

УДК 524, 539.1

*Г.И. Васильев, Е.Е. Холупенко, С.Н. Яблоков, Д.А. Байко,
А.М. Быков, А.М. Красильщиков, Г.Г. Павлов*

ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ФОНА НОЧНОГО НЕБА НА НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ В ДИАПАЗОНЕ 1 – 10 ГэВ

В последнее десятилетие в развитии техники наземных черенковских гамма-телескопов достигнут существенный прогресс. Построены сложные стереоскопические системы телескопов, такие как H.E.S.S. [1], MAGIC [2], VERITAS [3], CANGAROOIII [4]. Планируются еще более сложные и совершенные системы телескопов: СТА [5] и H.E.S.S. Phase II [6]. Развитие таких систем направлено на улучшение ряда важных технических параметров (увеличение площади собирающей поверхности, повышение квантовой эффективности детекторов, увеличение количества используемых инструментов и т. п.), что, в свою очередь, должно привести к повышению чувствительности систем и расширению диапазона энергий гамма-квантов, доступных для наблюдения. В частности, предполагается, что удастся добиться уменьшения нижнего значения энергии наблюдения (так называемой энергии порога) до 5 ГэВ. Такое значение обусловлено предельными параметрами (прежде всего, эффективностью фотоэлектронных умножителей) регистрирующей аппаратуры, которую в последнее время стало технически возможным создать. При указанном значении энергии порога ключевую роль в процессе наблюдения начинают играть (наряду с ограничениями, связанными с недостатками используемой аппаратуры) природные факторы, которые не оказывали влияния при больших значениях энергии наблюдения. К таким факторам относятся, например, фон космических электронов высоких энергий [7], геомагнитное поле, более широкое рассеяние вторичных частиц ливня в

атмосфере Земли (оно ухудшает возможности идентификации черенковских вспышек, вызванных гамма-квантами).

Настоящая работа посвящена рассмотрению еще одного фактора, ограничивающего возможности наблюдения космического гамма-излучения наземными черенковскими гамма-телескопами, а именно – фона ночного неба.

Метод исследования влияния оптического фона ночного неба на вероятность регистрации космических гамма-квантов

В качестве основной характеристики, выражающей влияние диффузного оптического фона ночного неба на возможности наблюдения космического гамма-излучения наземными черенковскими гамма-телескопами, была выбрана вероятность P идентификации черенковской вспышки (рис. 1, *a*) при наличии оптического фона (рис. 1, *b*), в зависимости от энергии E первичного гамма-кванта. При выбранном методе идентификации величину P нельзя рассчитать непосредственно, но можно определить ее верхнюю и нижнюю границы, которые оказываются близкими по значению. За верхнюю границу вероятности P принимается следующая величина, определяемая в результате серии численных экспериментов:

$$P_u = \langle N_{id} / N_{tot} \rangle_{BG},$$

где N_{id} – количество идентифицированных событий, N_{tot} – общее количество симулиро-

ванных событий; скобки с нижним индексом BG означают усреднение по реализациям оптического фона (BG – от англ. background).

За нижнюю оценку вероятности P принимается величина

$$P_l = \langle N_{id} / N_{tot} \rangle_{BG} (1 - P_f),$$

где P_f – вероятность ложной идентификации черенковской вспышки, т. е. ее идентификации при наличии в фокальной плоскости телескопа только фотонов оптического фона.

Анализируемое изображение (рис. 1, б), смоделированное для фокальной плоскости телескопа, представляет собой круглую область диаметром 1,2 м, разбитую на 11310 пикселей

(форма пикселя – квадрат со стороной 1 см). Интенсивность засветки пикселя I_k (k – номер пикселя) – это количество фотонов (натуральное число) в диапазоне 300 – 600 нм, попавших в пиксель в течение временного промежутка характерной длительности 10 нс.

Для анализа изображения был использован следующий алгоритм фильтрации оптического фона.

