

Поиск оптимальных критериев для выделения широких атмосферных ливней от γ -квантов

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

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

²Физико-технический институт имени С.У. Умарова АН Республики Таджикистан
Таджикистан, 734063, Душанбе, ул. Айни, д. 299

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 29.03.2018; Подписана в печать 27.04.2018)

Предложена методика выделения ШАЛ от гамма-квантов сверхвысокой энергии на фоне протонов угловыми черенковскими телескопами. Эта методика была разработана в рамках проекта «Памир-XXI», но она может быть полезна как для других высокогорных проектов, так и для метода ШАЛ вообще. Приведен конкретный вариант конфигурации оптических детекторов для регистрации черенковского света ШАЛ и способы обработки их данных и достижимые точности выделения гамма-квантов на фоне протонов. Рассмотрены ШАЛ от протонов и гамма-квантов с энергиями $E \geq 30$ ТэВ.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

УДК: 524.1.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, черенковский свет, статистическое моделирование, статистическое распознавание образов, гамма-кванты.

ВВЕДЕНИЕ

Проект «Памир-XXI» [1] планировался как комплексное исследование первичного космического излучения (ПКИ) в широком диапазоне энергий 30 ТэВ–1 ЭэВ и характеристик ядерного взаимодействия, не доступных для изучения на ускорителях. Большая высота наблюдения (4250–4260 м над уровнем моря) даёт определенные преимущества для решения астрофизических задач: изучения энергетического спектра и массового состава ПКИ и регистрации γ -квантов сверхвысокой энергии как от точечных, так и от диффузионных источников. Несмотря на то, что в данный момент статус этого эксперимента не определен, мы продолжили развивать методы обработки сигнала и определения первичных параметров частицы в надежде на возобновление проекта «Памир-XXI».

В этой статье акцент делается только на регистрации γ -квантов сверхвысокой энергии и методике их выделения на фоне адронных ливней.

1. ИДЕЯ МЕТОДА

Для регистрации черенковского света будут использованы детекторы двух видов :

1. Прямоугольная сеть из 11×11 широкоугольных быстрых детекторов площадью $\sim 1 \text{ м}^2$ и апертурой

~ 1 ср, расположенных с шагом 25 м, позволяющая определить направление оси ливня с точностью лучше 0.1° , её положение с точностью ~ 1 м и первичную энергию с точностью не хуже 10% (для гамма-квантов), а также позволяет анализировать форму импульса ЧС. Способы обработки формы импульса и пути получения вышеуказанных данных приведены в работе [2].

Для изучения работоспособности этих конфигураций и предполагаемой методики обработки данных телескопов были смоделированы искусственные события, которые генерировались с помощью CORSIKA6.990/QGSJET01 [3] для набора фиксированных энергий от 30 ТэВ до 100 ТэВ для протонов и гамма-квантов.

Неопределённости оценки координат и направления оси сетью быстрых оптических детекторов вычислялись как путём обработки «сырого» ПВР ЧС в фотонах, так и после добавления к нему фона ночного неба ($10^8 \text{ см}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ с}^{-1}$) и преобразования суммы в фотоэлектроны. В последнем случае предполагалось что фон флуктуирует по Пуассону, как и число выбиаемых фотоэлектронов. Неопределённости координат и направлений оси удовлетворяют заданным требованиям (~ 1 м и $< 0.1^\circ$).

Для диапазона энергий 30–100 ТэВ влияние фона заметно, но неопределённости всё-таки лежат в заданных пределах, что позволяет надеется на регистрацию γ -квантов в этом диапазоне (табл. I).

