

УДК 524.7+520.2

Многолетние наблюдения галактики 3С 66А

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

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный
neshpor@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 20 ноября 2010 г.

Аннотация. Проведен мониторинг гамма-излучения СВЭ и анализ данных, опубликованных в Интернете, в рентгеновском и оптическом диапазонах для активного ядра галактики 3С 66А в период с 1996 по 2009 гг. Показано, что природа процессов, ответственных за тот или иной тип излучения, очень сложная, так как в отдельные периоды времени может наблюдаться как положительная, так и отрицательная корреляция между различными типами излучения. В рентгеновском диапазоне найден период излучения $P = 363$ дня.

LONG-TERM OBSERVATIONS OF GALAXY 3C66A, *by A.V. Zhovtan, Yu.I. Neshpor, N.A. Zhogolev, E.M. Nehai, Z.N. Skiruta, V.P. Fomin.* Monitoring of the active galaxy nucleus 3C 66A in the VHE gamma-ray and the analysis of data in X-rays and optical ranges over the period 1996 to 2009 were carried out. The nature of processes responsible for one or another type of radiation appeared to be very complicated since at certain periods of time it may be observed either positive or negative correlation between different types of radiation. Period of radiation $P = 363$ days in the X-ray range was found.

Ключевые слова: активные ядра галактик, гамма-телескоп, рентгеновское излучение

1 Введение

В настоящее время активные ядра галактик (АЯГ) вызывают огромный астрофизический интерес, так как они характеризуются значительными вариациями потоков излучения в широком диапазоне частот от радио- до гамма-излучения сверхвысоких энергий $E > 10^{11}$ эВ (СВЭ). Активные ядра галактик типа Лацертиды, к которым относится галактика 3С 66А, отличаются от других космических объектов сильной тенденцией к вспышечной (временная шкала несколько дней) и взрывной активности, которая может продолжаться месяцы и даже десятки месяцев. Наблюдения активных ядер галактик в Крымской астрофизической обсерватории ведутся на гамма-телескопе ГТ-48 (Владимирский и др., 1994) с 1996 года. По данным наблюдений галактики Мк 501 в 1997 году показано, что поток гамма-квантов СВЭ 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 (Андреева и др., 2000; Андреева и др., 2001) и подтвердили наличие периодической составляющей (Краних и др., 1999) с периодом 23.2 дня (Нешпор и др., 2003).

По данным двухлетних наблюдений галактики VL Lас получена положительная корреляция между средним значением потока гамма-квантов СВЭ за одну лунацию (период наблюдений в безлунные

Таблица 1. Результаты наблюдений на ГТ-48

| Год | Дата | Длитель. наблюд. (мин) | Ng (1/мин) |
|------|-------------|------------------------------|--------------------|
| 1996 | 13.11–12.12 | 300 | 0.290 ± 0.053 |
| 1997 | 09.09–09.11 | 750 | 0.060 ± 0.023 |
| 1998 | 29.09–30.10 | 425 | 0.094 ± 0.039 |
| 2000 | 04.10–11.11 | 825 | 0.170 ± 0.033 |
| 2002 | 03.11–06.12 | 375 | $< 0.01 \pm 0.010$ |
| 2003 | 23.09–29.11 | 900 | $< 0.01 \pm 0.010$ |
| 2004 | 13.09–14.11 | 1150 | 0.097 ± 0.023 |
| 2006 | 23.08–27.11 | 1075 | 0.147 ± 0.035 |
| 2007 | 06.10–13.10 | 200 | 0.240 ± 0.060 |
| 2008 | 28.08–03.12 | 725 | 0.175 ± 0.031 |
| 2009 | 20.08–29.09 | 525 | 0.103 ± 0.022 |
| 2009 | 10.10–11.11 | 400 | $< 0.01 \pm 0.01$ |

ночи в продолжение одного месяца) и средним значением оптической яркости объекта за этот же интервал времени (Нешпор и др., 2003а).

Во время наблюдений галактики Мк 421 в период со 2 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).

