

УДК 524.7

Результаты наблюдений активных ядер галактик на гамма-телескопе ГТ-48 КрАО в 2004 году

Ю.И. Нешпор, В.С. Елисеев, 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 7 сентября 2006 г.

Аннотация. В НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” в 2004 году проведены наблюдения на гамма-телескопе ГТ-48 ряда активных ядер галактик: 3С 66А, Мк 421, Мк 501, 1Н 1426, 1ES 1959, BL Lac. От объектов 3С 66А, Мк 421, Мк 501, 1Н 1426 зарегистрировано излучение гамма-квантов сверхвысоких энергий ($E \geq 10^{12}$ эВ) с достоверностью более 4-х стандартных отклонений. Для объектов 1ES 1959, BL Lac приводятся верхние значения потоков гамма-квантов сверхвысоких энергий. Отмечается, что данные наблюдений 2004 года галактики 3С 66А ($z = 0,44$) подтверждают результаты, полученные в НИИ “КрАО” ранее.

OBSERVATION OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI WITH GAMMA-RAY TELESCOPE GT-48 CrAO IN 2004, *by Yu.I. Neshpor, V.S. Eliseev, N.A. Jogolev, E.M. Nehay, Z.N. Skiruta, V.V. Fidelis, V.P. Fomin.* The results of observation of active galactic nuclei (AGN) with gamma-ray telescope GT-48 at the Crimean Astrophysical Observatory in 2004 are considered. The fluxes of high-energy gamma-rays ($E > 10^{12}$ eV) are registered from objects 3C 66A, Mk421, Mk501 and 1H1426 at the level more than 4σ . The top values of fluxes of high-energy gamma-rays for AGN’s 1ES1959, BL Lac are presented. The analysis of data of the object 3C66A confirms the presence of gamma-ray flux from this source. This object was discovered in Crimea earlier.

Ключевые слова: галактики, гамма-излучение

1 Введение

В настоящее время уже известно, что практически все нестационарные процессы на звездах и в галактиках сопровождаются генерацией космических лучей. Тем не менее пока нет полной ясности, какие именно процессы ответственны за их генерацию. Наблюдения гамма-излучения дают возможность изучать процессы, при которых происходит ускорение частиц до высоких и сверхвысоких энергий. Земная атмосфера непрозрачна для гамма-излучения во всем диапазоне энергий, поэтому для регистрации гамма-квантов высоких энергий ($B\bar{E} E\gamma > 100$ МэВ) используют приборы, установленные на спутниках. С помощью наземных гамма-телескопов можно наблюдать гамма-излучение сверхвысоких энергий ($CB\bar{E} E\gamma > 50$ ГэВ). В этом случае используют то обстоятельство, что гамма-кванты сверхвысокой энергии, взаимодействуя с ядрами атомов воздуха, образуют вторичные электроны, которые испускают фотоны черенковского излучения в оптическом диапазоне под малым (1°) углом к направлению движения первичного кванта. Это позволяет определить

направление прихода потока гамма-квантов. Площадь, освещаемая черенковской вспышкой, при этом довольно велика: десятки тысяч кв.м. Благодаря этому оказывается возможной регистрация малых потоков гамма-квантов, 10^{-11} квантов $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Впервые черенковские вспышки в атмосфере наблюдали уже в 50-х годах. Дальнейшие наблюдения на простейших гамма-телескопах, которые регистрировали только наличие черенковской вспышки, а также теоретические расчеты показали, что потоки гамма-квантов СВЭ от космических объектов составляют десятые доли процентов от фона космических лучей. Поэтому для уверенного обнаружения гамма-излучения СВЭ от определенного объекта при наблюдениях на простейших гамма-телескопах требовалось очень длительное время регистрации, которое для некоторых источников достигало нескольких лет. Это очень сильно затрудняет поиск новых объектов и, особенно, исследование переменных источников гамма-квантов СВЭ, хотя именно такие объекты являются наиболее типичными. В дальнейшем многими группами исследователей были построены новые гамма-телескопы (телескопы второго поколения). Главная особенность современных гамма-телескопов – это применение многоканальных светоприемников (камер), а следовательно и возможность строить изображение черенковских вспышек. Такая регистрация черенковских вспышек дает возможность отсеять подавляющую часть вспышек, вызванных заряженной компонентой космических лучей, что значительно повышает эффективность обнаружения объектов, излучающих гамма-кванты СВЭ.