Первичная энергия E_0 оценивается по интегралу CL300 от ПР ЧС в круге радиуса 300 м с центром на оси. Параметры ПР получаются в результате одновременного приближения моделями ПР ЧС и ВФ ЧС данных по пространственно-временному распреде-

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

†E-mail: glk@dec1.sinp.msu.ru

Таблица I: Неопределённости положения оси, м, и направления первичной частицы, °

Событие/сигнал	полож.оси, среднее	полож.оси, ср.кв.откл	перв.напр., среднее	перв.напр., ср.кв.откл.
60 ТэВ р, Чс, фотоны	1.6	0.93	0.044	0.033
60 ТэВ р, ЧС+ФНН	2.6	1.9	0.076	0.064
60 ТэВ р, ЧС+ФНН>200, фэл	2.4	1.6	0.059	0.048
30 ТэВ γ, Чс, фотоны	1.0	0.59	0.030	0.020
30 ТэВ γ, ЧС+ФНН	1.8	1.3	0.058	0.052
30 ТэВ γ, ЧС+ФНН>200, фэл	1.5	1.1	0.051	0.046

лению ЧС в каждом ливне. При оценке энергии, когда фоновые и черенковские фотоны сложатся вместе, и их сумма преобразуется в фотоэлектроны, неопределенность увеличивается. Введение нижнего порога (например, 200 фотоэлектронов) по суммарному сигналу для каждого быстрого детектора несколько уменьшает неопределённости (табл. II). И при этом на число сработавшихся детекторов тоже вводится порог: если меньше 60 детекторов срабатывают, тогда событие отбрасывается.

2. Для классификации типов частиц мы предлагаем использовать оптические телескопы с зеркалами площадью ~ 4 м², полем зрения диаметром около 30° и диаметром пикселя ~ 0.8°, удалённые на ~ 100 м друг от друга.

Идея метода состоит в нахождении параметров формы пятна черенковского света (ЧС), максимально разделяющих события от разных первичных частиц. Для этого в гамма-астрономических экспериментах используют параметры Хилласа [4,5,6]. В нашем случае в качестве критериев, характеризующих события, используются отношения интегралов по прямоугольным областям, расположенным вдоль длинной оси пятна. Интегралы по прямоугольникам, перпендикулярным длинной оси, представляют продольный профиль черенковского образа, отражающий продольное развитие широкого атмосферного ливня (ШАЛ). В качестве критериев берутся 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 [7]. На рис. 1 показана геометрия обработки изображения.

2. ИСКЛЮЧЕНИЕ ПРОСКОЧИВШИХ ЛИВНЕЙ

При рассмотрении ШАЛ от γ-квантов и протонов попадают ливни, максимумы каскадных кривых которых находятся близко к уровню наблюдения, и полное число черенковских фотонов в них на уровне наблюдения заметно меньше, чем в остальных. Это мешает правильной оценке энергии первичных частиц и их идентификации. Нам удалось найти механизм исключения проскочивших ливней из рассмотрения. Для этого мы используем крутизну функции поперечного рас-

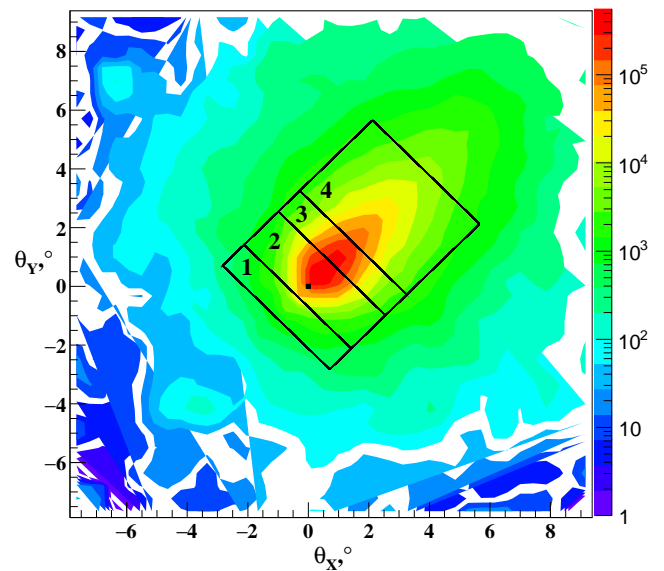


Рис. 1: Изображение ливня и прямоугольные области интегрирования, перпендикулярные длинной оси пятна. Черный квадрат в центре поле зрения указывает на направление прихода ливня. Пятно от ЧС разделено на прямоугольники 1, 2, 3, 4. Ширина большого прямоугольника составляет 5°. Внешняя сторона прямоугольника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

пределения ЧС, т.е. отношение значения функции на разных расстояниях от оси ливня.

