

МНОГОЛЕТНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ БЛАЗАРА Mrk 501 НА ЧЕРЕНКОВСКОМ ТЕЛЕСКОПЕ ГТ-48

© 2019 г. К. С. Стригунов^{1*}, А. В. Жовтан^{1**}, Ю. И. Нешпор^{1***}, Г. А. Борман^{1****}

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

Поступила в редакцию 04.08.2017 г.; после доработки 20.06.2018 г.; принята к публикации 04.09.2018 г.

На черенковском телескопе ГТ-48 Крымской астрофизической обсерватории проведен мониторинг галактики Mrk 501 длительностью в 14 лет (1997–2010 г.). Гамма-кванты сверхвысоких энергий зарегистрированы от Mrk 501 с суммарной достоверностью 15σ . Построены карты изображений прихода гамма-квантов сверхвысоких энергий. Они отождествлены с Mrk 501. Показано, что потоки в ТэВ-энергиях от Mrk 501 отличаются высокой переменностью. Приводятся кривые блеска по данным черенковских телескопов, а также телескопов, наблюдавших Mrk 501 в высоких энергиях (МэВ и ГэВ), в рентгеновском и оптическом диапазонах. На основе данных наблюдений на ГТ-48 построен ТэВ-спектр и определена величина показателя дифференциального спектра. Величины потоков и спектральные характеристики Mrk 501, определенные на основе результатов наблюдений на ГТ-48, согласуются с данными коллабораций MAGIC и H.E.S.S. соответственно.

Ключевые слова: гамма-кванты, черенковский телескоп, активные ядра галактик, блазар.

DOI: 10.1134/S0320010819010066

1. ВВЕДЕНИЕ

В 90-е годы начались исследования активных ядер галактик (АЯГ) в диапазоне сверхвысоких энергий (СВЭ) $E > 10^{11}$ эВ методом наземной гамма-астрономии. Этому способствовал запуск орбитальной обсерватории CGRO, открывшей гамма-излучение с энергией $E > 100$ МэВ от целого ряда АЯГ. С астрофизической точки зрения эти объекты вызывают огромный интерес. Они характеризуются значительными вариациями потоков излучения во всех диапазонах частот от радио- до гамма-излучения СВЭ. Характерное время вариаций меняется от суток до года. АЯГ отличаются сильной тенденцией к вспышечной (временная шкала несколько дней) и взрывной (длительность несколько месяцев) активности. Первыми среди АЯГ в диапазоне гамма-излучения СВЭ были обнаружены галактики Mrk 501 и Mrk 421 (Куинн и др., 1996). В Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) гамма-излучение СВЭ от АЯГ Mrk 501 было зарегистрировано в 1997 г. на черенковском телескопе ГТ-48 с высокой степенью достоверности: 11 стандартных отклонений

(Калекин и др., 1999). В данных 1997 г. обнаружена переменность гамма-излучения СВЭ от ночи к ночи.

2. МНОГОЛЕТНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ГТ-48 ОБЪЕКТА Mrk 501

Наблюдение АЯГ Mrk 501 (координаты на 2000 г.: $\alpha = 16^{\text{h}}53^{\text{m}}53^{\text{s}}$ и $\delta = 39^{\circ}45'32''$) проводились в КрАО с 1997 по 2010 г. включительно на телескопе ГТ-48. Черенковский телескоп ГТ-48 (изображение ГТ-48 смотрите на сайте Отдела внегалактических исследований и гамма-астрономии КрАО¹) расположен на высоте 600 м над уровнем моря и состоит из двух идентичных альт-азимутальных монтировок — северной и южной. Они расположены на расстоянии 20 м друг от друга в направлении север–юг. На каждой монтировке установлено шесть телескопов (элементов). Оптика каждого элемента состоит из четырех зеркал (диаметр 1.2 м), имеющих общий фокус. Общая площадь зеркал составляет 54 м². После алюминирования, которое проводится каждые четыре года, коэффициент отражения составляет 0.95. Отражающий слой напыляется и закрепляется методом анодного оксидирования.

* Электронный адрес: sks6891@gmail.com

** Электронный адрес: astroalex2012@gmail.com

*** Электронный адрес: yuri.neshpor@gmail.com

**** Электронный адрес: borman.ga@gmail.com

¹ http://lerga.craocrimea.ru/Instr/gt48_ru.html

Зеркала четырех элементов имеют фокусное расстояние 5 м. Они предназначены для регистрации оптического излучения в диапазоне 300–550 нм. Поле зрения телескопов (поле зрения приемной камеры телескопа) составляет 2.8° . В фокальной плоскости зеркал каждого элемента установлена камера. Камера состоит из 37 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ-140). С их помощью регистрируется изображение черенковских вспышек. Перед каждым ФЭУ стоит конический световод. Их применение позволяет увеличить коэффициент использования светового потока до 90%. Два других элемента имеют фокусное расстояние 3.2 м. Они предназначены для регистрации ультрафиолетового излучения (УФ) в диапазоне 200–300 нм. В каждой секции есть элементы, объединенные в четыре зеркала диаметром 1.2 м, в фокусе которых устанавливаются УФ-светоприемники, представляющие собой солнечно-слепые ФЭУ, максимум чувствительности которых приходится на мягкий УФ-диапазон (~ 270 нм). Регистрация УФ-излучения производится в качестве дополнительного параметра (критерия отбора), по которому также возможно разделение γ - и р-ливней путем оценивания относительного вклада УФ-излучения в полный поток. Пороговая энергия телескопа ГТ-48 составляет 1 ТэВ. Рабочий диапазон 1–70 ТэВ. Энергетическое разрешение ~ 0.5 ТэВ. Определение рабочего диапазона проводилось следующим образом. Пороговая энергия (т.е. нижняя граница диапазона) 1 ТэВ является эффективным энергетическим порогом, определяющимся как значение энергии, выше которой регистрируется 95% всех событий. Верхняя граница означает, что при энергиях свыше 70 ТэВ не представляется возможным получить отклик аппаратуры и выделить сигнал из шума, поскольку поток гамма-квантов становится $\sim 10^{-13}$ – 10^{-14} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ и меньше. Далее уточнение: разрешение в 0.5 ТэВ не сохраняется с ростом энергии, т.е. это максимальное разрешение, соответствующее энергиям вблизи 1 ТэВ. С ростом энергии и соответственно уменьшением потока разрешение уменьшается: в диапазоне энергий 1–4 ТэВ разрешение ~ 0.5 ТэВ, в диапазоне энергий 5–15 ТэВ разрешение ~ 1 ТэВ, в диапазоне энергий 15–40 ТэВ разрешение ~ 7 ТэВ, в диапазоне энергий >40 ТэВ разрешение ~ 20 ТэВ. При имеющейся статистике данных на ГТ-48 потоки поддиапазонов, величиной менее 0.5 ТэВ (например, от 1 до 1.2 ТэВ, т.е. 0.2 ТэВ) разделить практически невозможно из-за существующих ошибок. В других областях, с более высокими энергиями, разрешение ухудшается из-за понижения потока гамма-квантов. Поэтому для достоверного определения величины потока гамма-квантов приходится расширять границы поддиапазонов — только так появляется возмож-