2 Источники гамма-излучения СВЭ

Наблюдения гамма-излучения СВЭ на гамма-телескопах второго поколения проводятся в различных точках Земного шара. Таких телескопов во всем мире пока около десяти: три из них установлены в южном полушарии, остальные в северном, один из них в Крымской астрофизической обсерватории (КРАО). В результате наблюдений на наземных гамма-телескопах к настоящему времени зарегистрировано гамма-излучение СВЭ от более 14-ти объектов (см.таблицу 1), 9 из которых – это галактики с активными ядрами (АЯГ). Восемь АЯГ принадлежат к типу лацертид, а галактика М 87 - это радиогалактика с джетом в ядре. Четыре объекта (Geminga, Vela, Crab и Cyg X-3) содержат пульсары, излучающие гамма-кванты СВЭ (Нешпор и др.,2001а; Гриндлей и др.,1975; Гриндлей и др.,1976; Чадвик и др.,1982; Зыскин и др.,1988).

Таблица 1. Объекты, зарегистрированные в диапазоне гамма-излучения СВЭ.

N	Источник	z	r(кпк)	lgL(эрг·с ⁻¹)	Дата	Группа	Лит-ра
1	3C66A	0.444	1800000	46.3	1998	Crimea	(1)
2	1H1426+428	0.129	516000	44.0	2001	Whipple	(2)
3	PKS 2155-304	0.116	464000	44.4	1999	Durham	(3)
4	BL Lac	0.069	280000	44.5	2001	Crimea	(4)
5	1ES 1959+650	0.048	192000	43.8	1999	Array	(5)
6	1ES 2344+514	0.044	176000	42.5	1997	Whipple	(6)
7	Mk 501	0.034	136000	44.5	1995	Whipple	(7)
8	Mk 421	0.031	124000	44.0	1992	Whipple	(8)
9	M 87(Дева A)	0.004	17400	41.2	1999	HEGRA	(9)
10	Cyg X-3		11.6	36.7	1972	Crimea	(10)
11	Cygy-2			36.3	1993	Crimea	(11)
12	Crab		2.0	34.0	1972	Whipple	(12)
13	Vela		0.5	33.0	1975	Whipple	(13)
14	Geminga		0.15	32.5	1983	Crimea, FIAN	(14)

* (1) Нешпор и др., 1998;(2) Хоран и др., 2001; (3) Чадвик и др., 1999; (4) Нешпор и др., 2001; (5) Нишуяма и др., 2000; (6) Катанезе и др., 1998; (7) Куин и др., 1996; (8) Панч и др., 1992; (9) Агаронян и др., 2003; (10) Владимирский и др., 1973; (11) Нешпор и др., 1995; (12) Фазио и др., 1972; (13) Гриндлей и др., 1975; (14) Зыскин и др., 1983.

