

УДК 524.7

Анализ систематических ошибок монитора ASM/RXTE и гамма-телескопа ГТ-48

В.В. Фиделис

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

Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Севастополь, 99001, Украина

Поступила в редакцию 2 февраля 2011 г.

Аннотация. Представлены наблюдательные данные о вариациях кривых блеска остатков сверхновых: Крабовидной туманности, Кассиопеи А, Тихо Браге и пульсара Vela на 14-дневной шкале, которые могут быть отнесены за счет систематических ошибок монитора ASM/RXTE. Также были определены экспериментальные систематические ошибки гамма-телескопа ГТ-48 при работе в монорежиме. Для этого были использованы наблюдательные данные источника TeV J2032+4130 (по крымской версии Cyg γ -2), стационарная природа гамма-излучения которого была подтверждена многолетними наблюдениями HEGRA и MAGIC. Результаты исследований дают возможность сделать следующие заключения.

1. Кривые блеска остатков сверхновых, усредненные за продолжительные наблюдательные периоды, имеют ложные статистически значимые вариации потоков.
2. Уровень систематических ошибок пропорционален регистрируемому потоку и уменьшается с ростом временной шкалы усреднения.
3. Кривые блеска источников могут модулироваться годовым периодом.
4. Систематические ошибки гамма-телескопа ГТ-48, в сумме обусловленные наблюдением в монорежиме и обработкой данных по стереоалгоритму, составляют 0.12 мин^{-1} .

ANALYSIS OF SYSTEMATIC ERRORS OF ASM/RXTE MONITOR AND GAMMA-TELESCOPE GT-48, *by V.V. Fidelis*. The observational data concerning variations of light curves of supernovae remnants: Crab Nebula, Cassiopeia A, Ticho Brage and Pulsar Vela on 14-day scale, which may be attributed to systematic errors of ASM/RXTE monitor are presented. The experimental systematic errors of gamma-telescope GT-48 in the mono mode of operation were also determined. For that the observational data of TeV J2032+4130 (Cyg γ -2 according to Crimean version) were used, the stationary nature of its γ -ray emission was confirmed by the long-term observations performed with HEGRA and MAGIC. Results of research allow us to make the following conclusions.

1. Light curves of supernovae remnants averaged for the long observation periods have false statistically significant flux variations.
2. The level of systematic errors is proportional to the registered flux and decreases with increasing temporal scale of averaging.
3. The light curves of sources may be modulated by the year period.
4. The systematic errors of gamma-telescope GT-48, in the sum caused by observations in the mono-mode and data processing with stereo-algorithm, make 0.12 min^{-1} .

Ключевые слова: рентгеновское и гамма-излучение сверхвысоких энергий, остатки сверхновых, ОВ-ассоциации

1 Введение

Источники рентгеновского и гамма-излучения обладают переменностью в широком диапазоне временных шкал. Наблюдаемые вариации потоков могут иметь как периодический, так и случайный характер. Если вариации первого рода могут отражать упорядоченную физику процесса в источнике, то последние могут отражать как случайную природу механизма излучения, так и погрешности наблюдений. Процесс взаимодействия наблюдателя с объектом весьма сложен. Наблюдаемое излучение источника модулируется орбитальным периодом вращения Земли вокруг Солнца, а также орбитальными периодами вращения спутниковых обсерваторий вокруг Земли. Немаловажное значение имеет точность наблюдений.

Развитие инструментальной базы как наземного, так и космического базирования, позволяет исследовать вариации источников рентгеновского и гамма-излучения на различных временных шкалах. Постоянно улучшаемые чувствительности черенковских телескопов и уменьшаемые их пороговые энергии позволяют приблизить характеристики таких телескопов к орбитальным обсерваториям. Появилась возможность искать общие закономерности излучения источников и их корреляцию в кривых блеска, получаемых на двух видах инструментов. Но с увеличением длительности временных рядов, обладающих собственными статистическими ошибками, возрастает роль систематических ошибок.

