелл, Дейтер Хорнс, 2003). Анализ результатов наблюдений созвездия Cygnus в период 1989–1990 гг., проведенных в обсерватории Whipple, также показал наличие потока гамма-квантов СВЭ от объекта Суг  $\gamma$ -2 (Ленг и др., 2004).

Данный источник **не сопровождается** никакими сопутствующими эффектами в других длинах волн, и даже в рентгеновском диапазоне ничего в этой области неба не обнаруживается, поэтому его принято считать неидентифицированным источником.

Повышенный интерес к гамма-источнику Суг  $\gamma$ -2 (Суг OB2) побудил нас провести наблюдения за этим источником на гамма-телескопе ГТ-48 в 2006 году.

## 2 Результаты наблюдений

Наблюдения гамма-излучения СВЭ в 2006 г. в НИИ “КРАО” проводились на гамма-телескопе с многоканальными светоприемниками ГТ-48 (гамма-телескоп второго поколения) методом регистрации черенковских вспышек, которые возникают в результате взаимодействия гамма-квантов сверхвысоких энергий с ядрами атомов земной атмосферы. Подробное описание ГТ-48 дано в (Владимирский и др., 1994). Гамма-телескоп ГТ-48 начал работать в Крымской астрофизической обсерватории в 1989 году.

В 2006 году объектами наблюдений на гамма-телескопе ГТ-48, кроме гамма-источника Суг  $\gamma$ -2, также были галактики с активными ядрами: Mk 501, VL Lас, 3C66A и Крабовидная туманность. Наблюдения велись в режиме источник-фон, т. е. сеанс наблюдения включал в себя наблюдение источника в течение  $\Delta t$  минут (длительность скана), когда объект находился в центре поля зрения приемной камеры телескопа и фона той же длительности, смещенного по прямому восхождению на  $\Delta t + 5$  минут с тем, чтобы его наблюдение проходило при тех же зенитных и азимутальных углах, что и источника.

В таблице 1 приводится перечень всех наблюдаемых в 2006 году объектов, представлены координаты объектов, число вошедших в обработку сеансов наблюдений и длительность сканирования данного источника.

При анализе данных наблюдений, как обычно, исключались сеансы с низкой скоростью счета событий или сильной ее неравномерности на источнике или фоне, вызванные плохими погодными условиями. Полученные данные подвергались первичной обработке (Нешпор и др., 1998): 1) исключались данные, в которых суммарный сигнал от светоприемников четырех телескопов хотя бы в одной из 37 ячеек был больше сигнала, приводящего к насыщению преобразователя аналог-код (255 единиц дискрета); 2) корректировались амплитуды сигналов в каналах с учетом калибровочных коэффициентов; 3) исключались вспышки, максимальная амплитуда которых находилась во внешнем кольце ячеек светоприемника; 4) исключались события, во время регистрации которых были замечены сбои в работе системы ведения телескопа (отклонение оптической оси телескопа от заданного направления превышало  $3'$ ); 5) вычислялись первые и вторые моменты распределения света, из которых находились параметры черенковской вспышки: эффективная длина “А”,

**Таблица 1.** Наблюдения в 2006 году

Название объекта	$\alpha(2006)$	$\delta(2006)$	Период наблюдений	Нск	$\Delta t$ (мин)
Crab	$05^h 34^m 11^s$	$22^\circ 32' 13''$	22.10–17.12	14	30
VL Lac	$22^h 02^m 58^s$	$42^\circ 15' 25''$	14.09–11.11	27	35
3C66A	$02^h 23^m 23^s$	$43^\circ 03' 47''$	24.08–14.11	43	25
Mk501	$16^h 54^m 05^s$	$39^\circ 44' 56''$	23.05–26.06	18	25
Суг $\gamma$ -2	$20^h 32^m 50^s$	$41^\circ 31' 43''$	04.07–30.08	28	35

Нск – число сканов вошедших в обработку;

$\Delta t$  – длительность наблюдений (сканирование) источника в продолжение одного сеанса.

эффективная ширина “В” (основные координатно-независимые параметры), угол ориентации “Г”, характеризующий направление максимальной вытянутости изображения вспышки, т. е. ее ориентацию, и координаты центра “тяжести” распределения яркости “ $X_c$ ”, “ $Y_c$ ” (на основе этих параметров находят другие координатно-зависимые параметры черенковской вспышки) (Степанян А.А. и др., 1994). В результате первичной обработки из дальнейшего анализа данных исключается примерно 30 % событий (черенковских вспышек), зарегистрированных как при наблюдении источника, так и при наблюдениях фона. Число событий, вошедших для дальнейшего анализа данных с целью обнаружения потока гамма-квантов СВЭ, представлено в таблице 2.