Из 14 перечисленных объектов в таблице, тринадцать наблюдаются в широком диапазоне частот от радио- до гамма-излучения СВЭ, а для источника $\text{Cyg } \gamma - 2$ есть данные только в гамма-диапазоне СВЭ. В таблице 1 приведены расстояния до объектов (r) в кпк ($r = z \cdot c/H$, $H = 75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$, H - постоянная Хаббла) и z -красное смещение. Величина светимости гамма-излучения СВЭ (L) в $\text{эрг} \cdot \text{с}^{-1}$ в предположении, что гамма-излучение испускается изотропно, и без учета межгалактического поглощения. Практически все источники гамма-квантов СВЭ переменны, поэтому приведенные значения светимости излучения (L) ориентировочные. В таблице также указана дата первой регист-рации источника и группа наблюдателей, зарегистрировавших впервые этот источник. Как видно из таблицы, из 14 приведенных гамма-источников СВЭ пять обнаружено группой КраО. В КраО наблюдения гамма-источников СВЭ ведутся с 1969 года (Степанян и др., 1975). Вначале, до 1980 года, наблюдения проводились на регистраторе черенковских вспышек (Степанян и др., 1971). С 1989 года – на гамма-телескопе второго поколения ГТ-48 (Владимирский и др., 1994). С астрофизической точки зрения активные ядра галактик вызывают огромный интерес, так как они характеризуются значительными вариациями потоков излучения в широком диапазоне частот от радио до гамма-излучения СВЭ. Активные ядра галактик (АЯГ) отличаются от других космических объектов сильной тенденцией к вспышечной (временная шкала несколько дней) и взрывной (длительность несколько месяцев) активности.

Наблюдения АЯГ на гамма-телескопе ГТ-48 в КраО ведутся с 1996 года. Получено ряд результатов. По данным наблюдений галактики Мк 501 в 1997 году показано, что поток гамма-квантов СВЭ в период наблюдений был переменным с временным масштабом одни сутки (Калекин и др., 1999). Наблюдения на ГТ-48 потока СВЭ от Мк 501 в 1997, 1998 и 2000 годах показали его переменность от года к году и подтвердили наличие периодической составляющей с периодом 23.2 дня (Нешпор и др., 2003). Четырехлетние наблюдения галактики 3С 66А показали, что поток гамма-квантов СВЭ изменяется от года к году и коррелирует с излучением в оптическом диапазоне. Коэффициент корреляции составил величину $k = 0.7 \pm 0.2$ (Степанян и др., 2002). По данным 2-х летних наблюдений галактики VL Lас получена положительная корреляция между средним значением потока гамма-квантов СВЭ за одну лунацию (период наблюдений в безлунные ночи в продолжение одного месяца) и средним значением оптической яркости объекта за этот же интервал времени. Для данных 2000 года коэффициент корреляции составил $k = 0.68 \pm 0.16$ (Нешпор и др., 2004), для данных 2002 года $k = 0.66 \pm 0.15$. Во время наблюдений галактики Мк 421 в период со 2 декабря по 6 декабря 2002 года зарегистрирован всплеск гамма-излучения СВЭ, который по времени совпадает с рентгеновским всплеском в области 3-25 КэВ. Достоверность зарегистрированного гамма-потока СВЭ во время рентгеновской вспышки составляет 5.1 стандартных отклонения (Фиделис и др., 2004).

3 Наблюдения и обработка данных

В 2004 году в КраО на гамма-телескопе ГТ-48 были продолжены наблюдения активных ядер галактик, таких как: Мк 501, Мк 421, 3С 66А, 1Н 1426, 1ES 1959 и VL Lас (см. таблица 2). Результаты этих наблюдений представлены ниже.

Установка состоит из двух альт-азимутальных монтировок (секций) - северной и южной, расположенных на расстоянии 20 м на высоте 600 метров над уровнем моря. Общая площадь зеркал на обеих монтировках составляет 54 кв.м. Эффективная пороговая энергия регистрации гамма-квантов - 1.0 ТэВ. Подробное описание можно найти в (Владимирский и др., 1994).

Наблюдения объекта проводились двумя параллельно направленными секциями в режиме совпадений с разрешающим временем 100 нс. Применение двояной установки в режиме совпадений между секциями, в отличие от одиночных телескопов, практически полностью исключает регистрацию событий, вызванных отдельными заряженными частицами при их прохождении через светоприемники (Чаленко и др., 1997). Наблюдения проводились методом слежения за объектом путем сопоставления результатов наблюдений источника гамма-квантов с результатами наблюдений фона со сдвигом по времени относительно друг друга так, чтобы наблюдения источника и фона (сеанс

Таблица 2. Наблюдения в 2004 году.