Вклад систематических ошибок в оценку средних потоков зависит от их статистических свойств и частично от временных шкал корреляции (Гримм и др., 2002). С запуском орбитальной обсерватории RXTE в 1995 г. появилась возможность мониторинга в мягком рентгене большого количества источников, включая АЯГ (Читнис и др., 2009; Вен и др., 2006). Несмотря на то, что кривые блеска монитора ASM имеют систематические ошибки на уровне 3 %, добавляемые в квадратуре к статистическим ошибкам (http://xte.mit.edu/ASM_lc.xml), кривые блеска остатков сверхновых, усредненные по годам, имеют ложные статистически значимые изменения потоков. Эти аномальные результаты, отсутствующие у рентгеновских телескопов точного наведения XMM-Newton (Янсен и др., 2002) и SWIFT/XRT, связаны с наличием других источников в поле зрения (FoV) и ориентацией FoV ASM в каждом измерении.

2 Оценка систематических помех монитора ASM

Для оценки систематических ошибок монитора ASM/RXTE были выбраны источники разной интенсивности: Крабовидная туманность (Crab), Кассиопея А (Cas A), Тихо Браге (Tycho SNR) и пульсар Vela (Vela PSR). Использовались архивные данные монитора ASM в период с 21 февраля 1996 г. по 31 декабря 2006 г. (MJD50134 – 54100). С целью исключения из рассмотрения случайных выбросов, обусловленных измерениями, которые на суточной шкале достигают единиц отсч./с, среднесуточные данные наблюдений ASM/RXTE усреднялись за 14-дневные периоды (бины) с весом, обратно пропорциональным квадрату суммарной ошибки. Эти дискретные временные интервалы близки к характерным периодам наземных наблюдений гамма-активных источников в безлунные ночи. Значения потоков за интервалы усреднения вычислялись по формуле:

$$F_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{F_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}}. \quad (1)$$

Здесь F_i – значения потока (скорости счета) в моменты времени t_i , σ_i – ошибки потока, N – интервал усреднения, сутки.

Средние ошибки вычисления потоков вычислялись по формуле:

$$\sigma_{mean} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}}}. \quad (2)$$