**Таблица 2.** Количество зарегистрированных событий

Название объекта	$N_{on}$	$N_{off}$	$N_{on}-N_{off}$	Q
Crab	9442	9272	169	1.24
VL lac	17499	17546	-47	-0.25
3C 66A	25888	25511	377	1.66
Mk 501	6601	6292	309	2.72
Суг $\gamma$ -2	18545	18170	375	1.96

Для определения возможного потока гамма-квантов необходимо произвести их отбор путем исключения вспышек, вызванных заряженной компонентой космических лучей. Для этой цели были использованы координатно-независимые и координатно-зависимые параметры отбора. При этом необходимо правильно подобрать граничные значения параметров отбора для получения оптимального значения сигнал-шум  $Q = (N_{on} - N_{off})/\sqrt{N_{on} + N_{off}}$  (Q – стандартное отклонение), где  $N_{on}$  – это число отобранных гамма-подобных вспышек в данных наблюдений источника, а  $N_{off}$  – соответственно в данных наблюдений фона. Разность  $N_{on} - N_{off} = N_\gamma$  – это отобранное число гамма-подобных событий, зарегистрированное за время наблюдений, а  $\sqrt{N_{on} + N_{off}}$  – это статистическая ошибка определения величины сигнала после отбора. Если отбор производить по нескольким параметрам, то удастся исключить до 99 % и более вспышек от заряженной компоненты, и выделить над уровнем фона поток гамма-квантов СВЭ с высокой степенью достоверности. При использовании координатно-зависимых параметров черенковских вспышек повышается не только достоверность определения величины потока гамма-излучения, но можно определить и направление прихода гамма-квантов СВЭ. Для определения направления потока гамма-излучения применяется метод пробных источников (Нешпор и др., 1994; Фомин и др., 1994). Метод основан на том, что большие оси эллипсов изображений черенковских вспышек от гамма-квантов ориентированы в фокальной плоскости телескопа на источник, а большие оси эллипсов изображений р-ливней (ливни от заряженных частиц) ориентированы в первом приближении равномерно по

всем направлениям. Поэтому, если проводить отбор вспышек, принимая за направление на источник произвольную точку в фокальной плоскости детектора с координатами  $X_i, Y_j$  и применять отбор по координатно-зависимым параметрам, то число оставшихся р-ливней не будет зависеть от положения предполагаемого источника. Число же изображений от гамма-ливней будет существенно зависеть от положения относительно центра поля зрения детектора предполагаемого источника и будет иметь максимум в направлении на истинный источник. Обычно оптическая ось телескопа наводится на объект таким образом, что он находится в центре поля зрения детектора. Можно построить распределение числа отобранных вспышек по полю зрения светоприемника как функцию положения предполагаемого источника, т. е. “карту”-гистограмму, по оси X и Y которой – декартовы координаты пробного источника относительно центра поля зрения детектора, а по оси Z – число отобранных по координатно-зависимому параметру гамма-подобных событий, и, таким образом, определить положение истинного источника гамма-квантов. Такие трехмерные гистограммы строились для каждого из перечисленных в таблице 1 объекта. При этом отбор проводился как по указанным выше координатно-независимым параметрам, так и по координатно-зависимым. Анализ полученных трехмерных гистограмм показал, что найденное таким образом направление прихода гамма-квантов СВЭ совпадает в пределах ошибок с координатами конкретного объекта. Результаты такого отбора представлены в таблице 3.

**Таблица 3.** Величина потока гамма-квантов СВЭ

Название объекта	Число зарегистрир. гамма-квантов	Длительность наблюдений источника(мин)	$N_\gamma$ (мин <sup>-1</sup> )	Q
Crab	$80 \pm 18.0$	420	$0.19 \pm 0.04$	4.5
BL lac	$130 \pm 30.5$	945	$0.14 \pm 0.03$	4.3
3C 66A	$206 \pm 54.0$	1075	$0.20 \pm 0.05$	4.0
Mk 501	$91 \pm 22$	450	$0.20 \pm 0.05$	4.0
Cyg $\gamma$ -2	$134 \pm 21.4$	980	$0.13 \pm 0.02$	6.3