1. Интенсивности I_k , величина которых не превышала некоторого значения I^{th} , обнуляются. Вероятность ложных регистраций черенковских вспышек P_f зависит от I^{th} . При увеличении значения I^{th} вероятность ложных регистраций стремится к нулю, но при этом

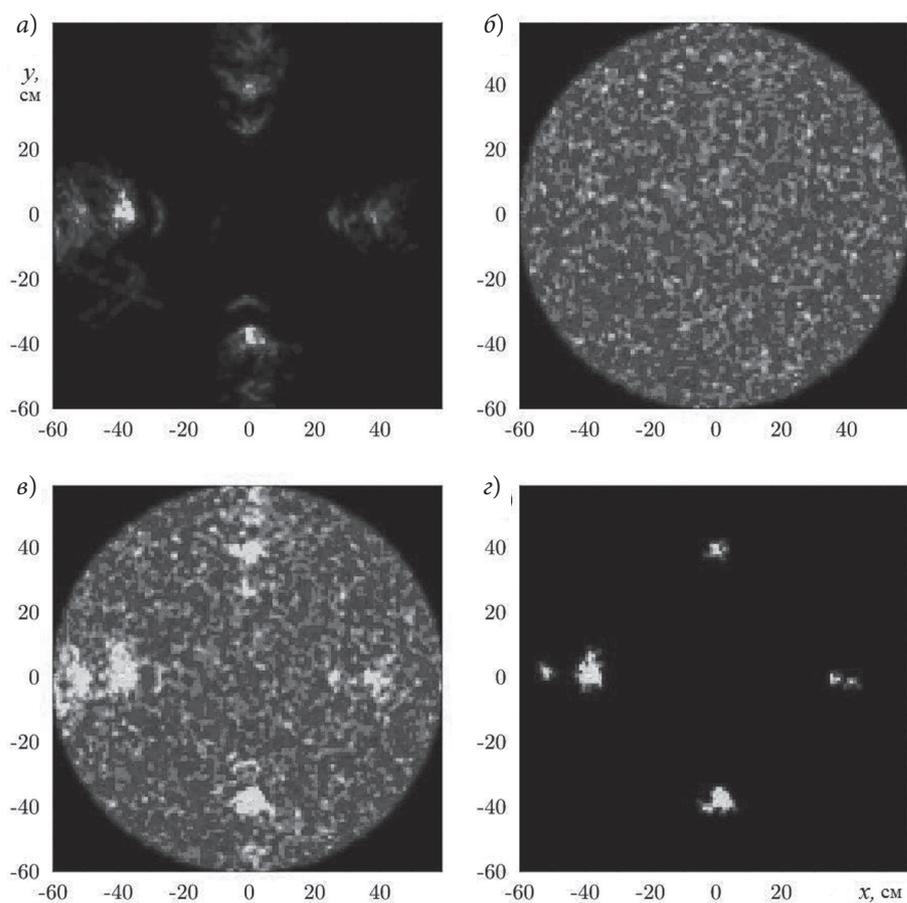


Рис. 1. Изображения в фокальных плоскостях телескопов (для удобства восприятия фокальные плоскости всех телескопов приведены на одном рисунке): *a* – черенковская вспышка, сформировавшаяся при взаимодействии гамма-кванта (энергией 5 ГэВ) с атмосферой; *б* – оптический фон ночного неба; *в* – совместное изображение *a* и *б*; *г* – изображение *в* после обработки фильтром (см. пояснения в тексте). Максимальные значения интенсивностей составляют 18 (*a*), 15 (*б*), 25 (*в, г*)



существенно уменьшается и вообще доля регистраций (т. е. существенно уменьшается величина P_u). С другой стороны, существенное уменьшение величины I^{th} приводит к росту вероятности ложных регистраций, что, в свою очередь, уже не позволяет оценить разумным образом истинное значение вероятности регистрации P . В настоящей работе был выбран специальный критерий для порогового значения I^{th} : оно определялось как минимальное натуральное число, для которого при фильтрации изображений, содержащих только оптический фон, вероятность ложных регистраций не превышает 0,02.

2. Обнуляются интенсивности тех пикселей, для которых интенсивности двух или более ближайших соседей по горизонтали либо по вертикали имеют нулевые значения.