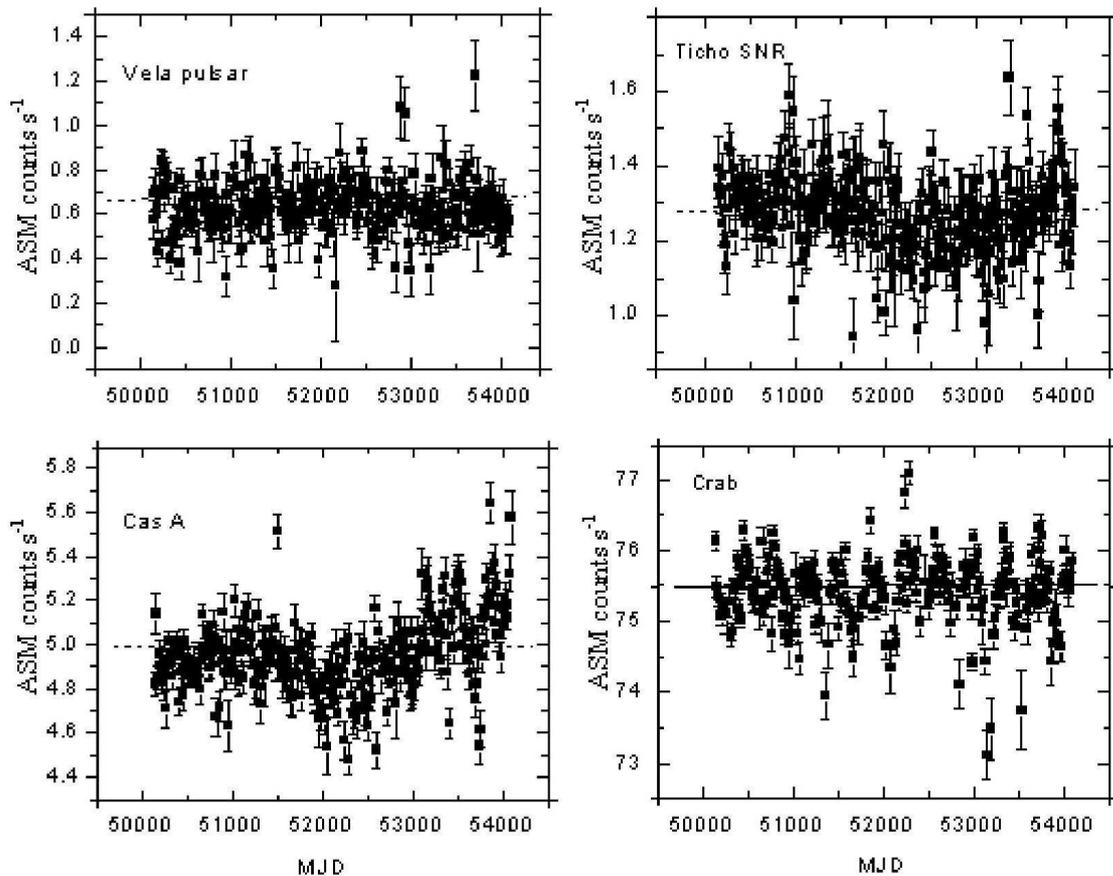


Рис. 1. Кривые блеска 4-х источников, которые принято считать “standard candles”. Диапазон энергий – 1.5–12 кэВ. Интервал усреднения составляет 14 дней. Наблюдаемые выбросы можно отнести за счет систематических помех. Штриховыми линиями проведены средние значения потоков за наблюдательный период. (Results provided by the ASM/RXTE teams at MIT and at the RXTE SOF and GOF at NASA’s GSFC)

Поскольку в кривых блеска, приведенных на рис. 1, наблюдаются примерно статистически равные выбросы на 14-дневной шкале как выше, так и ниже среднего значения потока F_{mean} за наблюдательный период, средневзвешенное значение систематической ошибки можно оценить по формуле:

$$\sigma_{sys} = \frac{(F_{above} - F_{mean}) + (F_{mean} - F_{below})}{2}. \quad (3)$$

Средневзвешенные значения потоков выше (F_{above}) и ниже (F_{below}) штриховых кривых на рис. 1 находятся по формуле (1). Их оценки приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 очевидно, что прослеживается прямая зависимость между регистрируемым потоком и оцениваемыми систематическими ошибками и обратная зависимость относительно среднеквадратических ошибок. Из этих оценок можно вычислять суммарные ошибки для наблюдаемого объекта как корень квадратный из суммы квадратов статистических и систематических ошибок (combine errors in quadrature) в предположении их независимости. Наблюдаемая среднеквадратичная ошибка в общем случае оказывается выше, чем ожидаемая, особенно при больших временных шкалах осреднения, превышающих 50 дней (Гримм и др., 2002).

Таблица 1. Результаты вычислений среднеквадратических и систематических ошибок для источников разной интенсивности по кривым блеска ASM/RXTE. ΔF_{14} – максимальные вариации потока на 14-дневной шкале. Ошибки вычисления средних потоков малы вследствие большого интервала усреднения, порядка $(1-2) \times 10^{-2}$ отсч. с^{-1}

Источник	Средний поток, отсч. с^{-1}	Поток, Краб	ΔF_{14} , отсч. с^{-1}	Rms, отсч. с^{-1}	Систем. ошибка, отсч. с^{-1}
Crab	75.5	1.000	1.50	0.006	0.3
Cas A	4.95	0.066	0.7	0.031	0.12
Tycho SNR	1.27	0.017	0.35	0.059	0.07
Vela PSR	0.63	0.008	0.57	0.129	0.08

Мы также проанализировали зависимость систематической ошибки от длительности бина для данных наблюдений Крабовидной туманности монитором ASM. Из рис. 2 очевидно, что она уменьшается с увеличением интервала усреднения.

Наличие в кривых блеска Крабовидной туманности периода, близкого к годовому (≈ 359 дней) и его субгармоник (полугодовых) (<http://xte.mit.edu>) является следствием модулирования принимаемого сигнала земным орбитальным периодом. Обнаруженная периодичность галактического микроквара SS 433 (368 дней) (Нанди и др., 2005) также указывает на годовые события в кривых блеска ASM/RXTE. Систематические ошибки в определении интенсивности излучения Крабовидной туманности, объединенные с закономерностью наведения на объект, могут также являться причиной других ложных периодов (Нешпор, Жовтан, 2009) в этом остатке сверхновой (Левайн, 2010).