Название объекта	α	δ	Период наблюдений	Nск	Δt (мин)
ЗС 66А	02 ^h 22 ^m 56 ^s 43° 03' 13"		13.09 ÷ 14.11	46ск	1150
Mк 421	11 ^h 04 ^m 40 ^s 38° 11' 18"		15.04 ÷ 22.04	11ск	385
Mк 501	16 ^h 54 ^m 01 ^s 39° 45' 08"		17.05 ÷ 22.07	44ск	1100
1Н 1426	14 ^h 28 ^m 42 ^s 42° 39' 28"		16.04 ÷ 26.04	8ск	360
1ES 1959	20 ^h 00 ^m 02 ^s 65° 09' 35"		17.07 ÷ 22.08	9ск	405
BL Lac	22 ^h 02 ^m 53 ^s 42° 17' 49"		14.09 ÷ 11.11	25ск	875

* Nск - число сканов вошедших в обработку, Δt - длительность наблюдений источника.

наблюдений) проводились при тех же азимутальных и зенитных углах. Таким образом сеанс включал в себя наблюдение источника и фона той же длительности.

Сеансы, проведенные при плохих погодных условиях, в обработку не включались. Исключались сеансы, в которых дисперсия скорости счета черенковских вспышек за одну минуту отличалась от теоретической больше, чем на 2 стандартных отклонения. Кроме того, не рассматривались данные сеансов, в которых скорость счета (число зарегистрированных черенковских вспышек в минуту) была меньше половины максимальной при данном зенитном угле. Полученные данные подвергались первичной обработке: 1) отбрасывались черенковские вспышки, в которых суммарный сигнал от светоприемников всех телескопов хотя бы в одной из 37 ячеек, был больше сигнала, приводящего к насыщению преобразователя аналог-код; 2) корректировались амплитуды сигналов в каналах с учетом калибровочных коэффициентов; 3) отбрасывались вспышки, максимальная амплитуда которых находилась во внешнем кольце ячеек светоприемника; 4) отбрасывались события, во время регистрации которых были замечены сбои в работе системы ведения телескопа (отклонение оптической оси телескопа от заданного направления превышало 3 угловых минуты);

В результате такой первичной обработки для дальнейшего анализа остается около 30% от зарегистрированных событий (см. таблицу 3).

Таблица 3. Данные наблюдений.

Название объекта	N_{on}	N_{off}	$N_{on} - N_{off}$	Q
ЗС 66А	17055	16858	197	1.07
Mк 421	5234	4988	246	2.43
Mк 501	14461	13991	470	2.79
1Н 1426	4883	4851	32	0.32
1ES 1959	4439	4339	100	1.07
BL Lac	13047	12786	261	1.62

N_{on} - число зарегистрированных событий, вошедших в обработку при наблюдениях источника, N_{off} - число зарегистрированных событий, вошедших в обработку при наблюдениях фона.

4 Результаты и их обсуждение

Основным препятствием для обнаружения и дальнейшего исследования источников гамма-квантов СВЭ является наличие значительного фона космических лучей, частицы которых вызывают в атмосфере Земли черенковские вспышки, величины параметров которых трудно отличимы от величин параметров вспышек, вызванных гамма-квантами. Тем не менее, различия эти есть, что дает возможность после анализа величин параметров черенковских вспышек (событий), отсеять

подавляющую часть вспышек, вызванных заряженной компонентой космических лучей. Причем распределения значений параметров вспышек как от гамма-квантов, так и от заряженных частиц широки и в значительной степени перекрываются. Однако, распределения по нескольким различным параметрам дают возможность исключить до 99% и более вспышек от заряженной компоненты. При этом необходимо правильно подобрать критические (граничные) значения параметров для получения оптимального значения сигнал/шум = $(N_s - N_b)/\sqrt{N_s + N_b}$, где N_s - число гамма-подобных вспышек, отобранных в данных наблюдений источника, а N_b - число гамма-подобных вспышек в данных наблюдений фона. Разность $N_s - N_b = N\gamma$ интерпретируется как число гамма-квантов, излучаемых источником, а $\sqrt{N_s + N_b}$ - статистическая ошибка этого числа. Соотношение сигнал/шум=Q есть не что иное, как стандартное отклонение, то есть величина достоверности обнаружения потока гамма-квантов от наблюдаемого объекта.

