

Анализ критерия отбора гамма-квантов по угловому распределению черенковского света установкой «Памир-XXI»

Р. Бахромзод^{1,*}, В.И. Галкин^{2,3†}

¹Физико-технический институт имени С.У. Умарова АН Республики Таджикистан
Таджикистан, 734063, Душанбе, ул. Айни, д. 299

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.
Скобельцына. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 26.04.2019; Подписана в печать 20.05.2019)

Анализируются критерии, выделяющие ливни от гамма-квантов на фоне протонных ливней. Описан механизм работы критериев в диапазоне первичных энергий 30–100 ТэВ. Основой разделяющего два класса событий критерия являются получаемые по измеренному угловому распределению черенковского света ШАЛ интегралы от оптической каскадной кривой по характерным диапазонам высот. Проведённый анализ открывает возможности для дальнейшего совершенствования критериев для черенковской гамма-астрономии и исследований массового состава первичных космических лучей.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

УДК: 524.1.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни (ШАЛ), черенковский свет, статистическое распознавание образов, гамма-астрономия сверхвысоких энергий.

ВВЕДЕНИЕ

Разделение событий ШАЛ от гамма-квантов и протонов является одной из важнейших задач наблюдательной гамма-астрономии сверхвысоких энергий [1–3], совершенствование критериев отбора гамма-ливней напрямую связано с чувствительностью экспериментальных установок, что позволяет уточнять характеристики известных объектов и находить новые. Пространственно-угловое распределение (ПУР) ЧС ШАЛ — одна из самых информативных характеристик атмосферного ливня — весьма чувствительно к различиям каскадов, обусловленных типом первичной частицы. Одним из общеизвестных подтверждений этого тезиса может служить замечательный успех черенковской гамма-астрономии: поток гамма-квантов высокой энергии от точечного источника выделяется на фоне потока ядер космических лучей, превосходящем сигнал на 3–4 порядка [4–8]. Ранее делались попытки перенести методику черенковской гамма-астрономии на задачу изучения массового состава ПКЛ в диапазоне первичных энергий 1 ТэВ–1 ПэВ (см., напр., [9, 10]). Позднее появились работы [3, 11–14] в которых на основании детального моделирования рассматривались критерии разделения событий на основе как традиционных, так и вновь определенных параметров угловых образов. Также была исследована чувствительность этих критериев к массе первичного ядра А. В работах [15, 16] была пред-

ложена методика разделения ливней на основе гибридной установки из быстрых оптических детекторов и черенковских угловых телескопов. Методика была разработана для высоты 4250 м над уровнем моря, в рамках проекта «Памир-XXI» [17, 18].

1. ИДЕЯ МЕТОДА И КРИТЕРИИ РАЗДЕЛЕНИЯ

Идея метода состоит в нахождении параметров формы пятна черенковского света (ЧС), максимально разделяющих события от разных первичных частиц. В нашем случае в качестве параметров, характеризующих события, используются интегралы по прямоугольным областям, расположенным перпендикулярно длинной оси пятна. Интегралы представляют продольный профиль черенковского образа, отражающий продольное развитие широкого атмосферного ливня (ШАЛ). В качестве критериев берутся характеризующие форму пятна отношения $r_{ij} = S_i/S_j$ интегралов ЧС по долям S_i , $i = 1, \dots, 4$. Ширины прямоугольников варьируются до достижения максимального разделения типов частиц. На рис. 1 показана геометрия обработки изображения. Были найдены оптимальные ширины прямоугольников, дававшие максимальное разделение (табл. 1, третья графа). Увеличение статистики не изменило найденных ранее критериев [15], и результат разделения для разных энергий и расстояний для 2400 искусственных событий приведен в табл. 1. Пример распределения значений критерия для пары «гамма-кванты 30 ТэВ – протоны 60 ТэВ» показан на рис. 2.

*E-mail: rizo@physics.msu.ru

†E-mail: vi.galkin@physics.msu.ru

Таблица I: Вероятности ошибки классификации. Третья графа в таблицах показывает оптимальные ширины маленьких прямоугольников. Подчеркнутые цифры показывают ширину прямоугольника, интеграл по которому стоит в числителе критерия, жирные цифры – ширину прямоугольника-области интегрирования знаменателя

Расстояние от оси ливня	$P\{p \rightarrow \gamma\} / P\{\gamma \rightarrow p\}$	Ширины прямоугольников 1-4, °
	γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ	
50 м	0.0008928/0.3754	<u>0.62</u> 0.33 0.51 0.55
100 м	0.0008710/0.5713	0.40 <u>0.35</u> 0.36 0.51
	γ 50 ТэВ – p 100 ТэВ	
50 м	0.0008503/0.3494	<u>0.62</u> 0.33 0.51 0.55
100 м	0.0008561/0.5234	0.40 <u>0.35</u> 0.36 0.51