Была использована ФПР следующего вида:

$$F_{L,D}(R) = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_1 R + \alpha_2 R^2 + \alpha_3 R^3}. \tag{1}$$

Для получения наилучшего результата мы рассмотрели несколько вариантов критерия проскочившего ливня: ФПР(5 м)/ФПР(100 м), ФПР(10 м)/ФПР(100 м), ФПР(10 м)/ФПР(150 м), ФПР(30 м)/ФПР(150 м). Наиболее оптимальным вариантом оказалось отношение значений функции на расстояниях 5 м и 100 м (рис. 3). Другие варианты идентифицируют больше стандартных ливней как проскочившие, в тоже время большая часть проскочивших

Таблица II: Относительные флуктуации CL300 для $E_0 = 30-100$ ТэВ

	ЧС, фотоны	ЧС+ФНН, фэл	ЧС+ФНН>200, фэл
60 ТэВ p	18	20	18
100 ТэВ p	13	20	18
30 ТэВ γ	5	10	6
50 ТэВ γ	2	9	7

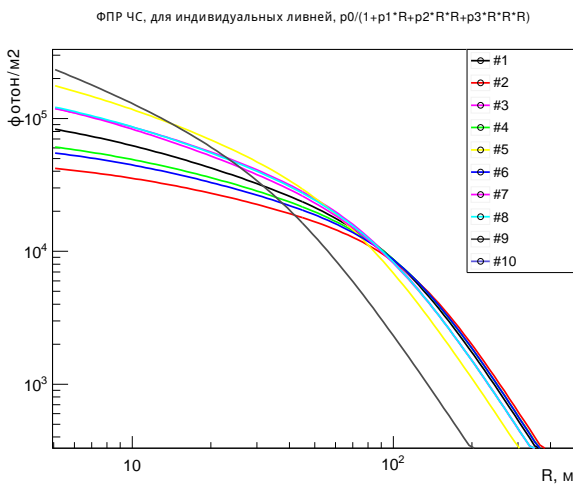


Рис. 2: ФПР для 10 ливней, один из которых проскочивший (#9, изображено черным цветом). Как из картинке видно, ФПР проскочившего ливня быстро падает, следовательно, общее количество ЧС у этого ливня (общее количество ЧС определяется по интегралу от ФПР) намного меньше, чем у остальных

определяются как обычные ливни.

Это отношение мы берем в качестве основного критерия выделения проскочивших ливней. Если значение крутизны ФПР ЧС ливня больше $k = 25$, то ливень считается проскочившим и далее не рассматривается. Иногда обычные ливни тоже идентифицируются как проскочившие, количество таких ливней составляет порядка 1%, для чистоты эксперимента допустимо пойти на такие потери событий.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫДЕЛЕНИЯ γ -СОБЫТИЙ

Оптимальные критерии выделения γ -событий на фоне протонных были найдены для пар 30 ТэВ $\gamma/60$ ТэВ p и 50 ТэВ $\gamma/100$ ТэВ p и для двух расстояний $R = 50$ м, 100 м. Оптимальное значение r_{ij} зависит от пары и R . Значение критерия отрегулировано таким образом, чтобы оставить только один протон, в области гамма. Такой подход к обработке изображений ЧС способен подавлять по меньшей мере 99% ядерного фона при регистрации гамма-лучей 30–100 ТэВ. Наилучшие