3. В двухпиксельной окрестности по вертикали и горизонтали тех пикселей, интенсивности которых не были обнулены, восстанавливаются начальные значения интенсивностей I_k .

Результат обработки исходного изображения (рис. 1, в) представлен на рис. 1, г.

Процесс идентификации состоял в следующем: вспышка считалась зарегистрированной в том случае, если после применения вышеописанного фильтра оставался хотя бы один пиксель с ненулевой интенсивностью.

Недостатком такого подхода к идентификации черенковских вспышек можно считать тот результат, что среди идентифицированных велика доля вспышек, приводящих к засвечиванию небольшого количества пикселей (вплоть до одного). Для таких вспышек фактически невозможно как изучение их морфологических свойств (определение параметров Хилласа [8]), так и восстановление характеристик ливня (его трехмерная реконструкция) и первичной частицы (прежде всего, ее энергии). Это приводит, в частности, к существенному ухудшению возможностей селекции событий (способности отличать фотонные и лептонные события от адронных с помощью морфологических характеристик пятна, наблюдаемого от черенковской вспышки).

Но преимущество указанного метода идентификации состоит в том, что он позволяет определить общее количество гамма-квантов, приходящих с определенного направления. Это, в свою очередь, позволяет осуществлять

один из наиболее важных типов наблюдений в гамма-астрономии — регистрацию гамма-всплесков и измерение их кривых блеска (потока гамма-квантов в зависимости от времени). Вместе с наблюдениями в килоэлектронвольтном диапазоне, производимыми на орбитальных обсерваториях, таких как КОНУС-ВИНД [9] или Swift [10] (используются, в том числе, как быстрые триггеры для наблюдений в других диапазонах), измерения кривых блеска и полных потоков гамма-всплесков на энергиях более 3 ГэВ с помощью черенковских гамма-телескопов могут дать исключительно ценную информацию о физических механизмах, лежащих в основе гамма-всплесков.

Параметры моделирования черенковских вспышек и оптического фона ночного неба

При моделировании рассматривалась регистрирующая система из четырех идентичных телескопов с параболическими зеркалами диаметром 30 м, фокусным расстоянием 46,9 м и полем зрения 2,9 град, расположенных в точках с координатами (100 м, 0 м); (0 м, 100 м); (–100 м, 0 м) и (0 м, –100 м) на высоте 5 км над уровнем моря. Величина геомагнитного поля составляла 0,3 Гс, поле было направлено вдоль оси x параллельно земной поверхности. При расчетах использовалась стандартная модель атмосферы [11]. Для простоты рассмотрения и выделения главного эффекта — уменьшения вероятности регистрации под влиянием оптического фона — задавалось вертикальное падение первичного космического гамма-кванта в точку с координатами (0 м, 0 м). Значения энергии падающих гамма-квантов варьировались в диапазоне 1 — 10 ГэВ с шагом 1 ГэВ. С помощью оригинального кода [12], разработанного на основе пакета библиотек GEANT4 [13], для каждого значения энергии было смоделировано 500 событий. При симуляции оптического фона ночного неба предполагалось, что средний поток фотонов составляет $4,6 \cdot 10^3$ фотон \cdot м $^{-2}$ нс $^{-1}$ стер $^{-1}$ [14], что соответствует значению потока диффузного оптического фона из плоскости Галактики. Такое предположение дает оценку снизу вероятности идентификации черенковской вспышки от гамма-кванта, так как Галактическая плоскость — самый яркий диффузный источник на ночном небе). Было смоделировано 500 изображений оптического фона, причем каждое

соответствовало 10 нс наблюдения. В общей сложности было смоделировано и обработано 2,5 млн. изображений черенковских вспышек при наличии оптического фона. При этом вероятность ложных регистраций P_f составила 0,012.