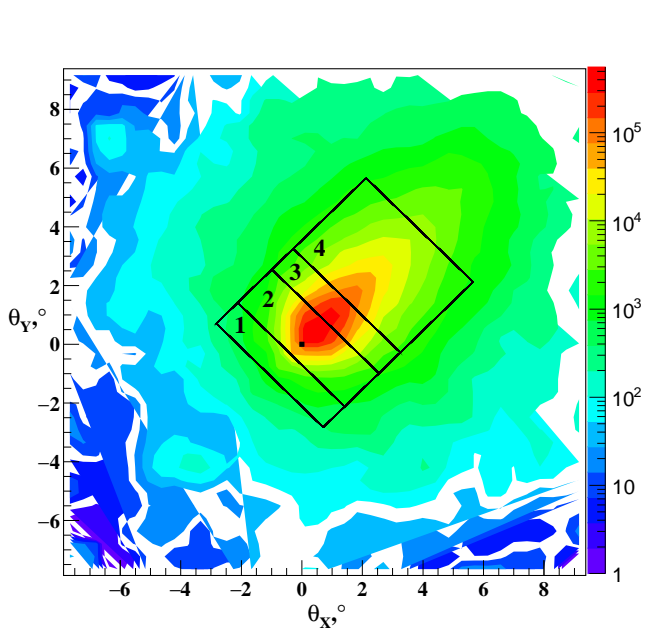


Рис. 1: Изображение ливня и прямоугольные области интегрирования, перпендикулярные длинной оси пятна. Черный квадрат в центре поле зрения указывает на направление прихода ливня. Пятно от ЧС разделено на прямоугольники 1,2,3,4. Ширина большого прямоугольника составляет 5°. Внешняя сторона прямоугольника 1 отстоит на -1.5° от направления прихода ливня вдоль длинной оси пятна

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НАЙДЕННЫХ КРИТЕРИЕВ

Факт работоспособности критериев был установлен нами в предыдущих работах, но физические основы её исследованы не были. Поэтому было принято решение исследовать связи используемых в критериях характеристик пятна ЧС с характеристиками продольного развития ШАЛ.

Были проанализированы высоты излучения черенковских фотонов, которые приходят в описанные выше области интегрирования. Было смоделировано по 60 искусственных вертикальных событий ШАЛ от гамма-

Гамма 30 ТэВ - Протон 60 ТэВ, 50 м

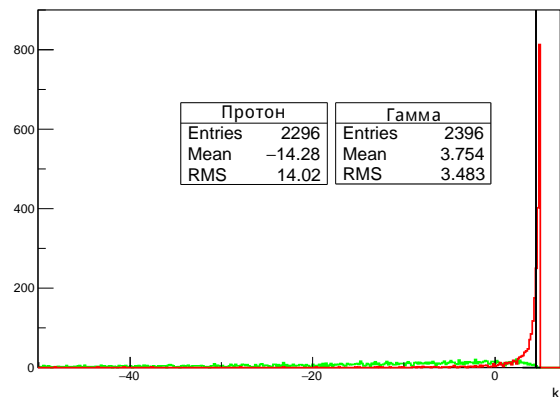


Рис. 2: Распределения значений оптимального критерия для пар γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ на расстоянии 50 м от оси ливня. Вертикальная черная линия указывает на границу между гамма-квантами и протонами и проведена таким образом, чтобы в области гамма-квантов оставался только один протон

квантов и протонов с энергиями 30 и 60 ТэВ, соответственно, для уровня наблюдения 4250 м над уровнем моря с помощью кода CORSIKA6.990/QGSJET01 [19]. Результатами расчёта стали пятна ЧС — оптические образы ШАЛ в поле зрения черенковского телескопа с размерами пикселя 0.75° x 0.75° — и карты высот излучения света с усреднением по тем же пикселям для каждого из разыгранных событий. Индивидуальные образы и карты высот излучения существенно флуктуируют, что затрудняло анализ. Поэтому по каждой выборке были вычислены средние образы и карты высот излучения (рис. 3 и 4) и карты среднеквадратичных отклонений для обоих типов данных.