В 1996 году на гамма-телескопе ГТ-48 впервые от АЯГ 3С 66А в диапазоне гамма-квантов СВЭ с большой степенью достоверности было зарегистрировано гамма-излучение СВЭ (Нешпор и др., 1998). Ранее, вплоть до конца XX столетия, считалось, что гамма-кванты СВЭ могут быть зарегистрированы только от объектов, расположенных на расстоянии с $z < 0.1$. Расстояние до галактики 3С 66А достаточно велико $z = 0.444$, и поток гамма-квантов должен быть существенно ослаблен. Это положение заставило многих астрофизиков отнестись к полученному нами результату с большой осторожностью. Однако впоследствии на гамма-телескопе VERITAS в наблюдениях за период 2007–2008 гг. зарегистрирован поток гамма-квантов с энергией $E > 100$ ГэВ с достоверностью 21.2 стандартных отклонения (Акиари и др., 2009).

В настоящее время публикуются данные наблюдений галактики 3С 66А в оптическом, рентгеновском и частично в гамма-диапазоне высоких энергий, поэтому представляет большой интерес провести сопоставление этих данных с данными, полученными на ГТ-48, что и будет сделано ниже.

2 Результаты данных наблюдений

Наблюдения активного ядра галактики 3С 66А (координаты на 2000 год $\alpha = 02^h 22^m 40^s$ и $\delta = 43^\circ 02' 08''$) проводятся в НИИ “КрАО” с 1996 года методом регистрации черенковских вспышек на гамма-телескопе ГТ-48. Результаты наблюдений представлены в таблице 1.

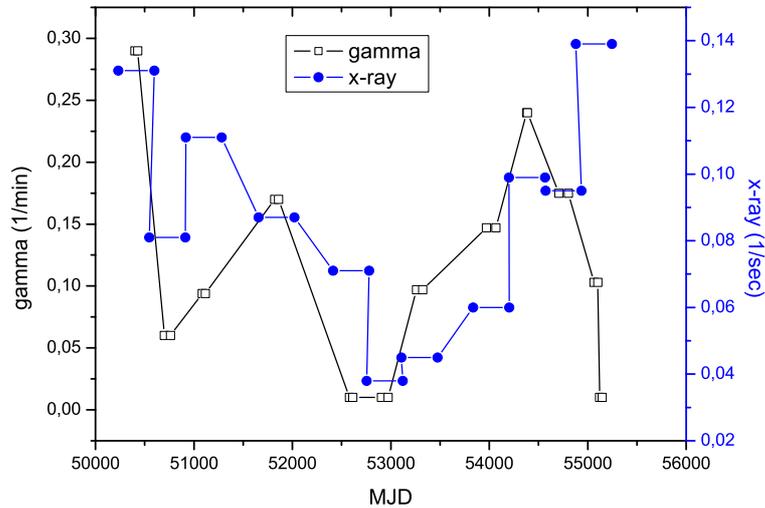
Данные о рентгеновском излучении (диапазон 2–10 кэВ) нами были взяты через Интернет (RXTE Guest Observer Facility at Goddard Space Flight Center). Для анализа были использованы средние за сутки значения потока рентгеновского излучения (ниже – х-излучение).

В таблице 2 представлены временные интервалы наблюдений и соответствующие средние значения потоков гамма-, рентгеновского и оптического излучения. Из таблицы 2 можно заметить, что имеет место переменность излучений со временем во всех трех энергетических диапазонах. Для проверки гипотезы переменности со временем потоков в каждом энергетическом диапазоне

Таблица 2. Гамма-излучение СВЭ, оптика и x-излучение.

| Год | Интервал наблюдений гамма СВЭ (MJD) | Ng (1/мин) | Оптика 10^{-6} | Интервал наблюдений x-ray (MJD) | x-ray (counts/s) |
|------|-------------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1996 | 50400–50429 | 0.290 ± 0.053 | 1.72 | 50232–50597 | 0.131 ± 0.012 |
| 1997 | 50700–50761 | 0.060 ± 0.023 | 1.15 | 50547–50912 | 0.081 ± 0.013 |
| 1998 | 51085–51116 | 0.094 ± 0.039 | 2.83 | 50917–51282 | 0.111 ± 0.014 |
| 2000 | 51821–51859 | 0.170 ± 0.033 | 1.51 | 51657–52022 | 0.087 ± 0.016 |
| 2002 | 52581–52614 | $<0.01 \pm 0.010$ | | 52414–52779 | 0.071 ± 0.014 |
| 2003 | 52905–52972 | $<0.01 \pm 0.010$ | 1.94 | 52755–53120 | 0.038 ± 0.016 |
| 2004 | 53261–53323 | 0.097 ± 0.023 | 2.49 | 53109–53474 | 0.045 ± 0.016 |
| 2006 | 53971–54067 | 0.147 ± 0.035 | 1.15 | 53837–54202 | 0.060 ± 0.017 |
| 2007 | 54380–54387 | 0.240 ± 0.060 | 2.74 | 54201–54566 | 0.099 ± 0.017 |
| 2008 | 54707–54804 | 0.175 ± 0.031 | 1.59 | 54572–54937 | 0.095 ± 0.016 |
| 2009 | 55063–55103 | 0.103 ± 0.022 | 2.00 | 54880–55245 | 0.139 ± 0.020 |
| 2009 | 55122–55146 | $<0.01 \pm 0.010$ | 2.39 | 54880–55245 | 0.139 ± 0.020 |

