

Разделение атмосферных ливней по массам первичных частиц на основании измеренных угловых распределений черенковского света на уровне гор

В. В. Батраев^{1,*}, В. И. Галкин^{1,2†}

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

²Московский 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 27.12.2017; Подписана в печать 28.04.2018)

Рассмотрена новая методика разделения событий широких атмосферных ливней по массам первичных частиц на основании непосредственно измеряемых характеристик пространственно-углового распределения черенковского света, позволяющая с небольшой вероятностью ошибки отнести ливни к одной из трех групп в рамках индивидуального (event-by-event) подхода в диапазоне первичных энергий 1–100 ПэВ. Описаны результаты использования методики для обработки данных оптической части планируемой установки «Памир-XXI». Приводятся количественные показатели оптимальных и универсального критерия разделения, продемонстрированы слабая зависимость его от фона ночного неба и модели ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях и превосходство над широко используемым параметром X_{max} . Приведенные характеристики методики следует рассматривать как верхние пределы, к которым следует стремиться при разработке реальных детекторов.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd УДК: 524.1.

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

ВВЕДЕНИЕ

Разделение событий широких атмосферных ливней (ШАЛ) по массе является весьма актуальной задачей, поскольку позволяет судить о массовом составе первичных космических лучей с энергиями выше 1 ПэВ.

Использование угловых черенковских телескопов для решения задачи о массовом составе не является общепринятым в методе широких атмосферных ливней, но широко используется в черенковской γ -астрономии [1–6].

Предлагаемый вариант метода обработки пространственно-углового распределения черенковского света (ЧС) для оценки массы первичной частицы был разработан в рамках проекта «Памир-XXI» [7,8] и заметно отличается от устоявшейся γ -астрономической методики.

Была поставлена задача найти критерий разделения групп ядер по массам, основанный на непосредственно измеряемых характеристиках пространственно-углового распределения ЧС ШАЛ, исследовать его чувствительность от первичной энергии E_0 в диапазоне 1–100 ПэВ, рассматриваемой пары масс, расстояния от оси до телескопа и модели ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях. Одновременно с разработкой критерия формулировались требования к оптическим детекторам, которые должны обеспечивать

не только регистрацию угловых черенковских образов ШАЛ, но также оценивать его направление и энергию на уровне наблюдения 4250 м над уровнем моря.

Данная работа является непосредственным продолжением работы [8].

1. ИДЕЯ МЕТОДА

Образ ливня в черенковском телескопе (черенковское пятно) представляет собой довольно сложное распределение света по двум углам (θ_x, θ_y), отражающее пространственно-угловую структуру черенковского излучения ШАЛ (рис. 1). В первом приближении оно аппроксимируется двумерным нормальным законом, параметры которого (размеры по большой и малой осям, ориентация и положение относительно направления на источник) служат признаками того или иного класса событий, используемыми в *критерии разделения*. Последний термин используется для обозначения как *процедуры классификации* (отнесения событий к какому-либо классу), так и *конкретного параметра*, значения которого формируются на основании измеренных признаков событий и существенно различаются у событий разных классов.

В рассматриваемой нами задаче разделения ШАЛ по массам первичных частиц пятна имеют значительные размеры в несколько градусов, поскольку ливни рассматриваемых энергий развиваются довольно близко к уровню наблюдения, который к тому же находится на высоте более 4 км над уровнем моря. Это позволяет осуществлять более тонкий анализ формы пятна, чем

*E-mail: vv.batraev@physics.msu.ru

†E-mail: glk@dec1.sinp.msu.ru

достаточно грубая аппроксимация нормальным распределением. Распределение света вдоль пятна хорошо коррелирует с продольным развитием ливня, поэтому решено было найти безразмерный параметр, характеризующий форму этого распределения и вычисляемый из непосредственно измеряемого черенковского образа. Это мы называем *непосредственной наблюдаемостью критерия*, которая гарантирует минимальные методические искажения экспериментальной информации. Еще одно запланированное требование к критерию — его *интегральность*: он должен опираться на значительную долю света, содержащуюся в пятне, что важно с точки зрения подавления флуктуаций как сигнала, так и шума.