Наша интерпретация причин эффективности оптимального критерия такова: области интегрирования черенковского пятна в результате автоматического поиска были выбраны таким образом, что числитель и знаменатель критерия получают свет от существенно разных стадий развития ливня (см. табл. 2), поэтому различия каскадных кривых ливней разной при-

Таблица II: Средние высота излучения ЧС для разных расстояний и первичных частиц

$R = 50$ м		
тип	Высота для 1*, м	Высота для 3*, м
гамма	5400–5700	5800–6400
протон	6100–7100	6800–7800
$R=100$ м		
тип	Высота для 2*, м	Высота для 4*, м
гамма	6200–6500	6800–9200
протон	6800–7200	7800–10000

*номер прямоугольника, по которому берется интеграл

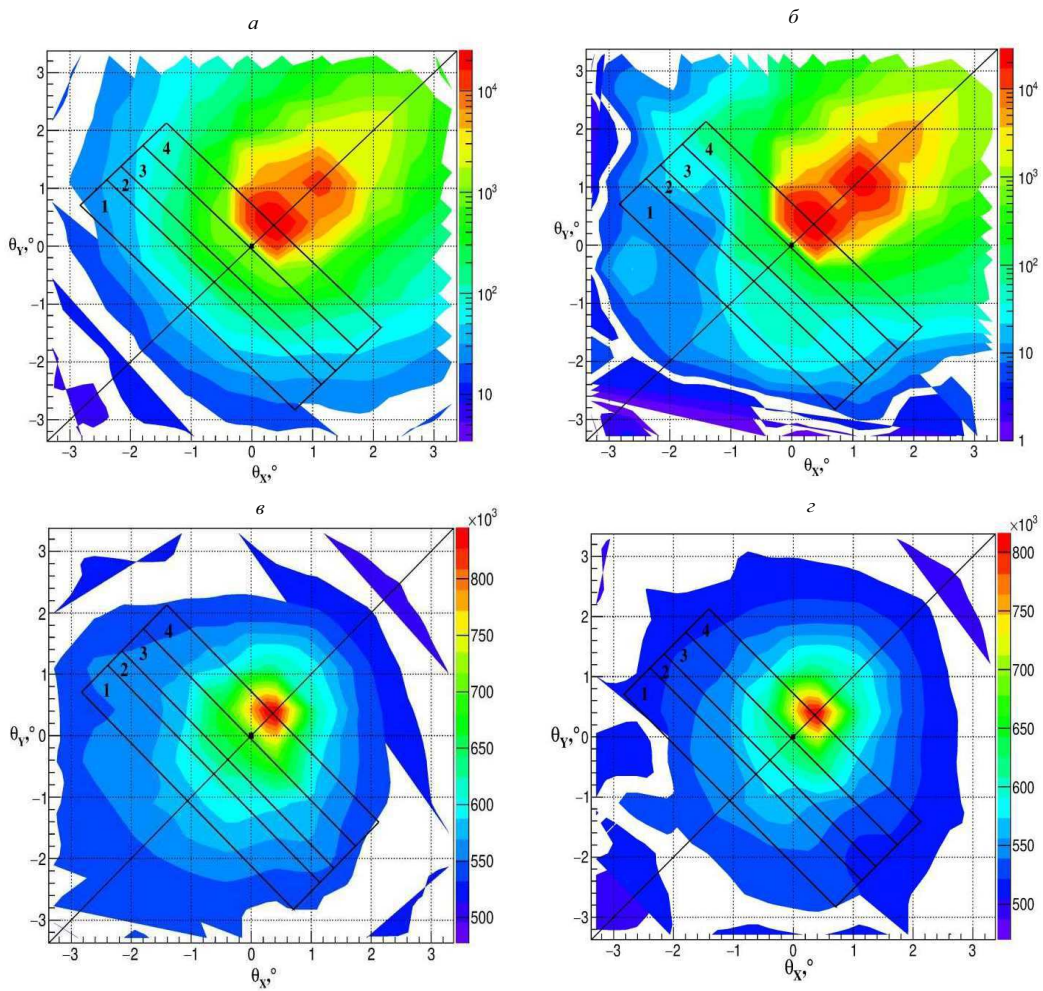


Рис. 3: *a* — усредненный образ ЧС от протонов 60 ТэВ; *б* — усредненный образ ЧС от гамма-квантов 30 ТэВ. *в* — усредненная высота излучения ЧС от протонов 60 ТэВ; *г* — усредненная высота излучения ЧС от гамма-квантов 30 ТэВ. Для всех случаев расстояние от оси ливня до телескопа 50 м. Прямоугольники показывают область интегрирования. В данном случае, отношение интеграла по прямоугольнику 1 к интегралу по прямоугольнику 3 является критерием, дающим максимальное разделение

роды в среднем приводят к разным значениям критерия. Поскольку каскадные флуктуации велики, велики и флуктуации образов, и даже оптимизированные