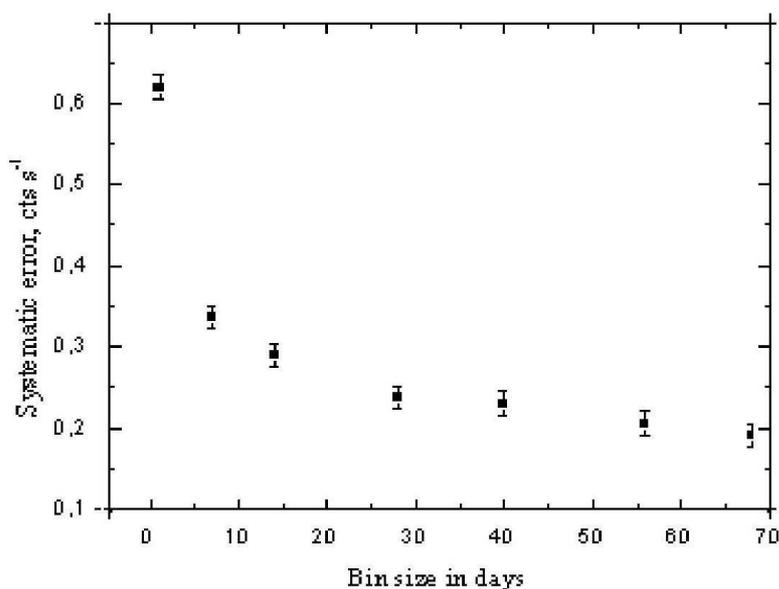


Рис. 2. Зависимость систематической ошибки от интервала усреднения для данных наблюдений Крабовидной туманности

3 Оценка систематических помех при наблюдениях на гамма-телескопе ГТ-48

Систематические ошибки черенковских телескопов различной природы могут уменьшать точность определения направлений прихода гамма-квантов. Некоторые из этих эффектов, не будучи принятыми во внимание, могут имитировать появление расширенной области излучения вокруг точечного источника (Алексис и др., 2010), а также влиять на исследование переменности гамма-излучения сверхвысоких энергий (СВЭ) на различных временных шкалах.

Гамма-телескоп ГТ-48 состоит из двух идентичных секций, оборудованных составными зеркалами и светоприемниками (Владимирский и др., 1994). Секции телескопа удалены друг от друга на 20 м, что позволяет при наблюдении в режиме совпадения между секциями использовать эффект стереоскопичности обзора широких атмосферных ливней. При наблюдении источников одной секцией обработка данных наблюдений осуществляется по существующему стереоалгоритму. Поскольку такой режим наблюдений и обработки данных используется продолжительный период времени (с 2006 г.), немаловажна оценка его погрешностей наблюдений.

Для оценки систематических помех гамма-телескопа ГТ-48 при наблюдении в монорежиме были использованы данные наблюдений источника EGRET GeV J2035+4214 (Ламб и Макомб, 1997) в диапазоне СВЭ (Суг γ -2 по крымской версии (Нешпор и др., 1995), TeV J2032+4130 по версии HEGRA). Он удален на небесной сфере на $\sim 1.5^\circ$ от микроквараза Суг X-3, что позволяет осуществлять комбинированный анализ данных наблюдений при попадании этих источников в поле зрения черенковских телескопов (Нешпор и др., 2008). Наблюдения этого источника системой черенковских телескопов HEGRA с 1999 по 2002 гг. подтвердили его стационарную природу и протяженную структуру с радиусом порядка $6'$ (Агаронян и др., 2005). Его наблюдения с помощью черенковского телескопа MAGIC в 2005, 2006 и 2007 гг. с общей экспозицией порядка 100 часов также не обнаружили признаков временных вариаций: интегральный поток был постоянен в пределах ошибок на уровне 3 % потока от Крабовидной туманности (Алберт и др., 2008).