ность получить статистически значимый результат. На телескопе ГТ-48 можно за 8.5 ч наблюдений обнаружить поток гамма-квантов ТэВ энергий от Crab Nebula с достоверностью $>5\sigma$ (Калекин и др., 1995). Точность определения направления прихода первичной частицы составляет 0.2° .

Гамма-кванты СВЭ не достигают поверхности Земли. Однако они взаимодействуют с ядрами атомов воздуха. В результате образуются широкие атмосферные ливни (ШАЛ). ШАЛ состоят из электронов и позитронов высоких энергий. Заряженные частицы ШАЛ испускают кванты черенковского излучения под малым углом ($\sim 1^\circ$) к направлению движения первичного гамма-кванта (γ -вспышки). Это позволяет проводить их регистрацию и определять направление на их источник. При этом заряженные частицы космических лучей (фон) также создают в атмосфере Земли черенковские вспышки (р-вспышки). Они мало отличаются от γ -вспышек, и в этом состоит основная проблема их селекции. Тем не менее различия есть. Многоканальные светоприемные камеры позволяют отделить подавляющую часть р-вспышек.

Наблюдения проводились двумя секциями в режиме слежения за объектом. Регистрировались события, которые наблюдались одновременно на обеих секциях. Каждый сеанс включал в себя наблюдения $N_{\text{оп}}$ (25 мин) методом слежения и отдельно наблюдение $N_{\text{оф}}$ (25 мин). Число событий (черенковских вспышек) при наблюдениях источника — это события от источника плюс события от фона ($N_{\text{оп}}$). При наблюдениях фона регистрируются только события от космических лучей $N_{\text{оф}}$. Продолжительность наблюдений на ГТ-48 $N_{\text{оп}}$ и $N_{\text{оф}}$ одинакова и определялась по кварцевым часам с точностью 10^{-3} с. Данные наблюдения проводились при одинаковых зенитных и азимутальных углах. В результате был проведен 441 сеанс наблюдений. Количество часов наблюдений Mrk 501 (источника) за все годы наблюдений составило свыше 180 ч. Систематические эффекты учитывались с помощью калибровки (Владимирский и др., 1995). Калибровка проводится после каждого сеанса наблюдений. Для калибровки использовался импульсный лазер с газовым излучателем на молекулярном азоте. Длительность импульса 15 нс. Передача светового пучка для равномерной засветки всей площади осуществляется при помощи волоконно-оптического световода. В результате с помощью калибровочных коэффициентов чувствительность каждого из 37 каналов становилась одинаковой. Также к систематическим эффектам относились события, при которых хотя бы в одном из каналов достигалось насыщение преобразователя аналог-код. Далее, к систематическим эффектам относились те вспышки, максимальная амплитуда

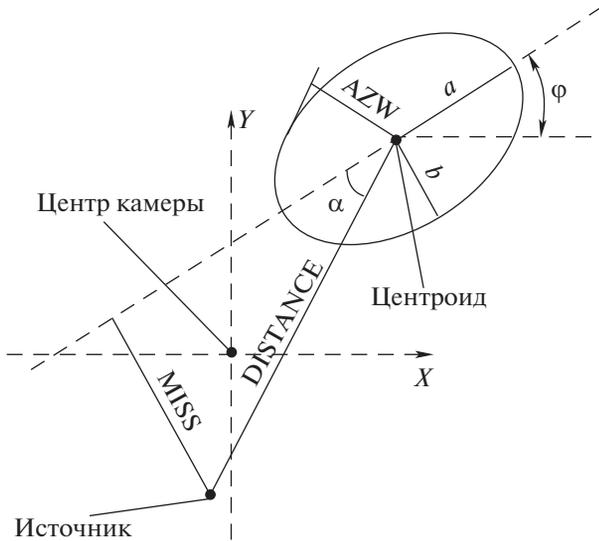


Рис. 1. Схематическое изображение некоторых параметров черенковской вспышки, представленное в виде эллипса. Полуось эллипса a — *LENGTH*; полуось эллипса b — *WIDTH*; *DISTANCE* — угловое расстояние между центром вспышки и источником; *ALPHA* — угол между большой осью вспышки и прямой, соединяющей центр вспышки и положение источника, относительно центра приемной камеры телескопа; *MISS* — наименьшее расстояние между большой осью вспышки и источником; *AZWIDTH* — азимутальная ширина; φ — позиционный угол вспышки, характеризующий направление максимальной вытянутости, т.е. ее ориентацию.