критерии не могут полностью разделить классы событий. Нам представляется, что дальнейший анализ карт высот излучения плодотворен с точки зрения поиска

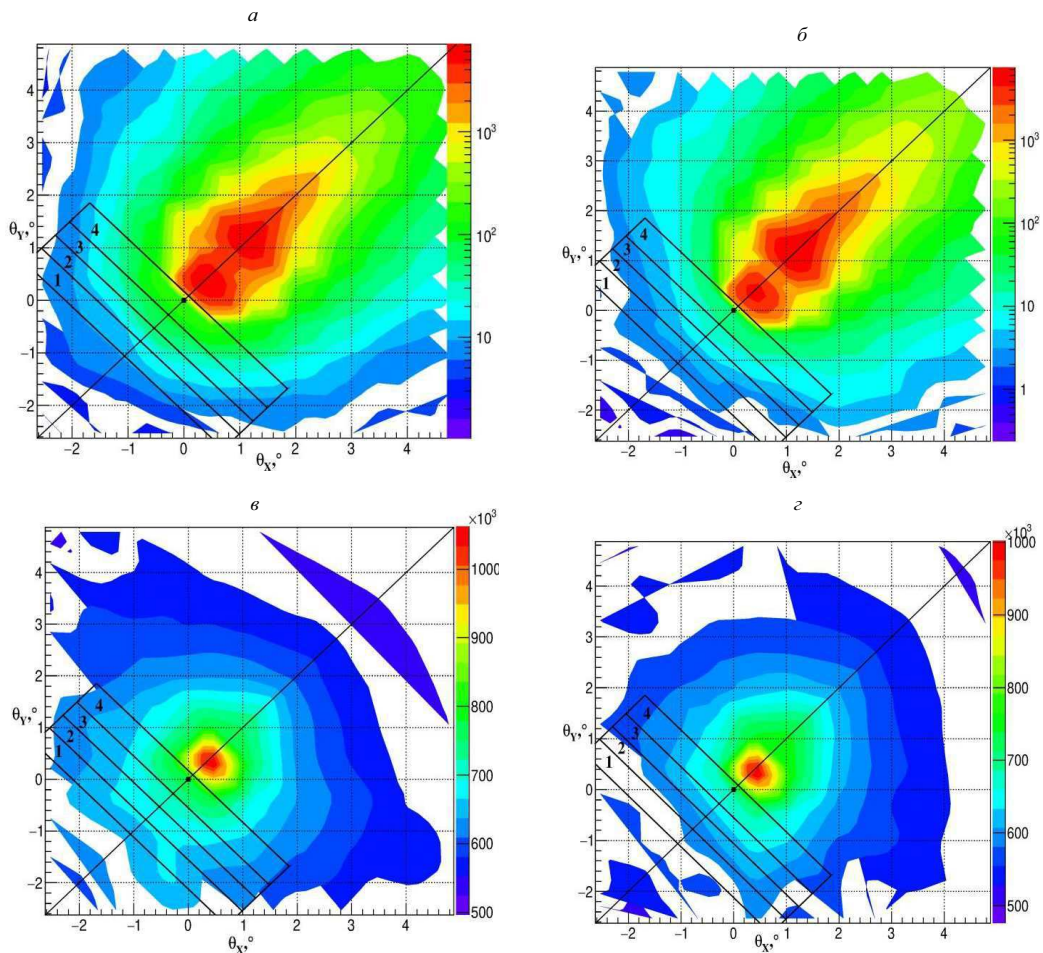


Рис. 4: *a* — усредненный образ ЧС от протонов 60 ТэВ; *б* — усредненный образ от гамма-квантов 30 ТэВ. *в* — усредненная высота излучения ЧС от протонов 60 ТэВ; *г* — усредненная высота излучения ЧС от гамма-квантов 30 ТэВ. Для всех случаев расстояние от оси ливня до телескопа 100 м. Прямоугольники показывают область интегрирования. В данном случае, отношение интеграла по прямоугольнику 2 к интегралу по прямоугольнику 4 является критерием, дающим максимальное разделение

более оптимальных областей интегрирования образа для построения критериев с меньшими ошибками классификации. Похожие критерии разрабатывались нами также для анализа массового состава первичных космических лучей в диапазоне энергий 1–100 ТэВ [16], для улучшения этих критериев предлагаемый способ анализа карт высот излучения также будет полезен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ высот излучения черенковских квантов позволяет объяснить механизм работы найденного нами

ранее критерия отбора гамма-ливней на фоне протонных событий. Механизм заключается в сравнении интенсивностей черенковского излучения с разных высот.