Источник TeV J2032+4130 находится в направлении массивного кластера OB-звезд и предположительно является галактическим. Его наблюдения с помощью XMM-Newton показали наличие расширенной области рентгеновского излучения с полной шириной на уровне полумаксимума $\sim 12'$. Центроид этой области совпадает с положением TeV J2032+4130 и предположительно является рентгеновским двойником ТэВ-ного источника (Хорнс и др., 2007). Также не исключается возможность, что эта расширенная область излучения обусловлена популяцией ярких и горячих ($k_B T \approx 10$ кэВ) неразрешенных точечных источников, которые случайно совпадают с положением и протяженностью TeV J2032+4130 (Хорнс и др., 2007). Источник TeV J2032+4130, как показали наблюдения системой черенковских телескопов VERITAS, также может быть пульсаром OJG L J2032.2+4122, зарегистрированным обсерваторией Ферми (Вейнштейн и др., 2009).

Для исследований брались данные наблюдений Суг γ -2 (координаты на 2006 г. $\alpha = 20^h 32^m 50^s$; $\delta = 41^\circ 31' 43''$) в период с 4.07.2006 г. по 30.08.2006 г. (Нешпор и др., 2008). Поскольку объект TeV J2032+4130 (по крымской версии Суг γ -2) не должен обладать вариациями согласно данным наблюдений на современных черенковских телескопах HEGRA и MAGIC, его наблюдения на телескопе ГТ-48 можно рассматривать как калибровочные.

Наблюдения проводились методом слежения за объектом в течение 35 мин с последующей регистрацией фона такой же длительности, смещенного по прямому восхождению таким образом, чтобы наблюдения фона происходили при тех же зенитных и азимутальных углах, что и источника (режим ON-OFF). В обработку вошли 28 сеансов наблюдений в режиме ON-OFF в течение 18 безлунных ночей с общей экспозицией источника $16^h 20^m$. Процедура отбора γ -подобных событий от адронных подробно описана в предыдущих наших работах, например (Степанян и др., 2002).

Избыток γ -квантов, охватывающий интегральный поток γ -радиации с энергией ≥ 1 ТэВ после применения полной процедуры отбора γ -ливней от адронных ливней, составил 146 ± 30 мин $^{-1}$, что соответствует 4.8σ по параметру α (угол между направлением на источник от центра изображения и направлением главной оси эллипса изображения) и скорости регистрации событий $0.149 \pm$

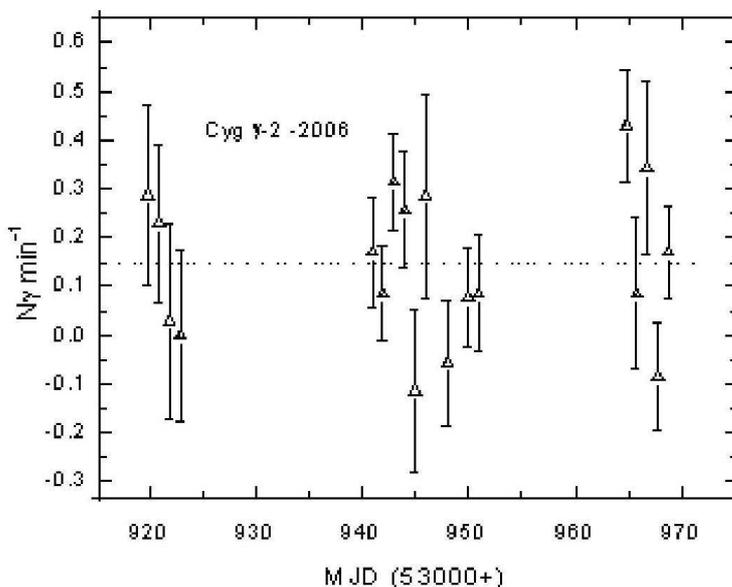


Рис. 3. Кривая блеска Cyg γ -2. N_γ — число регистрируемых γ -подобных событий. Штриховой линией указана средняя скорость счета событий за наблюдаемый период. Приведенные ошибки — статистические. Судя по характеру кривой блеска источника постоянной светимости можно сделать ложный вывод о его переменности аналогично Крабовидной туманности (Нешпор, Жовтан, 2009)

0.031 мин^{-1} . При этом отклонения от координат источника по прямому восхождению и склонению получились нулевыми. Кривая блеска источника представлена на рис. 3.