которых находилась во внешнем кольце ячеек светоприемника, поскольку для таких вспышек невозможно определить их размеры. Также учитывалась дисперсия скоростей счета черенковских вспышек в каждом из сеансов наблюдений. В процессе первичной обработки учитывались все эти эффекты. Кроме того, для обработки использовались только те данные наблюдений, которые проводились при благоприятных постоянных погодных условиях. Отметим, что наблюдения объектов проводятся в диапазоне зенитных углов от 0° до 30° (для Mrk 501 от 6° до 30°). Угловое расстояние между областью наблюдения источника (on) и областью фона (off) составляло 7.5° .

Полученные данные подвергались дальнейшей обработке, необходимой для анализа изображений вспышек, представляемых в цифровом виде. Для этого использовались математические методы. Вычислялись первые и вторые моменты распределения яркости света. Из них находились параметры каждой черенковской вспышки, которые делятся на два типа. Первый тип — параметры, не зависящие от положения источника относительно центра камеры телескопа (координатно-независимые параметры). Второй тип — параметры, зависящие от положения источника относительно центра ка-

меры телескопа (координатно-зависимые параметры). Подробно эти параметры описаны в работе (Владимирский и др., 1995). Используя различия изображений γ - и p -вспышек, можно отсеять до 99% фоновых событий. Схематическое изображение вспышки и некоторых ее параметров показаны на рис. 1. Наиболее эффективными являются координатно-зависимые критерии отбора. Величина, характеризующая эффективность отбора, обозначается Q и вычисляется по формуле

$$Q = \frac{N_\gamma / \sqrt{N_p}}{N_{\gamma 0} / \sqrt{N_{p0}}}, \quad (1)$$

где $N_{\gamma 0}$ и N_{p0} — число ливней до отбора, N_γ и N_p — число ливней после отбора. Эффективность отбора Q показывает, во сколько раз отбор увеличивает чувствительность черенковского телескопа: за фиксированное время установка обнаружит в Q раз более слабый поток гамма-квантов от объекта. При постоянной величине потока от источника время обнаружения уменьшается в Q^2 раз. К наиболее эффективным критериям относятся координатно-зависимые параметры вспышки (для них Q составляет 3–4). Следует отметить, что при отборе применяется сразу целый ряд параметров, что повышает его эффективность.

В табл. 1 значения N_{on} и N_{off} показаны за интервал времени Δt при наблюдениях галактики Mrk 501; n — число зарегистрированных гамма-квантов СВЭ за 1 мин; σ — достоверность зарегистрированного потока гамма-квантов СВЭ, которая определяется по формуле Ли и Ма (Ли, Ма, 1983)

$$S = \frac{N_{on} - N_{off}}{\sqrt{N_{on} + N_{off}}}, \quad (2)$$

где N_{on} — число событий на источнике и фоне, N_{off} — число событий на фоне.

Граничные значения параметров отбора подбирались таким образом, чтобы получить поток гамма-квантов с наибольшей достоверностью. При этом мы применяли сразу несколько параметров отбора: использовались координатно-независимые параметры (параметры A и B , т.е. большая и малая ось вспышки соответственно, поскольку A и B наиболее эффективные из координатно-независимых параметров) и координатно-зависимые параметры (в основном $ALPHA$, $AZWIDTH$ и $MISS$, поскольку они наиболее эффективны из координатно-зависимых параметров). Применение одного из параметров отсекает лишь незначительную долю p -ливней (фон) из-за того, что вспышки γ - и p -ливней схожи между собой. Однако применение комбинации параметров позволяет существенно повысить долю отсекаемого фона космических лучей; R —

Таблица 1. Результаты многолетних наблюдений Mrk 501 на ГТ-48

Год	Интервалы наблюдений (дни и месяцы)	N_{on}	N_{off}	Δt , мин	n , мин ⁻¹	σ	Поток, $\times 10^{-12}$ фотон см ⁻² с ⁻¹
1997	01.05–10.06	30139	29342	1150	0.381 ± 0.032	11.7	32.1 ± 4.6
1998	26.05–23.08	18031	17713	850	0.234 ± 0.040	5.9	25.3 ± 7.5
2000	24.06–30.07	12676	12178	575	0.148 ± 0.034	4.4	22.7 ± 4.8
2002	13.05–16.07	9400	9449	625	0.075 ± 0.025	2.9	11.6 ± 6.0
2003	28.04–06.07	20863	20475	1475	0.227 ± 0.047	4.8	21.2 ± 10.6
2004	18.05–22.07	14461	13991	1100	0.095 ± 0.019	5.0	12.3 ± 4.3
2006	23.05–26.06	6601	6292	450	0.308 ± 0.057	5.4	29.5 ± 8.2
2007	05.06–20.08	25730	25197	1450	0.055 ± 0.012	4.5	3.7 ± 2.3
2008	01.06–08.08	19311	19122	1175	0.157 ± 0.035	4.4	14.4 ± 4.9
2009	18.05–29.07	16581	17091	1350	0.053 ± 0.010	5.1	10.7 ± 3.3
2010	13.05–19.07	6909	7057	825	0.076 ± 0.017	4.4	4.0 ± 1.3

коэффициент режекции, который показывает, во сколько раз в отобранном массиве относительно содержание гамма-ливней выше, чем в исходном (данные без отбора):

$$R = \frac{N_{\gamma}/N_p}{N_{\gamma 0}/N_{p0}}, \quad (3)$$

где $N_{\gamma 0}$ и N_{p0} — число ливней до отбора, N_{γ} и N_p — число ливней после отбора. Отметим, с использованием координатно-зависимых параметров эффективность отсека фоновых событий выше, чем при использовании координатно-независимых параметров (A и B). Эффективность резко возрастает, когда при отборе используются не только параметры A и B, но и добавляются координатно-зависимые параметры (в нашем случае ALPHA, AZWIDTH и MISS). В табл. 2 показаны граничные значения параметров в той комбинации, при которой были получены скорости счета гамма-квантов для Mrk 501 с наибольшей достоверностью в каждом из годов (параметры A и B плюс координатно-зависимый параметр, отбор по которому дал наиболее достоверный результат), соответствующие среднегодовым значениям скоростей счета в табл. 1, а также коэффициент режекции R.