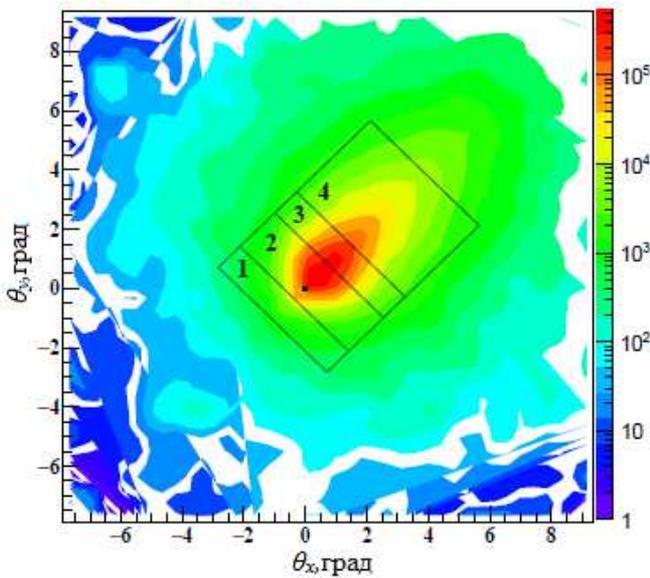


Рис. 1: Образ ливня и прямоугольные области интегрирования, выстроенные вдоль длинной оси пятна. Цвет характеризует амплитуду сигнала в пикселях. Черный квадрат в центре поля зрения отмечает направление прихода ливня. Пятно ЧС нарезано прямоугольниками 1,2,3,4 поперек его длинной оси. Полоса, образованная прямоугольниками, имеет ширину 5° . Внешняя сторона прямоугольника 1 отстоит от направления прихода на 1.5° . Образ интегрируется по областям, интегралы S_i образуют отношения r_{ij} . Ширины прямоугольников варьируются до получения r_{ij} , дающего наилучшее разделение образов от различных первичных частиц

Максимальная чувствительность критерия к первичной массе достигалась поиском максимума разделения черенковских образов от разных ядер по различным параметрам телескопа и процедуры обработки. Параметр телескопа в нашем случае один — размер пикселя регистрирующей камеры телескопа, параметров обработки несколько — это пределы интегрирования вдоль пятна (смотрите ниже). Важная для обработки угловых образов информация о направлении первичной частицы и ее энергии получается из обработки данных распределенной сети быстрых оптических детекторов: описанная в [7,8] методика в идеале гарантирует опре-

деление направления с точностью лучше $0,1^{circ}$ дуги и первичной энергии с точностью лучше 15% в диапазоне 1–100 ПэВ. Поиск направления длинной оси пятна осуществляется поворотом оси координат вокруг направления на источник до получения минимальной разности интегралов по пятну справа и слева от оси.

Процедура обработки угловых образов ЧС($F\psi, \theta$) заключается в вычислении интегралов

$$S_i = \int_{-2.5^\circ}^{2.5^\circ} d\psi \int_{\theta_{A_i}}^{\theta_{B_i}} d\theta F(\psi, \theta),$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ по прямоугольным областям поля зрения телескопа в окрестности черенковского пятна и использовании их отношений $r_{ij} = S_i/S_j$ в качестве признаков, характеризующих события. В качестве критерия бралось отношение r_{ij} , дающее наилучший результат разделения.

Использовался размер пикселя $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, поскольку именно это разрешение приводило к наилучшему разделению событий от различных ядер и выделению γ -событий в предварительном анализе [8]. На рис. 1 показана геометрия обработки образа.

Основная часть выборок искусственных событий моделировались с использованием модели QGSJET01 в версии CORSIKA6.990 [9]. Для того, чтобы проследить, как меняется качество разделения в зависимости от модели, было решено провести те же процедуры классификации, но уже для ливней, полученных по другой модели. Была выбрана модель QGSJET-II-04 в версии CORSIKA7.5600.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Были найдены оптимальные по $\theta_{A_i}, \theta_{B_i}, \theta_{A_j}, \theta_{B_j}$ критерии r_{opt} разделения для пар классов p-N и N-Fe с первичными энергиями 1, 10 и 100 ПэВ для различных R (расстояние от оси ливня до детектора), принадлежащие классу нормальных Байесовых классификаторов, минимизирующих вероятность ошибки решения [10]. Оптимальное отношение r_{opt} зависит от пары E_0 и R . В каждом случае граница между классовыми распределениями значений критерия r_{opt} выбиралась так, чтобы вероятности ошибок классификации (например, $P\{p > N\}$ и $P\{N > p\}$) были равны. Поэтому табл. 1 содержит только одно значение вероятности ошибки для каждого сочетания параметров.