Как показывает рис. 3, вследствие наличия систематических ошибок наблюдается разброс среднечасовых значений потока выше и ниже его среднего значения аналогично данным наблюдений остатков сверхновых в рентгеновском диапазоне (рис. 1).

Для подсчета систематических ошибок также были сгруппированы файлы данных, соответствующих наблюдениям выше и ниже средней скорости счета (штриховая линия на рис. 3). В каждую из групп вошло одинаковое число файлов, что соответственно составило половину времени экспозиции источника. Эти группы файлов обрабатывались с применением параметров отбора, применявшихся к полному массиву данных. Результаты расчетов, приведенные к нулевым отклонениям от координат источника, представлены в табл. 2. Вычисленная амплитуда систематической ошибки по формуле (3) составила 0.12 мин^{-1} . Следует заметить, что вследствие малой величины потока от источника часть данных, расположенных ниже штриховой линии на рис. 3, попадает в область отрицательных значений, что определяет большую ошибку определения их среднего значения. В целом амплитуды систематических ошибок, как выше, так и ниже линии среднего потока, как следует из табл. 2, практически равны.

Среднеквадратичные ошибки кривой блеска оказались на уровне $\approx 0.08 \text{ мин}^{-1}$, что составляет $\approx 50\%$ от средней скорости счета за наблюдательный период. Следует отметить, что вклад в измеренный уровень систематических ошибок сезонной среднечасовой (наблюдательной) изменчивости зенитного расстояния источника оказался несущественным.

К сожалению, получить оценки систематических ошибок ГТ-48 для разных размеров временных бинов не представляется возможным вследствие отсутствия длинного ряда наблюдений источника постоянной светимости. Благоприятные окна наблюдений Крабовидной туманности приходятся на конец года, когда погода не благоприятствует продолжительным наблюдениям этого объекта. Источник Cyg γ -2 также наблюдался на гамма-телескопе ГТ-48 в течение 25 безлунных ночей с 18 июня по 5 сентября 2007 г. с общим временем качественной экспозиции $\approx 25^h$. Всего было отобрано

Таблица 2. Результаты вычислений систематических ошибок по кривой блеска Cug γ -2

Средний поток, отсч.с ⁻¹	Поток F_{above} , отсч.с ⁻¹	Поток F_{below} , отсч.с ⁻¹	σ_{sys} , отсч.с ⁻¹	rms, отсч.с ⁻¹
0.149±0.031	0.273±0.044	0.024±0.043	0.12	0.077

по параметру $\alpha < 0^\circ.31$ 45 γ -подобных событий на уровне 4.8σ . Делать какие-либо вероятностные оценки на таком наблюдательном материале не представляется возможным.

4 Заключение

Результаты данной работы показывают, что для использования данных монитора ASM необходимо учитывать систематические помехи, которые зависят как от интенсивности наблюдаемого источника, так и от временного масштаба осреднения. Что касается выводов о возможной периодичности Крабовидной туманности (Нешпор, Жовтан, 2009), то авторам нужно быть осторожными в интерпретации этих малых эффектов, которые могут быть соизмеримыми с систематическими ошибками инструмента, в результате чего предполагаемая переменность возникает не в источнике, а в результате обработки данных наблюдений.

Предполагается, что энергия вращения пульсара большей частью уносится релятивистским лептонным ветром. Взаимодействие этого ветра с окружающей средой вызывает стоячую ударную волну (Рис и Ганн, 1974), в которой электроны могут ускоряться по механизму Ферми. Взаимодействие этих ускоренных электронов с внешним полем синхротронных фотонов может генерировать γ -кванты СВЭ в результате обратного комптоновского процесса. Этот процесс чисто случайный, на который оказывает влияние большое количество независимых факторов, учесть которые детерминированным образом невозможно. Более детальные модели γ -излучения в Крабовидной туманности рассмотрены в работах Атояна и Агароняна (1996), де Ягера и Хардинга (1992), Беднарека и Айдеса (2010).