Было построено распределение по одному из координатно-зависимых параметров отбора для Mrk 501 (рис. 2). Представленное распределение по параметру ALPHA показывает, что эффективность отбора для Mrk 501 возросла при значениях

ALPHA (угла между большой осью вспышки и прямой, соединяющей центр вспышки и положение источника относительно центра приемной камеры телескопа) менее 25° , и число событий на источнике плюс фон (ON-data) значительно превзошло число событий на фоне (OFF-data). При отборе

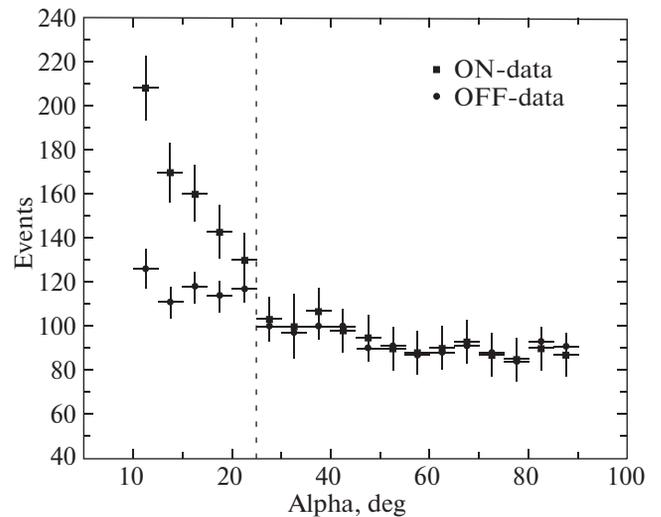


Рис. 2. Распределение числа событий по параметру ALPHA для Mrk 501. ON-data — число событий на источнике и фоне, OFF-data — число событий на фоне.

Таблица 2. Значения параметров отбора и коэффициентов режекции

Годы	Mrk 501		
	Параметры	Значения, град.	Коэффициент режекции, R
1997	A	<0.30	17.9
	B	<0.15	
	ALPHA	<27.0	
1998	A	<0.29	19.5
	B	<0.17	
	ALPHA	<30.0	
2000	A	<0.31	11.3
	B	<0.20	
	MISS	<0.22	
2002	A	<0.31	76.1
	B	<0.18	
	MISS	<0.19	
2003	A	<0.35	12.5
	B	<0.22	
	MISS	<0.21	
2004	A	<0.32	16.5
	B	<0.19	
	ALPHA	<31.0	
2006	A	<0.33	7.8
	B	<0.21	
	AZWIDTH	<0.24	
2007	A	<0.25	24.1
	B	<0.19	
	ALPHA	<23.0	
2008	A	<0.30	21.0
	B	<0.16	
	MISS	<0.15	
2009	A	<0.32	24.0
	B	<0.25	
	AZWIDTH	<0.23	
2010	A	<0.26	29.0
	B	<0.19	
	AZWIDTH	<0.19	

по параметру ALPHA на рис. 2 в наиболее достоверном результате число событий на источнике превысило число событий на фоне на 213 событий.

Отметим, что основной вклад в отсев фона космических лучей (p -ливней) вносят координатно-зависимые параметры (для примера мы показали распределение по параметру ALPHA, так как он один из эффективных критериев отбора), но с учетом отбора по параметрам A и B. Для Mrk 501 их граничные значения составили $<0.3^\circ$ и $<0.18^\circ$ соответственно. Однако из-за того, что наибольший вклад в отбор вносит именно координатно-зависимый параметр ALPHA, распределение строилось именно по этому параметру. Здесь подчеркнем: наиболее достоверные среднегодовые результаты мы получали в разные годы не только по ALPHA, однако распределение за все года (когда обрабатывались данные не за отдельные годы, а обрабатывался сразу весь массив данных за все года) достаточно построить лишь по одному из координатно-зависимых параметров (с учетом A и B, см. выше).

3. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА ГАММА-КВАНТОВ СВЭ Mrk 501

Многоканальные светоприемники гамма-телескопов второго поколения позволяют уточнять область на небесной сфере, в которой находится источник гамма-квантов. С этой целью применяется метод пробных источников (Акерлоф и др., 1991; Фомин и др., 1994; Нешпор и др., 1994). Метод основан на том, что изображения вспышек от гамма-квантов ориентированы в фокальной плоскости телескопа на источник, а большие оси эллипсов вспышек, инициированные космическими частицами, в первом приближении — равномерно по всем направлениям. Поэтому, если проводить отбор вспышек, принимая за направление на источник произвольную точку (т.н. пробный источник) в фокальной плоскости с координатами (X_i, Y_j) , и применять отбор по координатно-зависимым параметрам, то число отобранных протонных ливней не будет зависеть от положения предполагаемого источника, в то время как число отбираемых гамма-квантов будет иметь максимум, когда предполагаемый источник совпадает с истинным. Поле зрения приемной камеры телескопа составляет 2.8° . Оно разбивается на сетку с шагом в 0.1° . В “узлах” такой сетки задаются пробные источники. После обработки по какому-либо координатно-зависимому критерию отбора имеющегося массива данных получаем файл с тремя столбцами: первый — отклонения от центра камеры по прямому восхождению, второй — отклонения по склонению,