был использован метод χ^2 . Вычисления показали, что достоверность того, что потоки переменны составляет более четырех сигма, причем переменность гамма-излучения СВЭ более глубокая и достоверность переменности уже более пяти сигма.

**Рис. 1.** Зависимость от времени гамма-излучения СВЭ и x-излучения

На рис. 1 представлены среднегодовые значения потоков x-излучения и величины средней скорости счета N гамма-квантов СВЭ в минуту за интервал наблюдений в каждом году. При вычислении среднего потока рентгеновского излучения использован временной интервал год, но это не календарный год, а год длительностью 365 дней, в середине которого находится интервал наблюдений в гамма-диапазоне СВЭ. Из рисунка 1 видно, что в некоторых случаях наблюдается согласие между потоками гамма-излучения СВЭ и x-излучением. Так высокий поток гамма СВЭ в 1996 году

совпадает с повышенным излучением в рентгеновском диапазоне. Особенно хорошо совпадают минимумы излучения в 2003 году как в рентгене, так и гамма СВЭ, а затем наблюдается рост обоих потоков вплоть до 2008 года. Резкое различие имеем в 2009 году, если в рентгене в этот год наблюдается рост потока, то в гамма СВЭ – спад потока. При сравнении средних значений гамма СВЭ и х-излучения за интервал наблюдений 2009 года на гамма-телескопе ГТ-48 имеем ту же картину: в рентгене – наибольшее значение, а в гамма СВЭ – минимальное значение ($N_x = (0.143 \pm 0.035)1/\text{сек}$ и $N_\gamma = (< 0.01 \pm 0.01)1/\text{мин}$).

Ю.С. Ефимов (сотрудник НИИ “КрАО”) любезно предоставил нам табличные данные оптической яркости (звездные величины m) наблюдений 3С 66А, полученные в КрАО и на других обсерваториях в период с 1996 по 2009 годы. Оптическая кривая блеска представлена в произвольных единицах $10^{-0.4m}$ (см. таблицу 2).

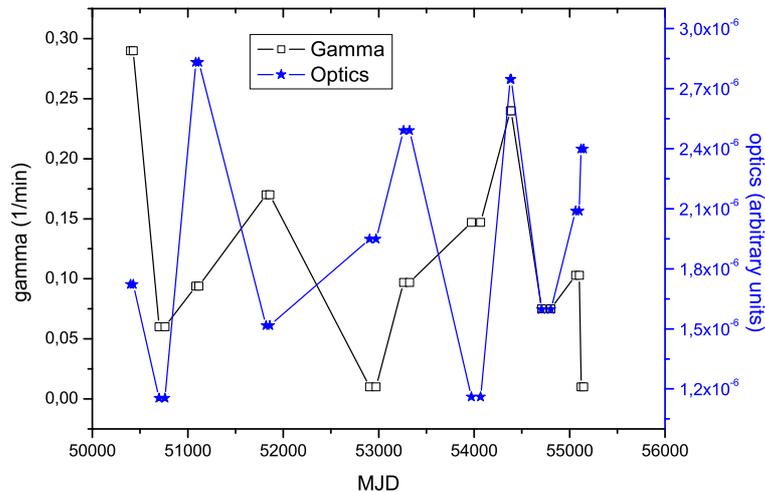


Рис. 2. Зависимость от времени гамма-излучения СВЭ и оптической яркости.