Вероятности ошибок для чистого сигнала ЧС несколько меньше, чем для суммы ЧС+ФНН (фон ночного неба), преобразованной в фотоэлектроны. Анализ показал, что интервалы интегрирования $[\theta_{A_i}^{opt}, \theta_{B_i}^{opt}]$, $[\theta_{A_j}^{opt}, \theta_{B_j}^{opt}]$ вдоль длинной оси пятна, соответствующие оптимальным r_{ij} , в основном зависят от R , и можно определить универсальный (единый) критерий $r = r(R)$, не зависящий от пары классов и первичной энергии и демонстрирующий почти оптимальное поведение: его ошибки классификации лишь немного

Таблица I: Вероятности неправильной классификации для пар p-N и N-Fe, $E_0 = 1, 10$ и 100 ПэВ, проведенной с помощью оптимальных и единого критерия на выборках по модели QGSJET01. Объемы выборок для $E_0 = 1, 10$ ПэВ — 240 образцов, для $E_0 = 100$ ПэВ — 120 образцов

	1 ПэВ					10 ПэВ					100 ПэВ				
	21 м	50 м	100 м	150 м	200 м	21 м	50 м	100 м	150 м	200 м	21 м	50 м	100 м	150 м	200 м
	Без фона														
p_N	0.04	0.05	0.10	0.15	0.17	0.08	0.09	0.13	0.17	0.21	0.08	0.12	0.13	0.17	0.23
N_Fe	0.05	0.05	0.10	0.15	0.15	0.004	0.004	0.04	0.09	0.12	0.03	0.02	0.05	0.08	0.11
	С фоном														
p_N	0.03	0.05	0.11	0.15	0.17	0.08	0.09	0.13	0.17	0.20	0.08	0.11	0.13	0.17	0.23
N_Fe	0.05	0.05	0.10	0.15	0.16	0.008	0.01	0.04	0.09	0.13	0.03	0.02	0.05	0.08	0.11
	Без фона и с единым критерием														
p_N	0.04	0.06	0.10	0.16	0.18	0.08	0.09	0.13	0.18	0.21	0.09	0.15	0.16	0.18	0.28
N_Fe	0.05	0.05	0.11	0.15	0.16	0.004	0.004	0.05	0.10	0.12	0.08	0.04	0.08	0.11	0.15
	С фоном и единым критерием														
p_N	0.03	0.05	0.11	0.15	0.17	0.09	0.09	0.13	0.17	0.20	0.08	0.16	0.16	0.23	0.28
N_Fe	0.05	0.05	0.11	0.17	0.16	0.02	0.01	0.05	0.10	0.13	0.07	0.03	0.07	0.12	0.15

больше ошибок локальных оптимальных критериев. На рис. 2 приведены интервалы интегрирования для универсального признака $[\theta_{Ai}^{uni}, \theta_{Bi}^{uni}]$, $[\theta_{Aj}^{uni}, \theta_{Bj}^{uni}]$ в зависимости от R .

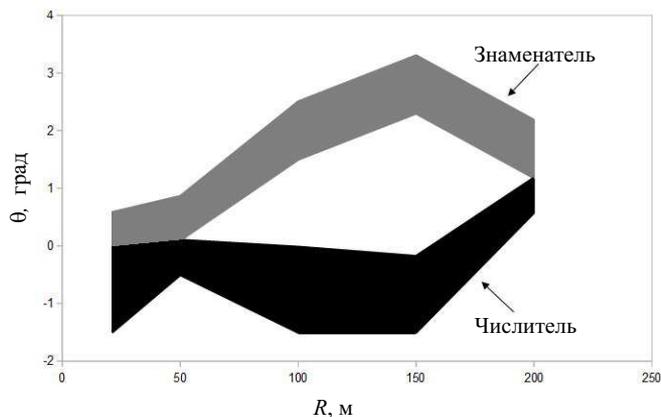


Рис. 2: Интервалы интегрирования вдоль продольной оси пятна для универсального критерия r , разделяющего пары p-N и N-Fe с энергиями 1, 10 и 100 ПэВ, в зависимости от R . Нижняя область: интервал $[\theta_{Ai}^{uni}, \theta_{Bi}^{uni}]$ для интеграла в числителе. Верхняя область: интервал $[\theta_{Aj}^{uni}, \theta_{Bj}^{uni}]$ для интеграла в знаменателе