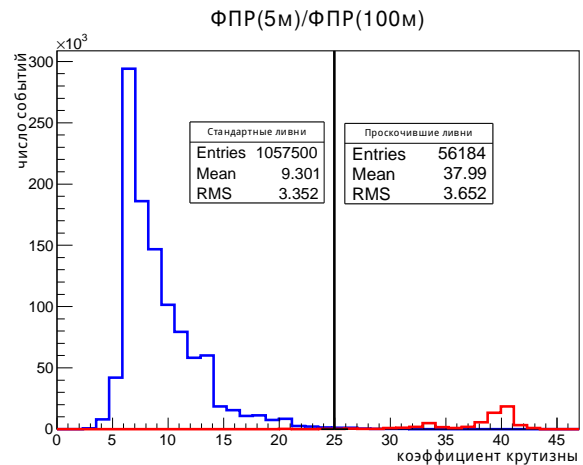


Рис. 3: Распределение коэффициентов крутизны ФПР обычных (синим цветом) и проскочивших (красным цветом) ливней. Черная линия показывает границу между ними. Но всё таки порядка 1 % проскочивших γ -ливней останутся среди стандартных ливней. Для протонов этот показатель равен 10%

результаты показаны в табл. III и IV. На рис. 4,а,б,в,г представлены распределения оптимальных критериев для пар $\gamma 30$ ТэВ – p 60 ТэВ и $\gamma 50$ ТэВ – p 100 ТэВ на расстояниях 50 и 100 м от оси ливня.

Третья графа в таблице показывает оптимальные ширины маленьких прямоугольников. Подчеркнутые цифры показывают ширину прямоугольника, интеграл по которому стоит в числителе критерия, жирные цифры — ширину прямоугольника области интегрирования знаменателя. Из таблицы можно увидеть, что на расстоянии 50 м критерии совпадают.

4. СРАВНЕНИЕ С ПРОЕКТОМ «ТАЙГА»

Для демонстрации преимуществ предложенной методики естественно сопоставить её возможности с аналогичными. В нашем случае трудность состоит в том, что аналог только один, к тому же не очень близкий: проект «ТАЙГА», реализуемый в Тункинской долине [8,9,10,11,12]. Нет особого смысла сравнивать наш проект с чисто γ -астрономическими установками [13,14,15].

Таблица III: Вероятности ошибки классификации для пары γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ (800 событий)

Расстояние от оси ливня	$P\{p \rightarrow \gamma\}/P\{\gamma \rightarrow p\}$	Ширины прямоугольников 1-4, градусы
50 м	0.001269/0.4924	<u>0.62</u> 0.33 0.50 0.54
100 м	0.001275/0.7678	0.70 <u>0.52</u> 0.65 0.59

Таблица IV: Вероятности ошибки классификации для пары γ 50 ТэВ – p 100 ТэВ (800 событий)

Расстояние от оси ливня	$P\{p \rightarrow \gamma\}/P\{\gamma \rightarrow p\}$	Ширины прямоугольников 1-4, градусы
50 м	0.001316/0.3646	<u>0.62</u> 0.33 0.50 0.54
100 м	0.001316/0.5833	0.38 <u>0.35</u> 0.33 0.53