На рисунке 2 представлены величины средней скорости счета (N) гамма-квантов СВЭ в минуту за интервал наблюдений (квадратики) и изменения оптической светимости (звездочки) в те же самые интервалы времени. Из рисунка 2 видно, что в некоторых случаях в 2007 году (MJD = 54380–54387), 2008 году (54707–54804) и частично в 2009 году (55063–55137) наблюдается некоторое согласие между потоками гамма СВЭ и изменениями оптической светимости, но имеет место и обратное; так, в 2003 году (MJD = 52905–52972), если в оптике имеем светимость выше среднего значения, то поток в гамма-излучении не был зарегистрирован (определен лишь верхний предел), и наоборот, если в гамма-излучении СВЭ в 2006 году (MJD = 53971–54067) имеем значительный поток, то в оптике наблюдается спад яркости.

Проведен анализ оптического и рентгеновского излучения на предмет возможной корреляции между ними. Имеется около 640 квазиодновременных среднесуточных значений оптического блеска и потока в рентгене. Несмотря на значительный статистический материал основная проблема состоит в том, что большинство измерений величины рентгеновского потока имеют значительную ошибку. Например, из этих 640 измерений только 10 имеют достоверность $\geq 3\sigma$ и около 50 – $\geq 2\sigma$. В таком случае единственным выходом для повышения достоверности является разбиение всего интервала наблюдений на бины определенной продолжительности, например, 10, 30 или 100 суток. Тогда усредняя с весом величины потоков рентгена по бинам, можно значительно уменьшить ошибки. Были вычислены коэффициенты корреляции между оптикой и рентгеном при использовании бинов разной продолжительности. В результате получено, что при 100-дневных бинах (32 бина с достоверностью потока рентгена $\geq 2\sigma$) коэффициент корреляции равен $k = 0.46 \pm 0.09$ с достовер-

ностью больше 99 % (см. рис. 3). При использовании других бинов (10, 30, 50 суток) коэффициент корреляции был получен меньше, да и достоверность была намного ниже.