Результаты и их обсуждение

Для представления основного результата работы – зависимости вероятности P регистрации черенковских вспышек от энергии первичного гамма-кванта E – была выбрана величина P_u ; такой выбор оправдан, поскольку разница между верхней (P_u) и нижней (P_l) оценками составляет всего 1,2 %. Зависимость P_u от E представлена на рис. 2. Видно, что вероятность идентификации черенковских вспышек существенно снижается при энергиях первичных гамма-квантов менее 10 ГэВ и достигает значения 0,5 при энергии около 2,7 ГэВ. Это обстоятельство необходимо учитывать при построении кривых блеска гамма-всплесков и определении общей интенсивности гамма-всплеска.

Пусть наблюдаемое число первичных гамма-квантов в единицу времени составляет $N_{obs}^\gamma(t)$ и предполагается, что реальный спектр гамма-всплеска имеет степенной вид, т. е.

$$n^\gamma(t, E) = (\alpha - 1) \frac{N^\gamma(t)}{E_0} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha},$$

где $n^\gamma(t, E)$ – количество фотонов в единицу времени в единичном интервале энергий, E_0 – пороговая энергия наблюдений.

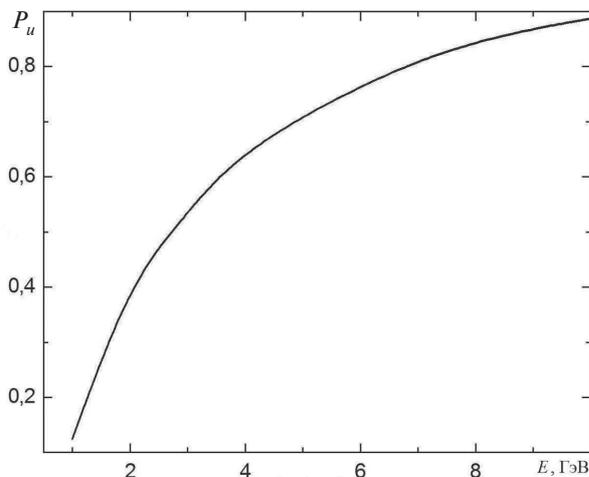


Рис. 2. Зависимость вероятности P_u (верхней оценки вероятности идентификации черенковской вспышки) от энергии первичного гамма-кванта E

В этом случае реальное число гамма-квантов $N^\gamma(t)$, приходящих в единицу времени в точку стояния телескопа, будет определяться по формуле $N^\gamma(t) = \beta(E_0, \alpha) N_{obs}^\gamma(t)$, где коэффициент $\beta(E_0, \alpha)$ дается формулой

$$\beta(E_0, \alpha) = \left(\int_{E_0}^{\infty} (\alpha - 1) \frac{P(E)}{E_0} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha} dE \right)^{-1}.$$

Результаты расчетов величины $\beta(E_0, \alpha)$ приведены в таблице. Из ее данных видно, что при значениях пороговой энергии E_0 , меньших 7 ГэВ, коэффициент $\beta(E_0, \alpha)$ существенно отличается от единицы. Это означает, что учет влияния оптического фона будет приводить к существенной недооценке интенсивности гамма-всплеска.

Результаты расчетов коэффициента $\beta(E_0, \alpha)$

E_0 , ГэВ	Значение коэффициента β при различных α				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
3	1,38	1,44	1,49	1,52	1,56
4	1,26	1,29	1,32	1,34	1,36
5	1,19	1,21	1,23	1,24	1,26
6	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19
7	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15

Таким образом, проведенный в рамках настоящей работы расчет позволяет корректно учесть количество гамма-квантов, которые не были зарегистрированы черенковским гамма-телескопом из-за влияния оптического фона ночного неба, и, соответственно, получить правильную оценку интенсивности наблюдаемого гамма-всплеска.

Авторы настоящей статьи благодарят за поддержку научную школу НШ-3769.2010.2. Часть расчетов выполнена в Межведомственном суперкомпьютерном центре РАН, а также в его филиале в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор 11.G34.31.0001) и РФФИ (гранты 11-02-12082-ОФИ-М-2011 и 11-02-00253-а).