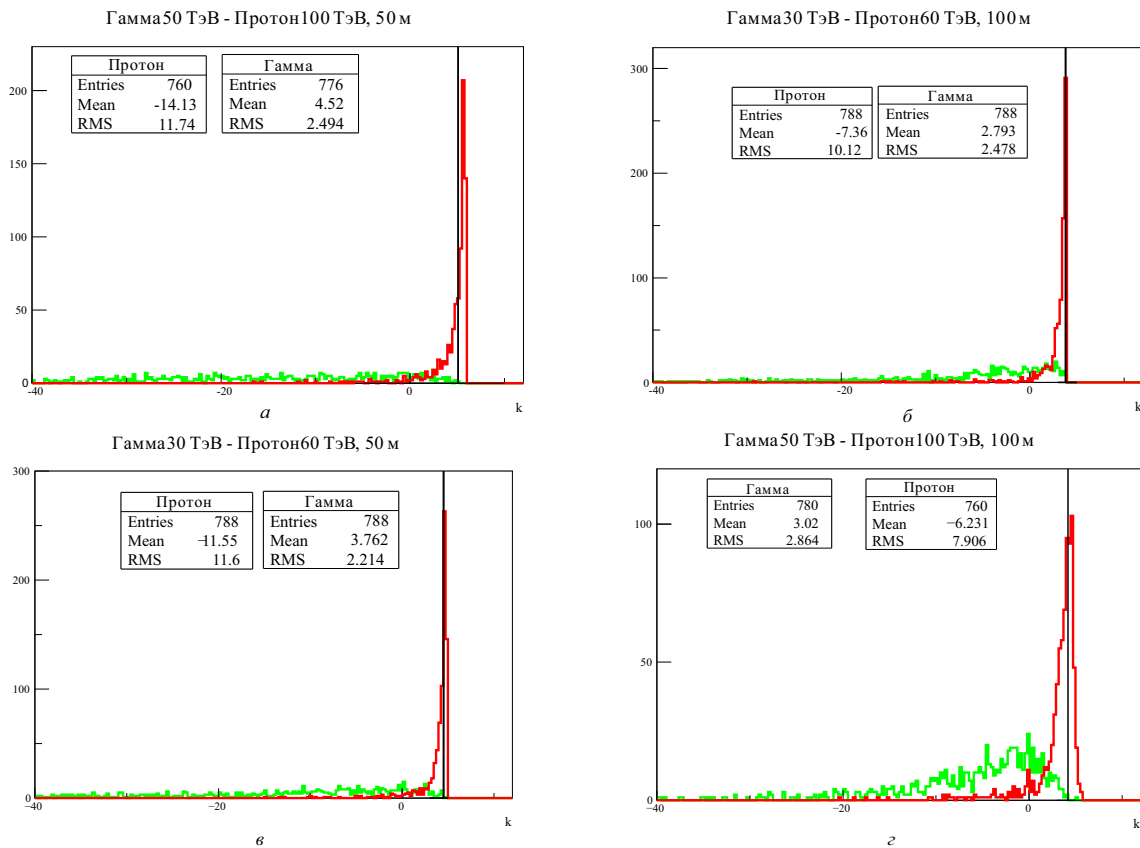


Рис. 4: Распределения оптимальных критериев для пар γ 30 ТэВ – p 60 ТэВ и γ 50 ТэВ – p 100 ТэВ на расстояниях 50 и 100 м от оси ливня. Вертикальная черная линия указывает на границу между гамма-квантами и протонами, и проведена таким образом, чтобы в области гамма-квантов оставался только один протон

Отличий у проекта «ТАЙГА» довольно много: уровень наблюдения (675 м над уровнем моря), конфигурация оптических детекторов (быстрые раздвинуты на 75–150 м и имеют меньшую площадь, телескопы раздвинуты минимум на 300 м и больше по площади, но с меньшим полем зрения), техника обработки образов близка к классической. Главное сходство — наличие оптических детекторов двух типов, что позволяет осу-

ществлять гибридную регистрацию и комплексную обработку событий ШАЛ от γ -квантов в диапазоне энергий десятки-сотни ТэВ наряду основной работой — изучением первичных ядер с энергиями 1 ПэВ–1 ЭэВ. Авторы «ТАЙГА» прямо называют свой проект [8] «первым проектом, объединяющим возможности черенковских временных детекторов и угловых черенковских телескопов», при этом традиционно не ссылаются на

наши пионерские работы [16,17,1].