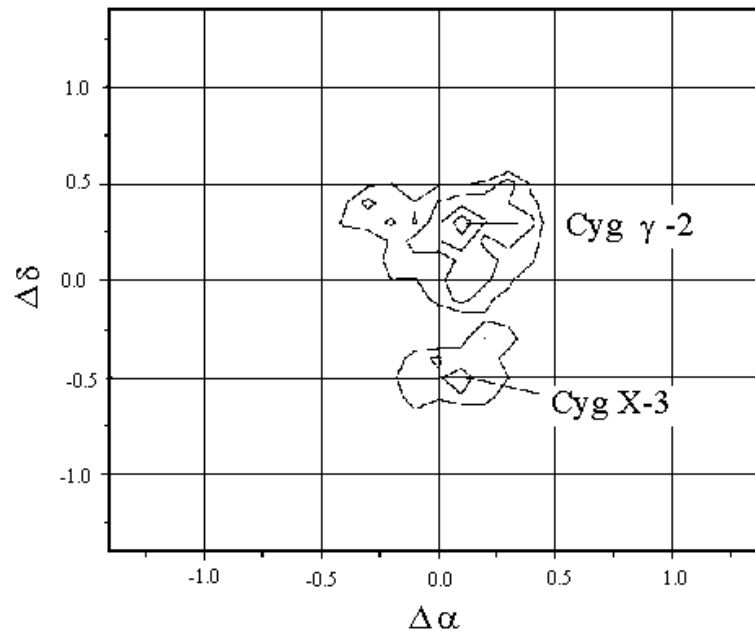
$N_\gamma$  – число зарегистрированных гамма-квантов СВЭ за одну минуту;

Q – стандартное отклонение.

Из таблицы 3 видно, что для всех объектов потоки гамма-квантов сверхвысоких энергий зарегистрированы с высокой степенью достоверности ( $Q \geq 4$ ). Особое внимание обращаем на источник Cug  $\gamma$ -2. От него поток гамма-квантов СВЭ определен с очень высокой степенью достоверности, которая равна  $(1 - 10^{-9})$ .

### 3 Наблюдения области Cug X-3.

Гамма-источник Cug  $\gamma$ -2, открытый в 1993 году в Крымской астрофизической обсерватории при наблюдениях на гамма-телескопе ГТ-48 рентгеновского источника Cug X-3, до настоящего времени неидентифицированный объект. Cug  $\gamma$ -2 расположен в области чрезвычайно активного звездообразования в созвездии Лебедя, содержащей большое количество рентгеновских источников и источников низкоэнергетического гамма-излучения. Для объяснения “буйства” TeV Cug  $\gamma$ -2 коллаборацией HEGRA велся поиск объектов, которые могли бы ускорять космические частицы до достаточно высоких энергий. В качестве подобных ускорителей могут выступать остатки сверхновых, расширяющиеся газовые оболочки, которые представляют собой наружные слои взорвавшихся звезд. Однако никакого подходящего остатка сверхновой звезды обнаружить в этой области не удалось. Ученые высказали предположение, что Cug  $\gamma$ -2 может быть связан с ассоциацией звезд Cugnius (Лебедь) OB2. Ассоциация OB – это группа очень горячих и массивных молодых звезд (OB ее называют потому, что такие звезды относятся как правило к спектральным классам O и B). Ассоциация



**Рис. 1.** Изофоты распределения направлений прихода гамма-квантов СВЭ ( $N_\gamma$ ) по полю зрения светоприемника. Центр поля зрения приемника соответствует направлению оптической оси светоприемника. Начальное значение изофоты  $N_\gamma = 72$ , шаг изофоты  $\Delta N_\gamma = 17$

$\Delta\alpha$  – отклонение от центра светоприемника по прямому восхождению в градусах

$\Delta\delta$  – отклонение от центра светоприемника по склонению в градусах

Cygnus OB2, как считают, снабжает энергией весь этот регион через интенсивные звездные ветры, исходящие от ее звезд. (Роуелл, Хорнс, 2003; Агаронян и др., 2006). По-видимому, поэтому ему присвоено название Cyg OB2 (Роуелл, Хорнс, 2003). Агаронян и др., (2006) на основании четырехлетних наблюдений (1999–2002 гг.) созвездия Cygnus считают, что этот источник (Cyg  $\gamma$ -2) довольно постоянно излучает поток гамма-квантов СВЭ, в среднем  $10^{-12}$  квантов  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ . Поскольку источник Cyg  $\gamma$ -2 (Cyg OB2) новый, и его можно отнести к классу высокоэнергетических источников гамма-излучения СВЭ неизвестной природы, то проведем более подробный анализ данных наблюдений на ГТ-48 за период 2006 года.