Проверять универсальный критерий, полученный для модели адронных взаимодействий при высоких энергиях QGSJET01, было решено на модели QGSJET-II-04. На данный момент для энергий 1 и 10 ПэВ и получены результаты, приведенные в табл. 2, практически не уступающие по ошибкам классификации результатам, полученным на модели QGSJET01.

С точки зрения продольного развития ШАЛ основные отличия этих двух моделей заключаются в более

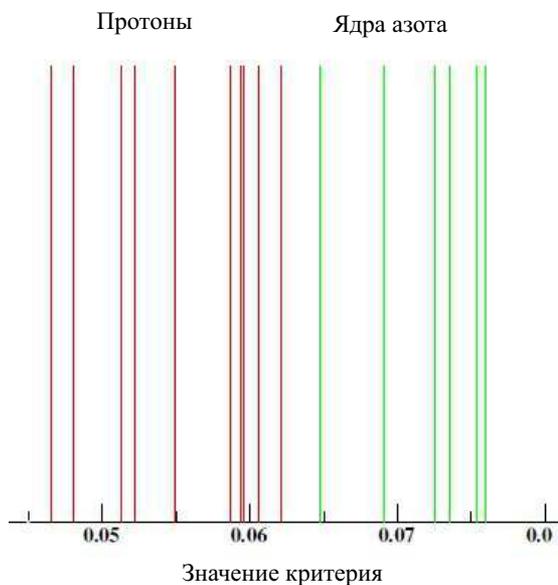


Рис. 3: Ливни с $X_{max} = 500$ г/см², созданные протонами и ядрами азота с энергией 1 ПэВ и разделенные универсальным критерием при $R = 50$ м

глубоком положении максимума X_{max} каскадной кривой всех заряженных частиц в QGSJET-II-04 примерно на 15 г/см² и максимума $X_{\mu_{max}}$ мюонов примерно на 60 г/см² [11]. Эти две модели имеют достаточно хороший разброс в параметрах ливня, даже по сравнению с другими моделями [12–14]. Это дает возможность говорить о получении критерия, достаточно независимого от какой-либо конкретной модели.

Также введенный критерий демонстрирует радикально лучшую чувствительность к первичной массе по

Таблица II: Вероятности неправильной классификации для пар p-N и N-Fe, $E_0 = 1, 10$ ПэВ, проведенной с помощью оптимальных критериев на выборках по модели QGSJET-II-04, а также с единым критерием, полученным на модели QGSJET01 и примененным к выборкам, полученным по модели QGSJET-II-04. Объемы всех выборок — 240 образцов

	1 ПэВ					10 ПэВ				
	21 м	50 м	100 м	150 м	200 м	21 м	50 м	100 м	150 м	200 м
	Без фона									
p_N	0.05	0.05	0.10	0.13	0.17	0.04	0.04	0.08	0.13	0.16
N_Fe	0.05	0.05	0.15	0.18	0.18	0.04	0.05	0.09	0.15	0.20
	С фоном									
p_N	0.05	0.05	0.11	0.13	0.17	0.05	0.04	0.08	0.13	0.17
N_Fe	0.05	0.05	0.15	0.17	0.19	0.04	0.05	0.10	0.16	0.21
	Без фона и с единым критерием из QGSJET01									
p_N	0.05	0.05	0.11	0.16	0.19	0.07	0.05	0.08	0.13	0.16
N_Fe	0.06	0.05	0.16	0.18	0.18	0.07	0.07	0.12	0.15	0.20
	С фоном и единым критерием из QGSJET01									
p_N	0.05	0.05	0.12	0.19	0.19	0.07	0.04	0.08	0.13	0.17
N_Fe	0.06	0.05	0.16	0.18	0.20	0.07	0.07	0.12	0.17	0.21

сравнению с X_{max} [15–19], что проиллюстрировано на рис. 3. Видно, что ливни, которые не удается различить при помощи X_{max} , полностью разделяются при помощи нашего критерия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Удалось получить единый критерий для разделения первичных ядер по массам с достаточно малыми ошибками классификации (для различных расстояний до оси ливня). Построен график зави-

симости интервалов интегрирования для единого критерия от расстояния, в диапазоне от 21 до 200 м.