Предлагаемый способ анализа черенковского света ШАЛ может быть использован как для совершенствования критерия отбора гамма-ливней в черенковской гамма-астрономии, так и для улучшения разделения ШАЛ по массам первичных ядер при исследовании космических лучей сверхвысоких энергий.

[1] Hillas A. M. // Space Science Reviews. 1996. **75**, № 1-2, P. 17.
 [2] Zha M., Liao W., Fan W., Yu C., Chen M. // PoS

(ICRC2017) 2017. **842**. P. 1.
 [3] Галкин В. И., Джатдоев Т. А. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2011. **75**. С. 338. (Galkin V. I., Dzhatdov T. A. //

- Bull. Rus. Ac. Sci. Phys. 2011. **75**. P. 309.)
- [4] *Weekes T. C., Cawley M. F., Fegan D. J.* et al. // *Astrophys. J.* 1989. **342**. P. 379.
- [5] *Puhlhofer G., Bolz O., Gotting N.* et al. (HEGRA Collaboration) // *Astropart. Phys.* 2003. **20**. P. 267.
- [6] *Hinton J. A.* // *New Astron. Rev.* 2004. **48**. P. 331.
- [7] *Ferenc D.* for the MAGIC Collaboration // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2005. **553**. P. 274
- [8] *Aharonian F., Akhperjanian A. G., Barres de Almeida U.* et al. *A&A.* 2008. **477**, P. 353.
- [9] *Plyashennikov A. V., Konopelko A. K., Ahorianian F. A.* et al. // *J. Phys. G.* 1998. **24**. P. 653.
- [10] *Ahoranian F. A., Bugayev V. V., Kettler J.* et al. // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* 2003. **201**. P. 217.
- [11] *Anokhina A. M., Antonov R. A., Bonvech E. A.* et al. // *Proc 30th ICRC.* 2008. Merida.5. P.945.
- [12] *Anokhina A. M., Antonov R. A., Bonvech E. A.* et al. // *Bull. of the Lebedev Physics Institute.* 2009. **36**. P. 146.
- [13] *Anokhina A. M., Antonov R. A., Bonvech E. A.* et al. // *Proc. 31th ICRC.* 2009. Lodz. id. 434.
- [14] *Галкин В. И., Джамдоев Т. А.* // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2010. №3. С. 37. (*Galkin V. I., Dzhatdоеv T. A.* *Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2010. 65, N 3. P. 195.)
- [15] *Бахромзод Р., Галкин В. И.* // *Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та.* 2018. N 3. 1830203.
- [16] *Галкин В. И., Борисов А. С., Бахромзод Р., Батраев В. В., Латипова С. З., Мукумов А. Р.* // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2018. № 2. С. 56. (*Galkin V. I., Borisov A. S., Bakhromzod R., Batraev V. V., Latipova S. Z., Muqumov A. R.* // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2018. **73**, N 2. P. 179).
- [17] *Borisov A. S., Galkin V. I.* // *J. Phys: Conf. Ser.* 2013. **409**. 012089.
- [18] *Borisov A., Muminov Kh., Galkin V., Puchkov V.* // *EPJ Web of Conferences.* 2013. **52**. 11002.
- [19] *Heck D., Pierog T.* CORSIKA User's Guide, Karlsruhe institut fur technologie (KIT). 2011.

Analysis of the criterion for the selection of gamma rays by the angular distribution of Cherenkov light for «Pamir-XXI» experiment

R. Bakhromzod^{1,a}, V. I. Galkin^{2,3,b}

¹*Umarov Physical-Technical Institute of Academy of Sciences of Tajikistan
Dushanbe 734063, Tajikistan*

²*Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

³*D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^arizo@physics.msu.ru, ^bvi.galkin@physics.msu.ru

Criteria are analyzed for the selection of gamma-ray showers against the background of proton showers. The mechanism of criterion functioning is described in the primary energy range 30–100 TeV. The basis of a criterion capable of separating the two classes of events is formed by the integrals of the optical cascade curve over the characteristic altitude ranges which are obtained from the measured angular distribution of Cherenkov light of an extensive air shower. The conducted analysis gives way to further improvements of criteria for Cherenkov gamma-ray astronomy and the study of mass composition of the primary cosmic rays.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

Keywords: extensive air showers, Cherenkov light, statistical pattern recognition, gamma-proton separation.

Received 26 April 2019.

Сведения об авторах

- Бахромзод Ризои — вед. науч. сотрудник; e-mail: rizo@physics.msu.ru.
- Галкин Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел: (495) 939-36-06, e-mail: vi.galkin@physics.msu.ru.