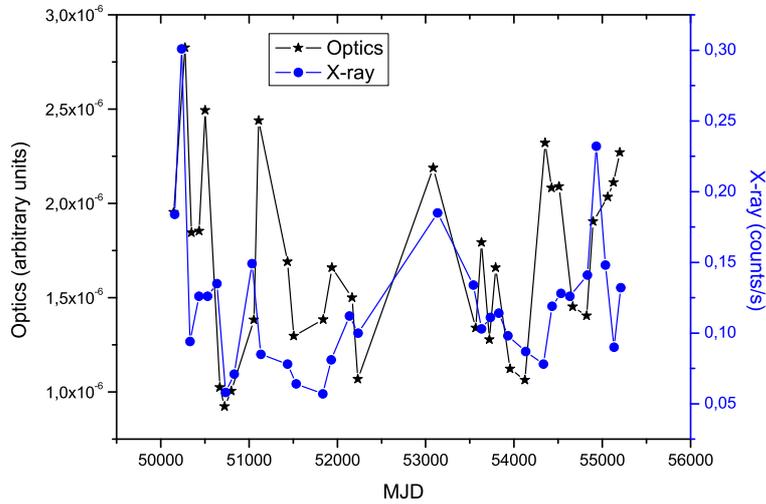


Рис. 3. Зависимость от времени х-излучения и оптической яркости

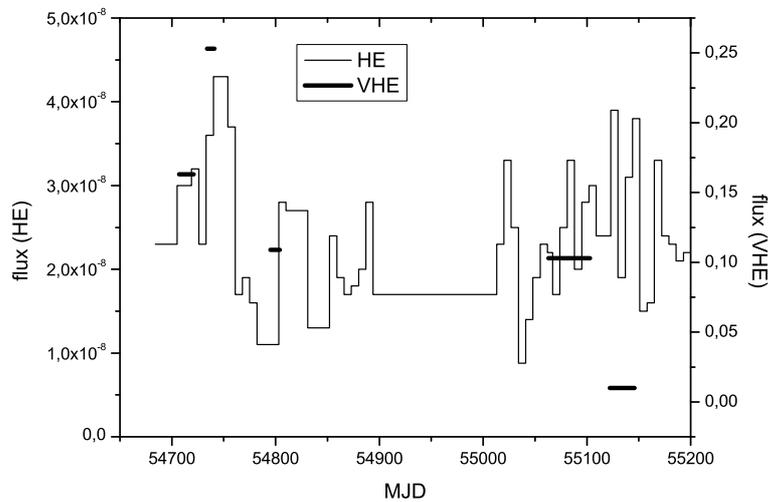


Рис. 4. Зависимость от времени гамма-излучения сверхвысоких и высоких энергий

В 2008 году на спутнике Fermi были начаты наблюдения гамма-излучения в диапазоне $E = 0.1\text{--}100$ ГэВ активного ядра галактики 3С 66А. На рисунке 4 представлены величина потока гамма-излучения высоких энергий (ВЭ), усредненная за неделю, и величина потока гамма-излучения СВЭ (отрезки прямой), усредненная за период лунации (период лунации – период наблюдений в безлунные ночи в продолжение одного месяца). В 2008 году (MJD = 54707–54804) ход изменения потоков со временем в обоих диапазонах совпадает. В 2009 году, если в период MJD = 55063–55103 наблюдается повышенные значения потоков в обоих диапазонах, то в период MJD = 55122–55146 поток

гамма-излучения ВЭ имеет повышенное значение, даже выше, чем в предыдущий период, а гамма-поток СВЭ зафиксирован с помощью ГТ-48 лишь как верхний предел.

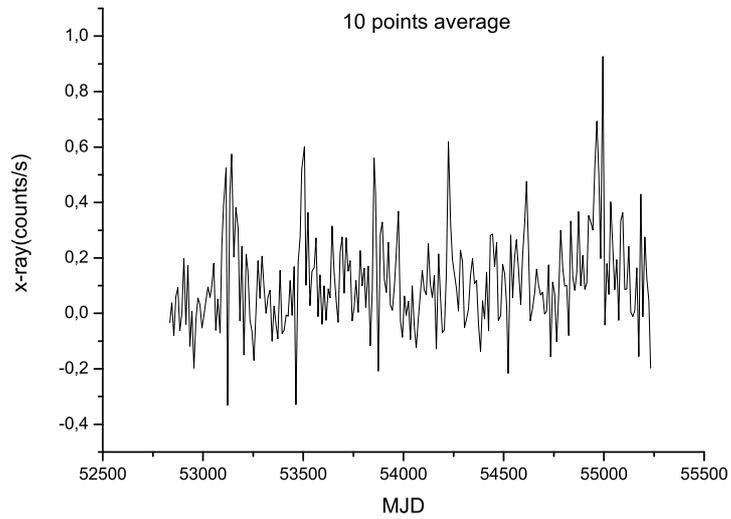


Рис. 5. Зависимость от времени средних за десять дней потока х-излучения

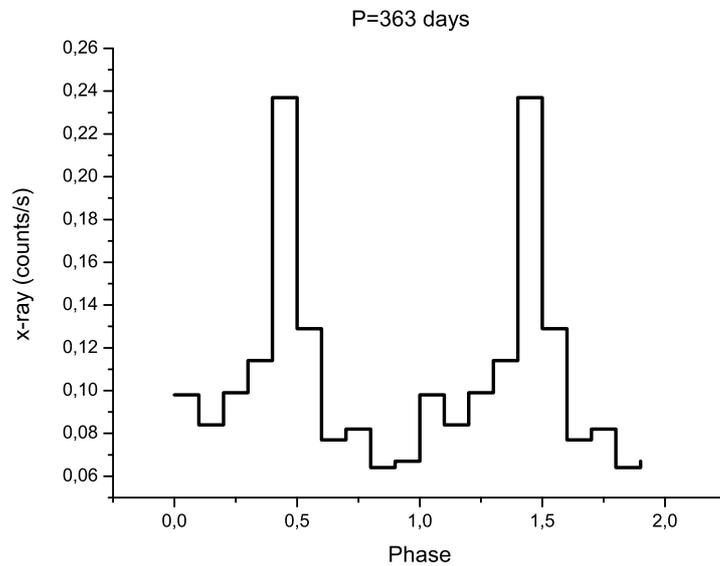


Рис. 6. Фазовая гистограмма х-излучения для периода $P = 363$ дня, где $T = 50083$ MJD (момент нулевой фазы)