Следует отметить, что Крабовидная туманность вследствие ее близости (2 кпс) является в настоящее время наиболее изученным объектом, наблюдавшимся на многих инструментах точного наведения, и подобные вариации излучения неизбежно были бы зарегистрированы.

Систематические помехи измерения потоков на гамма-телескопе ГТ-48 в монорежиме оказались на уровне $\approx 80\%$, что в четыре раза превышает уровень систематических помех системы черенковских телескопов HESS, равный 20% (Агаронян и др., 2006). Эти ошибки также определялись экспериментально с использованием данных ≈ 23 часов наблюдения Крабовидной туманности на системе черенковских телескопов HESS. Уровень среднеквадратичных ошибок измерения потоков на гамма-телескопе ГТ-48 в монорежиме также существенно (примерно в 5 раз) превышает уровень среднеквадратичных ошибок системы черенковских телескопов HESS ($\approx 8\%$).

Автор благодарен анонимному оппоненту за полезные замечания и интерес, проявленный к данной работе.

Литература

- Агаронян и др. (Aharonian F., Akhperjanian A.G., Bazer-Bachi A.R., et al.) // Astron. Astrophys. 2006. V. 457. P. 899.
- Агаронян и др. (Aharonian F., Akhperjanian A., Beilicke M., et al.) // Astron. Astrophys. 2005. V. 431. P. 197.
- Алберт и др. (Albert J., Aliu E., Anderhub H., et al.) // Astrophys. J. 2008. V. 675. P. 225.
- Алексис и др. (Aleksić J., Antonelli L.A., Antoranz P., et al.) // Astron. Astrophys. 2010. V. 524. A77.

- Атоян и Агаронян (Atoyan A.M., Aharonian F.A.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1996. V. 120. P. 453.
- Беднарек и Айдег (Bednarek W. and Idec W.) // arXiv: astro-ph/1011.4176v1 18 Nov 2010.
- Вен и др. (Wen L., Levine A.M., Corbet R.H.D., Bradt H.V.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2006. V. 163. P. 372.
- Вейнштейн и др. (Weinstein Amanda for the VERITAS Collaboration) // 2009 Fermi Symposium. Washington D.C. Nov. 2–5. ArXiv:astro.ph.HE/0912.4492v1 22 Dec 2009.
- Владимирский Б.М., Зыскин Ю.Л., Корниенко А.П. и др. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1994. Т. 91. С. 74.
- Гримм и др. (Grimm H.-J., Gilfanov M., Sunyaev R.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 391. P. 923.
- Де Ягер, Хардинг (de Jager O.C., Harding A.K.) // *Astrophys. J.* 1992. V. 396. P. 161.
- Ламб и Макомб (Lamb D.Q. and Macomb D.J.) // *Astrophys. J.* 1997. V. 488. P. 872.
- Левайн (Alan M. Levine, The MIT/GSFC ASM Team) // *Частный контакт.* 2010.
- Нанди и др. (Nandi A., Chakrabarti S.K., Belloni T. and Goldoni P.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2005. V. 359. P. 629.
- Нешпор Ю.И., Жовтан А.В. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2009. Т. 105. С. 167.
- Нешпор Ю.И., Жовтан А.В., Жоголев Н.А. и др. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2008. Т. 104. P. 192.
- Нешпор и др. (Neshpor Yu.I., Kalekin O.R., Stepanian A.A., et al.) // *Proc. 24th ICRC (Rome).* 1995. V. 2. P. 1385.
- Рис и Ганн (Rees M.J. and Gunn J.T.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1974. V. 167. P. 1.
- Степанян А.А., Нешпор Ю.И., Андреева А.А. и др. // *Астрон. журн.* 2002. Т. 79. №. 7. С. 1.
- Хорнс и др. (Horns D., Hoffmann A.I.D., Santangelo A., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 469. L17.
- Читнис и др. (Chitnis V.R., Pendharkar J.K., Bose D., et al.) // *Astrophys. J.* 2009. V. 698. P. 1207.
- Янсен и др. (Jansen F., Lumb D., Altieri B., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 571. P. 753.