«ТАЙГА» предполагает покрыть быстрыми детекторами площадь $\sim 1 \text{ км}^2$ и тут же разместить несколько телескопов. Такая стратегия соответствует господствующей парадигме «больше событий при минимальном бюджете», что, как правило, означает получение минимальной информации о каждом отдельном событии. Это, как следствие, даёт большие ошибки при определении параметров первичной частицы. Декларируемые ошибки восстановления первичной энергии «порядка типичных значений для черенковских экспериментов, приближаясь к 10% при высоких энергиях» [10], ошибка положения оси ливня $\sim 10\text{--}15 \text{ м}$. Ошибка направления оси указывается в виде зависимости «углового разрешения от числа включившихся быстрых детекторов» и лежит между 0.5° при четырёх сработавших детекторах и 0.07° при 25. Способ получения этой зависимости не описан. Поскольку сведений о числе включившихся детекторов в зависимости от первичной энергии, зенитном угле и типе первичной нет, а сетка детекторов достаточно редкая, естественно предположить, что критического для черенковской γ -астрономии разрешения $\sim 0.1^\circ$ достичь не удастся. Это ставит под сомнение возможность достижения высокого фактора режекции адронного фона, необходимого для выделения событий от γ -квантов. Эта важнейшая характеристика установки представлена в [8,11,12] фактором качества отбора Q , характеризующим значимость критерия отбора. Отбор строится на ширине черенковского пятна в поле зрения телескопа (*azwidth* или *core-azwidth*), результаты отбора существенно различаются в [8] (2.2) и [11] (от 5 до 20) причём происхождение значения 2.2 в [8] понятно, а в [11] значения просто декларированы: не ясно, как получаются доли остающихся после отбора γ -квантов и протонов. Соответствующие факторы режекции фона доходят по оценке [11] до 100.

В «Памир-XXI» сетка быстрых детекторов гораздо плотнее (шаг 25 м), что позволяет оценивать энергии и направления первичных частиц и положения осей ливней лучше. Начиная с 60 ТэВ, энергии всех протонных ливней с осями в пределах сетки оцениваются с точностью не хуже 20%, если отбросить проскочившие ливни точность увеличивается до 18%. Для γ -ливней с энергиями выше 30 ТэВ аналогичные оценки 10% и 6%. Положение оси восстанавливается с точностью до $\sim 1 \text{ м}$. Направление оси для энергий вы-

ше 30 ТэВ всюду в пределах сетки восстанавливается в точности не хуже 0.1° . Наконец, факторы режекции фона, рассчитанные через Q так же, как в [8,11], составляют для наших критериев:

- для пары γ 30 ТэВ – р 60 ТэВ на расстояниях 50 м и 100 м, соответственно, 203 и 42,
- для пары γ 50 ТэВ – р 100 ТэВ на расстояниях 50 м и 100 м, соответственно, 307 и 132.

При этом для точечных источников мы можем уверенно обрезать ядерный фон конусом с полураствором 0.1° вокруг направления на источник.

Сравнение цены двух проектов наверняка будет не в пользу «Памир-XXI», но здесь уместно вспомнить о суммарных затратах всех проектов, работавших и работающих в рамках минимальной парадигмы над решением задач о первичном спектре и массовом составе космических лучей сверхвысоких энергий, и о качестве полученных результатов, особенно по массовому составу. Кстати говоря, черенковские γ -телескопы [13,14,15] получают много новых физических результатов постольку, поскольку при их проектировании главным является адекватность конструкции решаемым задачам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Найден оптимальный критерий исключения проскочивших ШАЛ с энергиями 30-100 ТэВ, правильное определение типа и энергии которых планируемой установкой невозможно. Это позволило сделать более точной оценку первичной энергии и уменьшить ошибки выделения γ -квантов.
2. С помощью разработанной методики обработки черенковских угловых образов ШАЛ можно подавить протонный фон более чем на 99%, при этом сохраняется 60% гамма событий на расстоянии 50 м и 45% — на расстоянии 100 м от оси ливня для пар γ 50 ТэВ – р 100 ТэВ. А для пар γ 30 ТэВ – р 60 ТэВ сохраняется 50% и 25% гамма событий на расстояниях 50 и 100 м, соответственно.