3 Период в рентгене

Анализ временных вариаций рентгеновского излучения 2–10 кэВ за период $MJD = 52550\text{--}55450$ показал, что имеют место повторяющиеся через равные промежутки времени всплески потока (см. рис. 5). Обработка рентгеновских данных за весь период наблюдений методом Фурье-анализа показала с высокой достоверностью наличие периодической составляющей с периодом $P = 363 \pm 10$ суток рентгеновского излучения. При построении фазовой гистограммы (рис. 6) за нулевую фазу был выбран момент $MJD = 50083$ суток (начало 1996 года). Хорошо видно, что в интервале фаз 0.4–0.5 наблюдается максимум излучения (благоприятный интервал фаз). Поскольку нулевая фаза соответствует началу года, а период равен практически году, то интервал фаз 0.4–0.5 соответствует маю, наблюдения же галактики 3С 66А в КрАО на гамма-телескопе ГТ-48 возможны только в период август – октябрь, то есть в менее благоприятные фазы. Но это не означает, что в Крыму не имеет смысла проводить наблюдения галактики 3С 66А, так как корреляция гамма- и х-излучения не всегда наблюдается и, безусловно, имеет место и спорадическая составляющая: не сфазированное излучение, возникающее произвольным образом во времени, а величина потока может быть сравнима с величиной в благоприятной фазе, а в некоторых случаях и превышать ее, что может указывать на активные процессы генерации высокоэнергичных частиц.

4 Заключение

В результате проведенного мониторинга гамма-излучения СВЭ и анализа данных, опубликованных в Интернете, в рентгеновском (2–10 кэВ) и оптическом диапазонах активного галактического ядра 3С 66А в период времени с 1996 по 2009 годы показано статистическим анализом, что имеет место значительная переменность излучения во всех трех энергетических диапазонах. Отмечаем, что в отдельные периоды времени наблюдается согласие в изменениях потоков гамма-квантов СВЭ, рентгена и оптики. Однако имеет место в некоторые интервалы времени разногласие, то есть если в рентгеновском диапазоне наблюдается повышенное излучение, то в гамма-диапазоне СВЭ-энергий в этот же период времени наблюдается пониженное значение потока. Аналогичная картина происходит и при сравнении гамма СВЭ с оптическим излучением. Это, по-видимому, означает, что природа процессов, ответственных за генерацию того или иного диапазона излучения, очень сложная.

В рентгеновском диапазоне с высокой достоверностью найден период х-излучения $P = 363 \pm 10$ дня, который очень хорошо совпадает со значением периода 369 ± 16 дня, представленный в работе (Рани и др., 2009). Авторы пишут, что такой период может быть вызван годичной модуляцией, но мы считаем, что период $P = 363 \pm 10$ дней может быть реальным, так как имеет место очень глубокая модуляция потока рентгеновского излучения. В оптическом излучении периодических колебаний потока не обнаружено.

Авторы выражают особую благодарность сотруднику НИИ “КрАО” Ю.С. Ефимову за предоставленные данные оптических измерений яркости активного ядра галактики 3С 66А за период с 1996 по 2009 годы. Авторы благодарят Кочеткову С.Г. за помощь в подготовке статьи к печати.

Литература

- Акиари и др. (Acciari V.A., Aliu E., Arlen T., et al.) // arXiv: 0901. 4527 v1 [astro-ph. HE] 28 Jan 2009.
 Андреева Н.А., Зыскин Ю.Л., Калекин О.Р. и др. // Письма в Астрон. журн. 2000. Т. 26. С. 243.
 Андреева и др. (Andreeva N.A., Fomin V.P., Kalekin O.R., et al.) // Proceedings of JCRC 2001: 2639. Copernicus Gesellschaft. 2001.
 Владимирский Б.М., Зыскин Ю.Л., Корниенко А.А. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1994. Т. 91. С. 74.
 Калекин О.Р., Чаленко Н.Н., Зыскин Ю.Л., Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Фомин В.П., Шитов В.Г. // Изв. АН СССР. сер. физ. 1999. Т. 63. №. 3. С. 604.
 Краних и др. (Kranich D., de Jager O.C., Kastel M., et al.) // Proceedings of JCRC. 1999. OG 2. 1.18.

- Нешпор Ю.И., Жоголев Н.А., Калекин О.Р. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 99. С. 34.
- 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., Елисеев В.С. и др. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003а. Т. 99. С. 43.
- Рани и др. (Bindu Rani, Paul J. Wiita and Alok C. Gupta) // *Astrophys. J.* 2009. V. 696. P. 2170.
- Фиделис В.В., Елисеев В.С., Жоголев Н.А. и др. // 28-я Всероссийская конференция по космическим лучам. М.: МИФИ. 2004. С. 105.