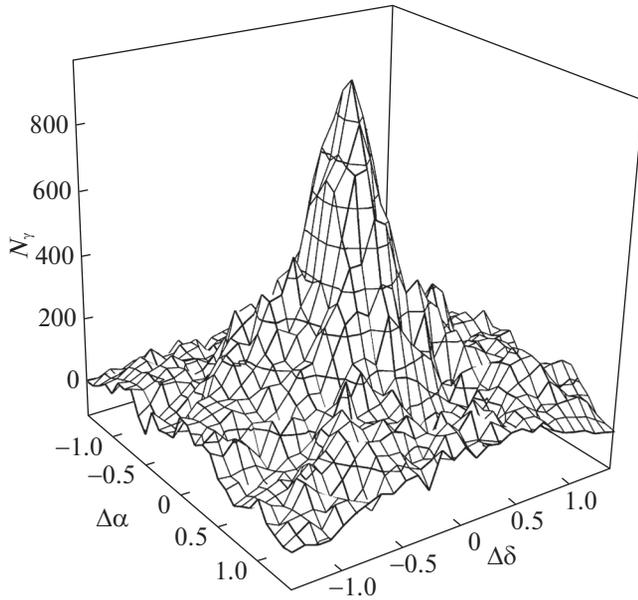


Рис. 3. Трехмерная гистограмма отобранных гамма-событий (N_γ) по полю зрения светоприемника. $\Delta\delta$ — отклонение от координат центра приемной камеры телескопа по склонению (в градусах). $\Delta\alpha$ — отклонение по прямому восхождению (в градусах). Изображение было построено, используя отбор для Mrk 501 за все годы наблюдений.

третий — число событий. Шаг отклонений составляет 0.1° . С использованием параметров отбора была построена трехмерная гистограмма числа отобранных событий по данным наблюдений источника и фона $N_{\text{оп}}$. Из гистограммы $N_{\text{оп}}$ вычиталась гистограмма, построенная для фона N_{off} . Итоговая гистограмма показывает распределение γ -вспышек по полю зрения камеры с максимумом числа γ -вспышек в направлении на источник гамма-квантов (рис. 3).

Также на основе трехмерного изображения (рис. 3) были построены изофоты (рис. 4). Максимум распределения приходится на центр камеры, совпадающий с координатами Mrk 501. В правом верхнем углу показаны числа событий. Максимальные значения соответствуют направлению на источник гамма-квантов.

4. АКТИВНОСТЬ Mrk 501 В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ. ТЭВ-СПЕКТР Mrk 501

В табл. 1 представлены средние за год результаты наблюдений галактики Mrk 501 в скоростях счета. Они получены на черенковском телескопе ГТ-48 в период с 1997 по 2010 г. включительно. Гамма-кванты СВЭ зарегистрированы от Mrk 501 с суммарной достоверностью 15σ . Кроме того, представлены среднегодовые потоки от Mrk 501 за

период с 1997 по 2010 г. включительно. Видно, что излучение СВЭ изменяется от года к году, а самое мощное возмущение произошло в 1997 г.

Кроме того, данный объект наблюдался и в других диапазонах. В частности, Mrk 501 наблюдался в оптике в КрАО в период с 1997 по 2011 г. на телескопе АЗТ-8 (изображение телескопа смотрите на сайте Отдела внегалактических исследований и гамма-астрономии КрАО²). Двухзеркальный телескоп АЗТ-8 был изготовлен Ленинградским оптико-механическим объединением (ЛОМО) в 1964 г. Оптическая система телескопа — Кассегрен. Она состоит из основного параболического зеркала ($D = 70$ см, $F = 282$ см) с относительным отверстием $F/4$ и двух вторичных зеркал, которые формируют фокусы Кассегрена $F/16$ и $F/40$ с полями зрения от 40 до 18 угл. мин. Первичный фокус обеспечивает поле зрения около 10 угл. мин. Монтровка АЗТ-8 экваториальная. Приемником является BVRI-фотометр на базе Aropgee AP7p ПЗС-камеры. Апертура для фотометрии использовалась в 15 угл. сек. Более подробная информация о телескопе АЗТ-8 доступна на сайте Отдела внегалактических исследований и гамма-астрономии КрАО. Данные в других диапазонах, в том числе и в оптическом, представлены на рис. 5. Кривая блеска в оптике построена на основе результатов наблюдений в В-фильтре (V-band, эффективная длина волны составляет 4330 \AA) на телескопе АЗТ-8 (КрАО). Данные в рентгеновских диапазонах взяты из наблюдений спутников RXTE/ASM³ и Swift BAT⁴ (диапазоны 2–10 кэВ и 15–50 кэВ соответственно). Данные в диапазоне 0.1–300 ГэВ взяты из второго Fermi-каталога (2FGL⁵), куда выкладываются данные наблюдений телескопа Fermi LAT. Потоки в диапазоне 0.1–300 ГэВ были усреднены по 30 дням. Наконец, были приведены кривые блеска Mrk 501 в диапазонах СВЭ, наблюдавшегося разными черенковскими телескопами, включая ГТ-48. Средний поток в энергиях >1 ТэВ за все годы наблюдений на ГТ-48 (1997–2010) для Mrk 501 составил $(9.7 \pm 0.9) \times 10^{-12}$ фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Данные CAT (>250 ГэВ), HEGRA CT1 (>1.5 ТэВ), MAGIC (>1 ТэВ) взяты из (Альберт и др., 2007). Данные VERITAS (>300 ГэВ) взяты из (Хуанг, Конопелько 2009; Алексис и др.,