[1] *Borisov A. S., Galkin V. I.* J. of Physics: Conference Series. 2013. **409**, N1. 012089.
 [2] *Галкин В. И., Борисов А. С., Бахромзод Р., Батраев В. В., Латипова С. З., Мукумов А. Р.* Вестн. Моск. унта. Серия 3. Физика. Астрономия. 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**, N2, P. 179).

[3] *Heck D., Pierog T.* CORSIKA User's Guide. (Karlsruher institut fur technologie, 2011).
 [4] *Hillas A.* Cerenkov light images of EAS produced by primary gamma. Proc. 19nd I.C.R.C. (La Jolla). 1985. **3**. P. 445.
 [5] *Weekes T. C.* Ap. J. 1989. **342**. P. 379.
 [6] *Aharonian F. A., Hofmann W., Konopelko A. K.* et. al. // *Astropart. Phys.* 1997. **6**. P. 343. DOI:10.1016/S0927-

- 6505(96)00069-2
- [7] *Galkin V.I., Borisov A.S., Bakhromzod R., Batraev V.V., Latipova S., Muqimov A.* EPJ Web of Conferences. 2017. 145. 15004.
- [8] *Kunnas M., Astapov I., Barbashina N.* et. al. Journal of Physics: Conference Series. 2015. **632**. 012040.
- [9] *Postnikov E., Astapov I., Bezyazeev P.* et. al. PoS. 2017. **301**. P. 756.
- [10] *Tluczykont M., Gress O., Korosteleva E.* et. al. PoS. 2017. **301**. P. 759.
- [11] *Postnikov E.B., Grinyuk A.A., Kuzmichev L.A., Sveshnikova L.G.* EPJ Web of Conferences. 2017. **145**. 19005.
- [12] *Postnikov E.B., Grinyuk A.A., Kuzmichev L.A., Sveshnikova L.G.* J. of Physics: Conf. Series. 2017. **798**. 012030.
- [13] *Krennrich F., Bond I.H., Boyle P.J.* et. al., New Astron. Rev. 2004. **48**. P. 345.
- [14] *Hinton J.A.* New Astron.Rev. 2004. **48**. P. 331.
- [15] MAGIC collaboration, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2005. **553**. P. 274.
- [16] *Galkin V.I., Dzhatdov T.A.* Moscow Univ. Bull. 2010. **65**, N 3. P. 195.
- [17] *Galkin V.I., Dzhatdov T.A.* Bull. Rus.Ac.Sci.Phys. 2011. **75**, N 3. P. 309.

Search for optimal criteria for the selection of extensive air showers initiated by γ -quanta

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

¹*Department of Space Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Umarov Physical-Technical Institute of Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe 734063, Tajikistan*

³*D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia E-mail: ^arizo@physics.msu.ru, ^bglk@dec1.sinp.msu.ru*

It has been proposed a technique for selecting EAS from ultrahigh energy γ -rays against the background of protons with imaging Cherenkov telescopes. This technique has been developed within the framework of «Pamir-XXI» project but it may be useful for other mountain projects as well as for EAS method in general. The specific variant of optical detector configuration for EAS Cherenkov light measurement and the methods of processing of the data and attainable uncertainties of the selection of γ -rays against the background of protons. The EAS from protons and γ -quanta of energy $E \geq 30$ TeV are considered.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

Keywords: extensive air showers, Cherenkov light, Monte-Carlo simulations, statistical pattern.

Received 29 March 2018.

Сведения об авторах

1. Бахромзод Ризои — аспирант; email: rizo@physics.msu.ru.
2. Галкин Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, профессор; email: glk@dec1.sinp.msu.ru.