2. Установлено, что влияние фона ночного неба не сильно сказывается на качестве разделения первичных ядер по массам.
3. Установлено, что единый критерий, полученный на модели QGSJET01, работает и на модели QGSJET IIю

[1] *Weekes T. C.* Ap. J. 1989. **342**. P. 379.
 [2] *Aharonian F. A., Hofmann W., Konopelko A. K.* et. al. *Astropart. Phys.* 1997. **6**. P. 343.
 [3] *Aleksic J., Ansoldi S., Antonelli L. A.* et. al. *Astropart. Phys.* 2016. **72**. P. 61.
 [4] *Acciari V. A., Beilicke M., Blaylock G.* et. al. *Ap. J.* 2008. **679**, No.2. P. 1427.
 [5] *Aharonian F.* et. al. NIM 2003. **B201**. P. 217.
 [6] *ARGO-YBJ Collaboration, LHAASO Collaboration* Phys. ReV. 2015. **D92**. 092005.
 [7] *Borisov A. S., Galkin V. I.* *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. **409**, N 1. 012089.
 [8] *Галкин В. И., Борисов А. С., Бахромзод Р., Батраев В. В., Латипова С. З., Мукумов А. Р.* Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. ???
 [9] *Heck D., Pierog T.* CORSIKA User's Guide, (Karlsruher institut fur technologie, 2011).
 [10] *Фукунага К.* Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: «Наука», 1979.
 [11] *Ostapchenko S., Bleicher M.* Constraining pion interactions at very high energies by cosmic ray data. arXiv:1601.06567v2 [hep-ph] 26 Feb 2016.
 [12] *Ostapchenko S.* EPJ Web of Conferences. 2013. **52**. 02001.
 [13] *d'Enterria D., Engel R., Pierog T., Ostapchenko S.* et. al. Constraints from the first LHC data on hadronic event generators for ultra-high energy cosmic-ray physics. arXiv:1101.5596v3 [astro-ph.HE]. 4 May 2011.
 [14] *Allen J., Castellina A., Engel R., Kasahara K., Knurenko S., Pierog T., Sabourov A., Stokes B. T., Ulrich R., Auger P., Telescope Array* et. al. EPJ Web of Conferences 2013. **53**. 01007.
 [15] *Linsley J.* Proc. 15th ICCR. 1977. **12**. P. 89.
 [16] *Linsley J.* Proc. 15th ICCR. 1979. **9**. P. 274.
 [17] *Linsley J., Watson A. A.* Phys. Rev. Lett. 1981. **46**. P. 459.
 [18] *Walker R., Watson A. A.* J. Phys. G : Nucl. Phys. 1981. **7**. P. 1297.
 [19] *Unger M.* EPJ Web of Conferences. 2013. **53**. 04009.

The separation of air showers by the masses of the primary particles on the basis of the measured angular distributions of Cherenkov light at mountain level

V. V. Batraev^{1,a}, V. I. Galkin^{1,2,b}

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

²*D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^avv.batraev@physics.msu.ru, ^bgalk@dec1.sinp.msu.ru

A new method is considered for the separation of extensive air shower events according to the masses of primary particles on the basis of the directly measurable spatial-angular characteristics of Cherenkov light which is capable of distributing the showers between the three groups with small error probability in the framework of event-by-event approach in 1–100 PeV energy range. The results are described of the application of the method to the processing of the data of the optical part of the would-be detector setup of «Pamir-XXI» project. Quantitative indicators are given for the optimal and universal separation criteria, weak dependence of the latter on the night sky background and nuclear interaction model at super high energies and its superiority over the widely used X_{max} parameter are demonstrated. The revealed characteristics of the method should be considered as the upper limits to approach to while constructing real detectors.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

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

Received 28 December 2017.

Сведения об авторах

1. Галкин Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: v_i_galkin@mail.ru.
2. Батраев Владимир Вадимович — студент; e-mail: batraev6@mail.ru.