² http://lerga.craocrimea.ru/Instr/azt8_ru.html

³ <https://cass.ucsd.edu/~rxteagn/Mkn501/Mkn501.html>

⁴ <https://swift.gsfc.nasa.gov/results/transients/weak/Mrk501>

⁵ <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/fermi/fermilasp.html>

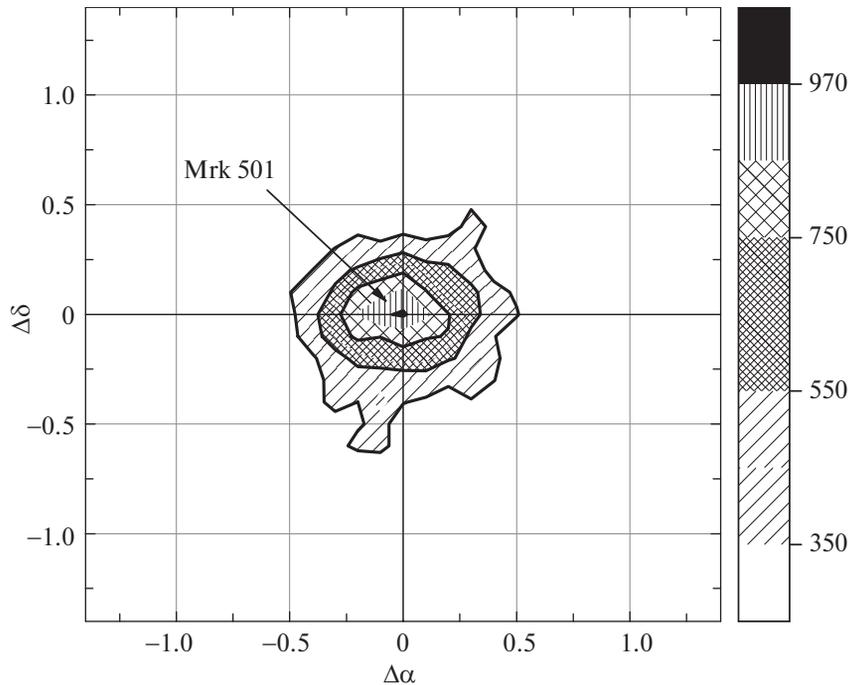


Рис. 4. Изофоты локализации гамма-источника Mrk 501. В правом верхнем углу показаны числа событий. Максимум совпадает с положением Mrk 501.

2015). Данные Whipple (>350 ГэВ) взяты на сайте⁶, а также в (Альберт и др., 2007; Груб, 2007). Наблюдения черенковских телескопов квазиодновременные. Наибольшая согласованность наблюдений Mrk 501 разными черенковскими телескопами была достигнута во время наблюдений высокоактивного состояния в 1997 г. в СВЭ — в пределах одних суток. Кроме того, отличие измерений обусловлено и тем, что они проводились в разных диапазонах энергий (показаны в правом верхнем углу рисунка). Отметим, что во время вспышек поток от Mrk 501 увеличивается более чем на порядок. Например, во время наблюдений коллаборацией VERITAS 30 апреля—1 мая 2009 г. в энергиях свыше 300 ГэВ поток от данного объекта составил 1.8×10^{-10} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ (Хуанг, Конопелько 2009). При этом повышенная активность объекта в 1997 г. была подтверждена как в СВЭ, так и в рентгене (диапазон 2–10 кэВ). Например, для энергий >1 ТэВ поток в 1997 г. превысил средний поток за все годы наблюдений на ГТ-48 в 3.1 раза. Высокая активность в СВЭ регистрировалась телескопами Whipple, HEGRA и CAT. В то же время поток в диапазоне 2–10 кэВ (RXTE/ASM) превысил свое среднее значение более чем в 6 раз.

Для поиска возможной периодичности в данных Swift BAT, Fermi LAT и АЗТ-8 был применен

⁶ <http://veritas.sao.arizona.edu/documents/summarymrk501.table>

метод Ломба—Скаргла (LS-метод) (Ломб, 1976; Скаргл, 1982), однако анализ не выявил наличия какого-либо периода в указанных энергетических диапазонах.

Помимо этого, нами был построен ТэВ-спектр для Mrk 501 по данным наблюдений на ГТ-48 (рис. 6). Спектральный индекс составил 2.0 ± 0.1 , что согласуется с результатами коллаборации H.E.S.S., по данным которой величина спектрального индекса для Mrk 501 меняется от 1.9 (состояние высокой активности, high state) до 2.3 (низкоактивное состояние, low state) (Колонья и др., 2016). Доверительный интервал для спектров H.E.S.S. и ГТ-48 для Mrk 501 составляет 95%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты наблюдений АЯГ Mrk 501 на черенковском телескопе ГТ-48 с 1997 по 2010 г. в энергиях ≥ 1 ТэВ показали, что данный объект является источником гамма-квантов СВЭ. В КраО была накоплена большая статистика данных наблюдений этого объекта за длительный период. Суммарное время наблюдений Mrk 501 за одиннадцать лет составило свыше 180 ч. Гамма-кванты СВЭ зарегистрированы от Mrk 501 с суммарной достоверностью 15σ . Данные ГТ-48 позволили впервые показать, что на протяжении столь длительного временного отрезка (~ 14 лет) среднегодовые значения потоков от данного объекта (за периоды наблюдений в каждом году на ГТ-48) в энергиях