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hofmann, W.** Status of the High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) Project [Текст] / W. Hoffman // Proceedings of 27th ICRC, Hamburg, Germany. – 2001. – Vol. 7. – P. 2785 – 2788.
2. **Fonseca, V.** The MAGIC telescope project [Текст] / V. Fonseca // Acta Physica Polonica B. – 1999. – Vol. 30. – No. 7. – P. 2331 – 2349.
3. **Weekes, T.C.** VERITAS: Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System [Текст] / T.C. Weekes, C. Akerlof, S. Biller [et al.] // Proceedings of the 25th ICRC. – Durban, South Africa. – 1997. – Vol. 5. – P. 173 – 176.
4. **Mori, M.** The CANGAROO-III project [Текст] / M. Mori, S.A. Dazeley, P.G. Edwards [et al.] // GeV–TeV Gamma Ray Astrophysics Workshop, AIP Conference Proceedings. Melville, N.Y., USA. – 2000. – Vol. 515. – P. 485 – 491.
5. **de Naurois, M.** The CTA Project [Текст] / M. de Naurois // Société Française d’Astronomie et d’Astrophysique (SF2A). – 2008. – P. 195 – 198.
6. **Vincent, P.** H.E.S.S. Phase II [Текст] / P. Vincent // Proceedings of the 29th ICRC. Pune, India. – 2005. – Vol. 5 – P. 163 – 166.
7. **Supanitsky, A.D.** Earth magnetic field effects on the cosmic electron flux as background for Cherenkov telescopes at low energies [Электронный ресурс] / A.D. Supanitsky, A.C. Rovero // arXiv:1204.1865v1 [astro-ph. IM] – 2012.
8. **Hillas, A.M.** Cherenkov light images of EAS produced by primary gamma-rays and by nuclei [Текст] / A.M. Hillas // Proceedings of the 19th ICRC. Goddard Space Flight Center, USA. – 1985. – Vol. 3 – P. 445 – 448.
9. **Aptekar, R.L.** KONUS-W gamma-ray burst experiment for ISTP wind spacecraft [Текст] / R.L. Aptekar, I.V. Dementyev, D.D. Frederiks [et al.] // AIP Conference Proceedings, Huntsville, Alabama, USA. – 1991. – Vol. 265. – P. 359 – 362.
10. **Acciari, V.A.** VERITAS observations of gamma-ray bursts detected by Swift [Текст] / V.A. Acciari, E. Aliu, T. Arlen [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2011. – Vol. 743. – Iss. 1. – art. id. 62.
11. Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet)) [Электронный ресурс]: Doc 7488-CD, Third Edition, ICAO. – 1993. ISBN 92-9194-004-6.
12. **Васильев, Г.И.** Особенности пространственного распределения черенковских фотонов в стволе широкого атмосферного ливня, вызванного гамма-квантом с энергией 5 ГэВ [Текст] / Г.И. Васильев, Е.Е. Холупенко, Д.А. Байко [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2011. – № 4 (134). – С. 79 – 86.
13. **Allison, J.** Geant4 developments and applications [Текст] / J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis [et al.] // Nuclear Science. – 2006. – Vol. 53. – P. 270 – 278. <http://geant4.cern.ch>
14. **Ona-Wilhelmi, E.** Determination of the night sky background around the Crab pulsar using its optical pulsation [Текст] / E. Ona-Wilhelmi, J. Cortina, O.C. de Jager, V. Fonseca // Astroparticle Physics. – 2004. – Vol. 22. – Iss. 1. – P. 95 – 102.

УДК 524.3-6

А.М. Быков, П.Е. Гладилин, С.М. Осипов, Г.Г. Павлов

РОЛЬ ШЛАНГОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В УСКОРЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Величина магнитного поля в предфронте ударных волн определяет максимальные энергии заряженных частиц, ускоренных волной, и характеристики наблюдаемого синхротронного излучения оболочек остатков сверхновых звезд. Спектр магнитных полей определяет длины свободного пробега частиц, ускоряемых

на ударной волне. Величина магнитного поля вблизи фронта ударной волны может превышать на несколько порядков величину магнитного поля в окружающей межзвездной среде, что следует из анализа рентгеновского излучения ряда остатков сверхновых, в которых происхождение рентгеновских фотонов обу-