Таблица 4. Результаты наблюдений.

Название объекта	Число гамма-подобных зарегистр.на источнике	Число гамма-подобных зарегистр.на фоне	$N\gamma$	Q	$N\gamma$ мин ⁻¹
3C 66A	412	300	112±26.7	4.2	0.10±0.024
Mk 421	131	58	73±3.7	5.3	0.19±0.036
Mk 501	217	132	85±18.7	4.6	0.08±0.017
1H 1426	92	40	52±11.5	4.5	0.14±0.032
1ES 1959	134	121	13±16	0.8	< 0.03±0.040
BL Lac	415	391	24±28	0.8	< 0.03±0.03

Для определения числа гамма-квантов ($N\gamma$) необходимо произвести их отбор путем исключения вспышек, вызванных заряженной компонентой космических лучей. При этом были использованы координатно-независимые и координатно-зависимые параметры отбора (Нешпор и др., 2002). Результаты такого отбора представлены в таблице 4. Поскольку длительность наблюдений объектов различна, то для сопоставления потоков излучения источников приводим величину скорости счета гамма-квантов, т. е. число гамма-квантов, зарегистрированных от данного источника в одну минуту.

Из таблицы 4 видно, что от таких объектов, как 3C 66A, Mk 421, Mk 501 и 1H 1426 потоки гамма-квантов сверхвысоких энергий зарегистрированы с высокой степенью достоверности ($Q > 4$). Для объектов 1ES 1959 и BL Lac получены только верхние пределы величин потоков (см. табл. 4).

В заключение отметим, что в апреле 2004 года в обсерватории Whipple также проводились наблюдения активного ядра галактики Mk 421 (Викес, 2004), и отмечается значительное увеличение потока гамма-квантов СВЭ в этот период времени. Авторы (Фиделис и др. 2005) считают, что в период наблюдений с 14.09 по 11.11. 2004 года ими обнаружен поток гамма-квантов СВЭ от галактики BL Lac. Для окончательного решения вопроса о величине потока гамма-квантов СВЭ от BL Lac в период сентябрь-ноябрь 2004 года, по-видимому, необходим дополнительный анализ данных наблюдений. Величины потоков гамма-квантов СВЭ от галактик Mk 501 и Mk 421 полученные в настоящей работе и в (Фиделис и др.2005 а,б) практически совпадают. Авторы благодарят С.Г. Кочеткову за помощь в подготовке статьи.

Литература

- Агаронян и др.(Aharonian F., Akhperjanian A., Beilicke M. et al) // Astron.Astrophys. 2003, V. 403, P. 1.
 Викес (Weekes T.C.) // Частное сообщение. 2004.