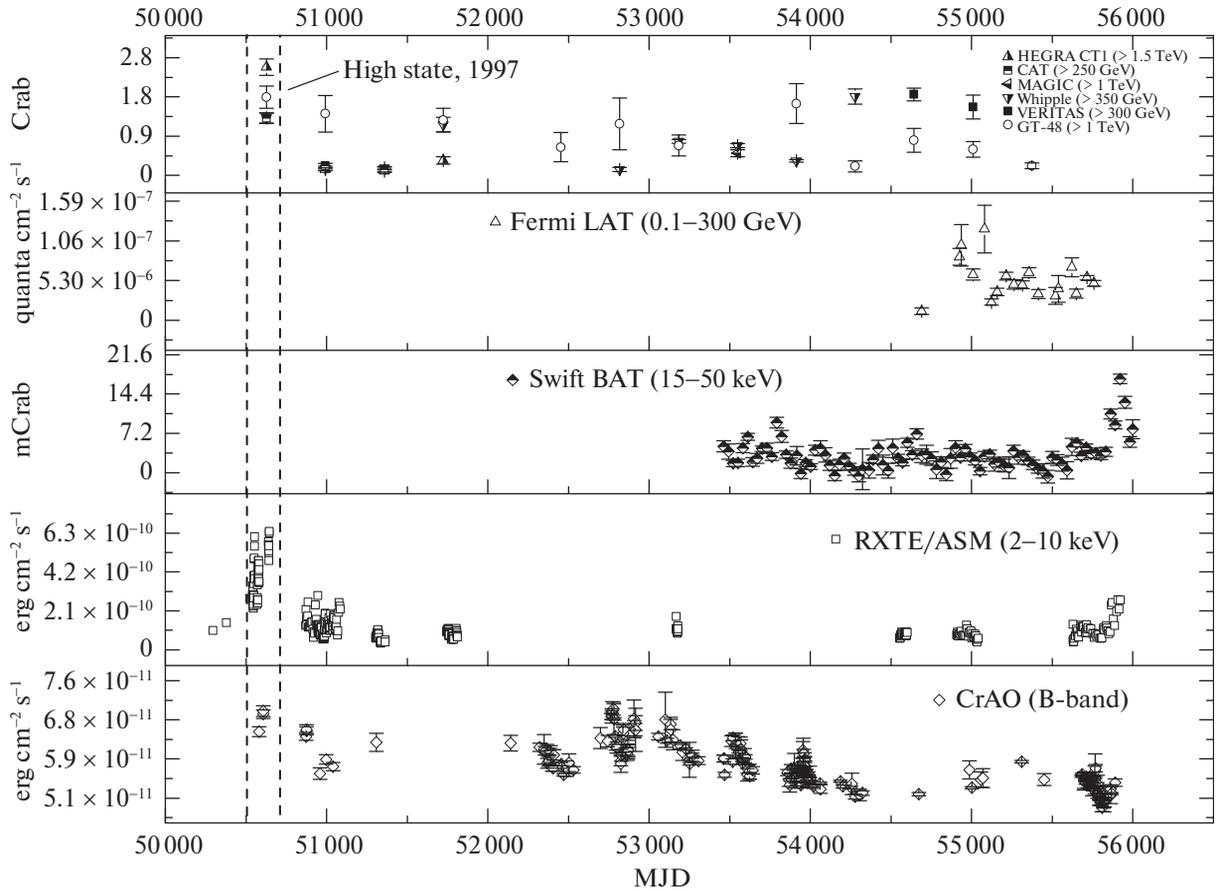


Рис. 5. Поток от Mrk 501 в различных диапазонах. Данные в СВЭ (верхний график) нормированы к 1 Crab для энергий >1 ТэВ ($1 \text{ C. U.} = 1.75 \times 10^{-11}$ фотон $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). В правом верхнем углу показаны энергии, в которых проводились наблюдения черенковскими телескопами. Данные Swift BAT (третий график сверху) отнормированы к mCrab. Коэффициент пересчета: $1 \text{ mCrab} = 0.00022$ отсчета $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Кримм и др., 2013).

≥ 1 ТэВ значительно изменялись относительно друг друга (в 9 раз). Подобный результат не получался ни на одном другом черенковском телескопе.

В соответствии с современными представлениями, в джетах АЯГ вещество движется с релятивистскими скоростями, а внутри них возникают ударные волны, что создает условия для ускорения частиц до очень высоких энергий (например, механизм Ферми 1-го рода, Ферми, 1949). В зависимости от моделей джета АЯГ состав частиц может быть адронным или лептонным, что также влияет на механизм образования гамма-квантов СВЭ. В случае адронных моделей, частицами, ответственными за образование гамма-квантов, являются протоны. Ускоряясь в джете, протоны получают колоссальную энергию (до $\sim 10^{20}$ эВ), а затем, в ходе протон-протонного или протон-фотонного взаимодействий с последующим электромагнитным каскадом, образуют жесткое гамма-излучение. В рамках лептонной модели генерация гамма-квантов СВЭ связана с обратно-комптоновским рассеянием ультрарелятивистских

электронов. Разновидностью такого механизма является рассеивание ускоренных частиц на собственных синхротронных фотонах (синхротронная самокомptonизация). Именно этот механизм, как полагают авторы в работе (Эбдо и др., 2011), лежит в основе формирования спектрального энергетического распределения Mrk 501 вплоть до гамма-излучения СВЭ. В этом сценарии излучение генерируется в одной зоне сферической формы (“blob”), размером $R \sim 10^{17}$ см, что объясняет высокую переменность излучения объектов типа Mrk 501, так как шкала переменности связана с доплер-фактором и размером области излучения как

$$t_{\text{var}} \simeq \frac{(1+z)R}{c\delta}, \quad (4)$$

где z — красное смещение, c — скорость света, δ — доплер-фактор.

Соответственно переменность, в том числе во время вспышки 1997 г., наблюдавшаяся и на ГТ-