В предыдущем параграфе мы уже указали, что анализ трехмерной гистограммы показал, что направление прихода гамма-квантов совпадает в пределах ошибок с координатами гамма-источника Cyg  $\gamma$ -2. Отметим, что координаты источника Cyg  $\gamma$ -2 незначительно, в пределах одного градуса, отличаются от координат рентгеновского источника Cyg X-3. Если поле зрения светоприемника гамма-телескопа ГТ-48 равно  $2^\circ.4$ , то оба источника попадают в поле зрения детектора. Проведем анализ карты изофот (величины  $N_\gamma$ ) распределений направлений прихода гамма-квантов (черенковских вспышек). На рис. 1 представлена карта изофот величины  $N_\gamma$  для созвездия Cygnus. Из рис. 1 хорошо видно, что максимум распределения ( $N_\gamma = 134$ ) одной группы изофот совпадает с положением источника Cyg  $\gamma$ -2 и положение максимума ( $N_\gamma = 97$ ) другой группы изофот с координатами рентгеновского источника Cyg X-3 с учетом того, что оптическая ось телескопа ГТ-48 (центр светоприемника) наводилась на гамма-источник Cyg  $\gamma$ -2. Оба источника имеют одни и те же координаты по прямому восхождению и различаются по склонению на  $0^\circ.8 \pm 0^\circ.2$  (см. рис. 1).

Нешпор и др. (1995) и Гавин Роуэлл, Дейтер Хорнс (2003) после анализа данных наблюдений созвездия Cygnus дают для двух источников различие по склонению  $0^\circ.7$  и  $0^\circ.6$  соответственно, что в пределах ошибок хорошо согласуется с нашими результатами.

#### 4 Заключение

Cygnus  $\gamma$ -2 имеет очень интересные особенности. Гамма-кванты, испускаемые Cygnus  $\gamma$ -2, оказались в числе наиболее энергетически эффективных фотонов, когда-либо наблюдаемых. В число других (очень немногих) “местных” источников чрезвычайно высокоэнергетических гамма-квантов входит сам галактический центр и всем известная Крабовидная туманность – остаток взрыва сверхновой. В обоих случаях соответствующие источники довольно сильно излучают также и в рентгеновском диапазоне, что позволяет говорить о наличии там ускоренных электронов. В противоположность этому Cygnus  $\gamma$ -2 не имеет никаких “дублеров” на других длинах волн, и (что особенно странно) их нет даже в рентгеновском диапазоне. Отсутствие (или, по крайней мере, чрезвычайно низкий уровень) рентгеновского излучения Cygnus  $\gamma$ -2 заставляет думать, что испускание гамма-лучей в этом случае является результатом взаимодействия ускоренных космических лучей с локальным окружающим веществом (Агаронян и др., 2005).

В заключение отметим, что при наблюдении гамма-источника Cygnus  $\gamma$ -2 мы также зарегистрировали и гамма-излучение СВЭ от рентгеновского источника Cygnus X-3 с достоверностью более 4-х стандартных отклонений. Тот факт, что зарегистрированные источники имеют одинаковые координаты по прямому восхождению, а по склонению различаются на  $0^\circ.8 \pm 0^\circ.2$ , дополнительно подтверждает, что при наблюдениях в 2006 году на ГТ-48 зарегистрировано излучение от двух источников Cygnus  $\gamma$ -2 и Cygnus X-3.

#### Литература

- Агаронян и др. (Aharonian F., Akhperjanian A., Beilicke M. et al.) // arXiv:astro-ph/0501667 v1.  
 Владимирский Б.М., Зыскин Ю.Л., Корниенко А.П. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1994. Т. 91. С. 74.  
 Гавин Роуэлл, Дейтер Хорнс (Gavin Rowell, Dieter Horns) // Proc. 28th. JCRC. 2003. Tsukuba. OG 22. P. 2345.  
 Калекин О.Р., Нешпор Ю.И., Степанян А.А. и др. // Письма в Астрон. журн. 1995. Т. 21. №. 3. С. 184.  
 Калекин О.Р., Нешпор Ю.И., Степанян А.А. и др. // Кинематика и физика небесн. тел. 1996. Т. 12. №. 2. С. 92.  
 Ленг и др. (Lang M.J., Carter-Lewis D.A., Fegan D.J., et al.) // Preprint submitted to Elsevier Science.  
 Нешпор и др. (Neshpor Yu.I., Kornienko A.P., Stepanian A.A., et al) // Experimental Astronomy. 1994. V. 5. P. 405.  
 Нешпор и др. (Neshpor Yu.I., Kalekin O.R., Stepanian A.A., et al.) // Proc. 25th ICRC. 1995. Rome. Italy. V. 2. P. 385.  
 Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Калекин О.П. и др. // Письма в Астрон. журн. 1998. V. 24. С. 167.  
 Степанян А.А., Владимирский Б.М., Нешпор Ю.И., Фомин В.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1975. Т. 53. С. 29.  
 Фомин и др. (Fomin V.P., Fennell S., Lamb R.C., et al.) // Astroparticle Physics. 1994. V. 2. P. 137.