- Владимирский Б.М., Зыскин Ю.Л., Корниенко А.П. и др. // Изв.Крым. Астрофиз. Обсерв. 1994, Т. 91. С. 74.
- Владимирский и др. (Vladimirsky B.M., Stepanian A.A., Fomin V.P.) // 13th Internat. Conf. Ray. Denver. 1973, V. 456.
- Гриндлей и др. (Grindlay J.E., Helmken H.F., Brown Hanbury R., Davis J., Allen L.R.) // *Astroph.J.* 1975. V. 201, P. 81.
- Гриндлей и др. (Grindlay J.E., Helmken H.F., Weekes T.C.) // *Astroph.J.* 1976. V. 209. P. 592.
- Зыскин Ю.Л. и Муканов Д.Б. // Письма в Астрон. журн. 1983. V. 9. P. 219.
- Зыскин Ю.Л., Нешпор Ю.И., Степанян А.А. // Изв.АН СССР. сер. физическая. 1988. Т. 52. С. 2325.
- Калекин О.Р., Чаленко Н.Н., Зыскин Ю.Л., и др. // Изв.РАН. сер. физическая. 1999. Т. 63, С. 606.
- Катанезе и др. (Catanese M., Akerlof C.W., Badran H.M. et al.) // *Astrophys.J.* 1998. V. 501. P. 616.
- Куин и др. (Quinn J.,Akerlof C.W., Biller S. et al.) // *Astrophys. Lett.* 1996. V.456. L83.
- Нешпор и др. (Neshpor Yu.I., Kalekin O.R., Stepanian A.A., Fomin V.P., Kornienko A.P., Shitov V.G., Zyskin Yu.L.) // Proc. 24th Internat.Conf. on Cosmic Rays, August 28-September Rome. Italy. 1995. V. 8. N. 2, P. 385.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Калекин О.Р. и др. // Письма в Астрон. журн. 1998. Т. 24. С. 167.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Зыскин Ю.И. и др. // Письма в Астрон.журн. 2001а. V. 27. P. 266.
- Нешпор Ю.И., Чаленко Н.Н., Степанян А.А. и др. // Астр журн. 2001б. Т. 78. С. 291.
- Нешпор Ю.И., Жоголев Н.А., Калекин О.Р., и др. // Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 99, С. 33.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Елисеев В.С. и др. // Изв. Крым. Астрофиз. обсерв. 2004. Т. 99. С. 43.
- Панч и др.(Punch M., Akerlof C.W., Cawley M.F. et al.) // *Nature.* 1992. V. 358. P. 477.
- Степанян А.А., Нешпор Ю.И., Андреева Н.А. и др. // Астрон.журн. 2002.Т.79. С.702.
- Степанян А.А., Владимирский Б.М., Нешпор Ю.И., Фомин В.П. и др. // Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв. 1975. Т. 53. С. 29.
- Степанян А.А., Владимирский Б.М., Павлов И.В., Фомин В.П. // Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв. 1971. Т. 43. С. 42.
- Фазио и др. (Fazio G.G., Helmken H.F., O'Mongain E., Weekes T.C.) // *Astroph.J. Letters.* 1972. V. 175. L117.
- Фиделис В.В., Елисеев В.С., Жоголев Н.А., и др. // 28-я Всероссийская конференция по космическим лучам. Москва. МИФИ. 2004. С.105.
- Фиделис и др. (Fidelis V.V., Eliseev V.S., Jogolev N.A., et al.) // *Astron. Astrophis. Trans.* 2005. V.24. N.2. P.121.
- Фиделис и др. (Fidelis V.V., Neshpor Yu.I., Eliseev V.S., et.al.) // *Astron. Astrophis. Trans.* 2005а. V.24. N.1. P.53.
- Фиделис В.В., Степанян А.А., Елисеев В.С. и др. // Письма в Астрон. журн. 2005б. Т.31, N.9. С.643.
- Хоран и др. (Horan D., Badran H.M., Bond I.H. et al.) // Proc. of 27 ICRC ed. Simon V., Lorenz E., Pohl M. (Hamburg. Germany IUPAP). 2001 V. 7. P. 2622.
- Чадвик и др. (Chadwick P.M., Dipper N.A., Dawthwaite J.C. et al.) // *Nature,* 1982, V 318. P. 642.
- Чадвик и др. (Chadwick P.M., Lyons.K., McComb T.J.L. et al.) // *Astrophys.J.* 1999. V. 513. P. 161.
- Чаленко и др. (Chalenko N.N., Kalekin O.R., Neshpor Yu.I. et al.) // *Journal of Astrophys and Astronomy.* Published by The Indian Academy of Seinces. 1997. V. 18. P.151.