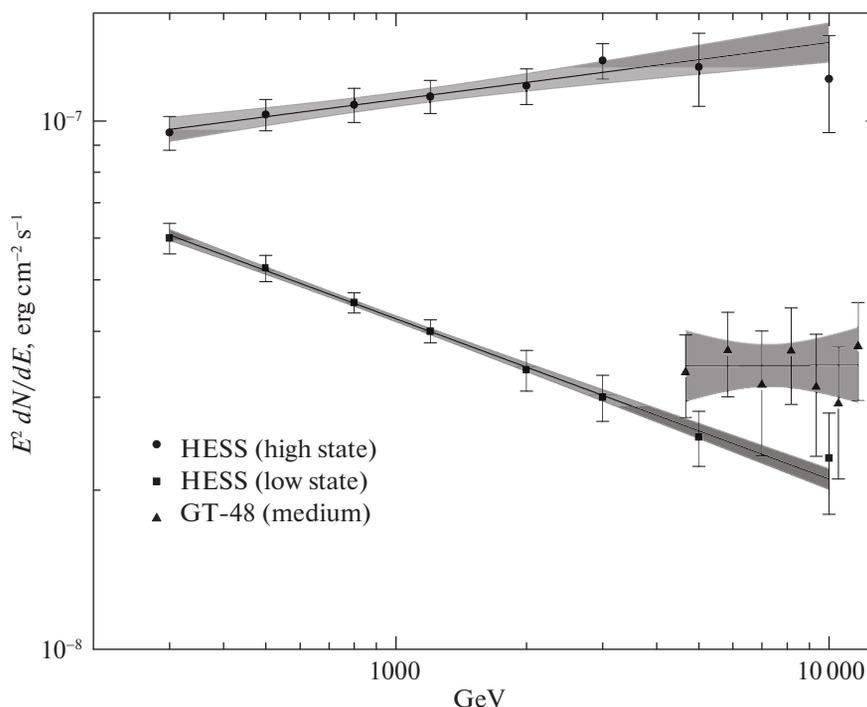


Рис. 6. ТэВ-спектр Mrk 501 (детали в тексте). Доверительный интервал составляет 95%.

48, может быть объяснена в рамках обсуждаемых моделей.

Также объект Mrk 501 наблюдался и в других диапазонах, в частности, в высоких энергиях (МэВ и ГэВ), рентгеновской и оптической областях электромагнитных волн. В отдельные периоды времени в этих диапазонах синхронно происходило резкое увеличение потоков. Например, рост активности Mrk 501 в 1997 г. во всем электромагнитном диапазоне был одним из самых значимых за всю историю наблюдений объектов этого subclasses. Однако наибольший рост был отмечен в области СВЭ. При этом анализ рядов данных LS-методом в оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах показал отсутствие какого-либо периода в них. Корреляции между рядами данных в Ферми-энергиях и рентгеновском диапазоне 15–50 кэВ не было обнаружено. Помимо анализа кривых блеска, был построен ТэВ-спектр на основе данных ГТ-48, и определена величина показателя дифференциального спектра (2.0 ± 0.1), которая согласуется с результатами, полученными коллаборацией H.E.S.S. для ТэВ-энергий.

Наблюдения Mrk 501 и других лацертид в ТэВ-энергиях необходимы для получения сведений о наименее изученном диапазоне электромагнитного излучения этих экстремальных объектов, а также для ответа на вопрос об ускорении частиц, который до конца не изучен и требует дополнительных исследований.

Авторы благодарят С.Г. Сергеева за полезные обсуждения и комментарии к статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акерлоф и др. (C.W. Akerlof, M.F. Cawley, M. Chantell, D.J. Fegan, K. Harris, A.M. Hillas, D.G. Jennings, R.C. Lamb, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **377**, 97 (1991).
2. Альберт и др. (J. Albert, E. Aliu, H. Anderhub, P. Antoranz, A. Armada, C. Baixeras, J.A. Barrio, H. Bartko, et al.), *Astrophys. J.* **669**, 862 (2007).
3. Алексис и др. (J. Aleksic, S. Ansoldi, L.A. Antonelli, P. Antoranz, A. Babic, P. Bangale, U. Barres de Almeida, et al.), *Astron. Astrophys.* **573**, A50 (2015).
4. Владимирский и др. (B.M. Vladimirskii, Yu.L. Zyskin, A.P. Kornienko, Yu.I. Neshpor, A.A. Stepanian, V.P. Fomin, and V.G. Shitov), *Bull. Crimean Astrophys. Observ.* **91**, 60 (1995).
5. Груб (J. Grube), PhD Thesis, Univ. Leeds (2007).
6. Калекин и др. (O.R. Kalekin, et al.), *Bull. Russian Acad. Sci. Phys.* **63**, 606 (1999).
7. Калекин О.Р., Нешпор Ю.И., Степанян А.А. и др., Письма в Астрон. журн. **21**, 184 (1995) [O.R. Kalekin, Yu.I. Neshpor, A.A. Stepanyan, et al., *Astron. Lett.* **21**, 163 (1995)].
8. Колонья и др. (G. Cologna, et al.), arXiv:1611.03983v1 (2016).
9. Кримм и др. (H.A. Krimm, S.T. Holland, P.H.D. Corbet, A.B. Pearlman, P. Romano, J.A. Kennea, J.S. Bloom, S.D. Barthelmy, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **209**, 14 (2013).

10. Куинн и др. (J. Quinn, C.W. Akerlof, S.D. Biller, J. Buckley, D.A. Carter-Lewis, M.F. Cawley, M. Catanese, V. Connaughton, et al.), *Astrophys. J.* **456**, L83 (1996).
11. Ли, Ма (Ti-Pei Li and Yu-Qian Ma), *Astrophys. J.* **272**, 317 (1983).
12. Ломб (N.R. Lomb), *Astrophys. Space Sci.* **39**, 447 (1976).
13. Нешпор и др. (Yu.I. Neshpor, A.P. Kornienko, and A.A. Stepanian), *Exp. Astron.* **5**, 405 (1994).
14. Скаргл (J.D. Scargle), *Astrophys. J.* **263**, 835 (1982).
15. Ферми (E. Fermi), *Phys. Rev.* **75**, 1169 (1949).
16. Фомин и др. (V.P. Fomin, S. Fennell, R.C. Lamb, D.A. Lewis, M. Punch, and T.C. Weekes), *Astropart. Phys.* **2**, 151 (1994).
17. Хуанг, Конопелько (D.H. Huang and A. Konopelko), arxiv.org/abs/0912.3772 (2009).
18. Эбдо и др. (A.A. Abdo, M. Akermann, M. Ajello, A. Allafort, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, M.G. Baring, et al.), *Astrophys. J.* **727**, 129 (2011).