

Оценка первичных параметров широкого атмосферного ливня по данным детекторов частиц высокогорных установок

А. Р. Мукумов^{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 01.05.2018; Подписана в печать 08.06.2018)

Разработана методика оценки параметров первичной частицы широкого атмосферного ливня (ШАЛ) с помощью детекторов частиц высокогорных установок. Результаты были получены в рамках проекта «Памир XXI». Предложена конфигурация сети детекторов заряженных частиц, способная оценивать энергию и направление первичной частицы в диапазоне энергий 1–10 ПэВ наилучшим образом. Описана новая методика разделения событий ШАЛ по массам первичных частиц на основании углового распределения мюонов в диапазоне 100 ПэВ–1 ЭэВ. Для этого предполагается использовать мюонный трекер площадью 400 м². Полученные оценки точностей должны рассматриваться как верхние пределы реальных экспериментальных точностей.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd

УДК: 524.1

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, детектор заряженных частиц, мюонный трекер, статистическое моделирование.

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. Предлагалось использовать сети детекторов заряженных частиц, ионизационный калориметр и оптические детекторы для регистрации различных компонент широкого атмосферного ливня (ШАЛ): электронно-фотонной, мюонной, адронной и черенковского света (ЧС).

Для решения поставленных перед проектом задач требуется набор детекторов заряженных частиц, способный определять характеристики первичной частицы в диапазоне $E_0 \geq 1$ ПэВ [2]. На высотах гор ливни регистрируются на более ранних стадиях развития, что означает большие плотности заряженных частиц и большие энергии адронов в стволах ливней, чем на уровне моря. С учетом данной особенности нами предлагаются конфигурации сети детекторов заряженных частиц и способы обработки их данных, которые позволяют оценивать энергию и направление первичной частицы лучше, чем традиционные методы на меньших высотах наблюдения.

Для решения проблемы оценки массы/типа первичной частицы был разработан метод, который на основе параметров формы черенковского пятна в поле

зрения телескопа способен разделить поток первичных ядер на три группы по массе в интервале энергий 1–100 ПэВ [2,3,4]. При более высоких энергиях (> 100 ПэВ) проблему оценки первичной массы логично решать с помощью детекторов частиц, позволяющих вести наблюдения почти круглосуточно. Для разделения потока первичных ядер с энергией 0.1–1 ЭэВ предлагается метод, способный разделить поток первичных ядер на три группы по массе по форме углового распределения мюонов ШАЛ.

1. ГЕНЕРАЦИЯ ДАННЫХ

Полное прямое статистическое моделирование проводилось с помощью CORSIKA6.990/QGSJET-0I и CORSIKA7.5600/QGSJET-II-04 [5] для уровня наблюдения 4250 м над уровнем моря и первичных энергий 1, 10, 100 ПэВ до порога 1 МэВ по электронам и гамма-квантам и до 200 МэВ по мюонам и адронам, в качестве первичных частиц брались протоны и ядра N и Fe.

В дальнейшем для удобства обработки в интервале энергий 1–10 ПэВ для каждого события данные сохранялись в виде карты поперечного распределения заряженных частиц, представляющей собой массив 300×300 элементов и содержащей числа частиц/энерговывделений в квадратных ячейках 1 м×1 м, и аналогичной карты времён прихода фронта частиц/энерговывделений той же размерности с усреднением по ячейкам. Таким образом, каждый ливень на уровне наблюдения регистрировался ковром 300 м×300 м с центром на оси ливня, заполненным

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

†E-mail: glk@decl.sinp.msu.ru

квадратными детекторами.

Для первичных энергий 100 ПэВ и 1 ЭэВ были разыграны по 300 ШАЛ от протонов и ядер N и Fe с энергетическим порогом 1 ГэВ для всех вторичных частиц.

2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Обработка пространственно-временных данных по частицам требует выбора моделей поперечного распределения (ПР) и временного фронта (ВФ) и их флуктуаций. Временной фронт τ задаётся моментом достижения интегралом от временного распределения (импульса) $f(t)$ уровня 50% от полного значения:

$$\tau : \int_0^\tau f(t) dt = 0,5 \int_0^\infty f(t) dt$$

Для аппроксимации ПР частиц была использована модель, близкая к модели Нишимуры–Каматы–Грейзена [6,7]

$$F_{LD}(R) = \frac{a_0}{R^{a_1} \left(1 + \frac{R}{\alpha_2}\right)^{\alpha_3}},$$

для временного фронта

$$F_{TF}(R) = R(a_0 + a_1R + a_2R^2),$$

где R — расстояние от оси до детектора.

При обработке отдельных событий эти модели подгоняются к данным распределенной сети детекторов, что позволяет получать оценки энергии и направления прихода первичной частицы и положение оси ШАЛ на уровне наблюдения. Более подробно см. [2].

3. СЕТЬ ДЕТЕКТОРОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Была рассмотрена сеть детекторов заряженных частиц размером 11×11 детекторов площадью 1 м×1 м (рис. 1). Расстояние между детекторами было 15 м (выбрано на основании оптимизации [3]), сетка покрывала площадь 150 м×150 м. Центр сетки сдвигается относительно оси ливня по обеим координатам с шагом 1 м внутри квадрата (140 м×140 м), причём ось ливня всегда остаётся в пределах сетки. С учётом всех возможных сдвигов сетки одно событие рассматривается в 19600 конфигурациях «сетка–ливень».

Рассматривались два варианта обработки пространственно-временного распределения частиц:

а. по данным были определены число заряженных частиц и моменты прихода фронта частиц в каждый из детекторов; по этим измеренным данным оценивались координаты и направление оси, а также ПР частиц, которое затем интегрировалось для получения оценки E_0 ,

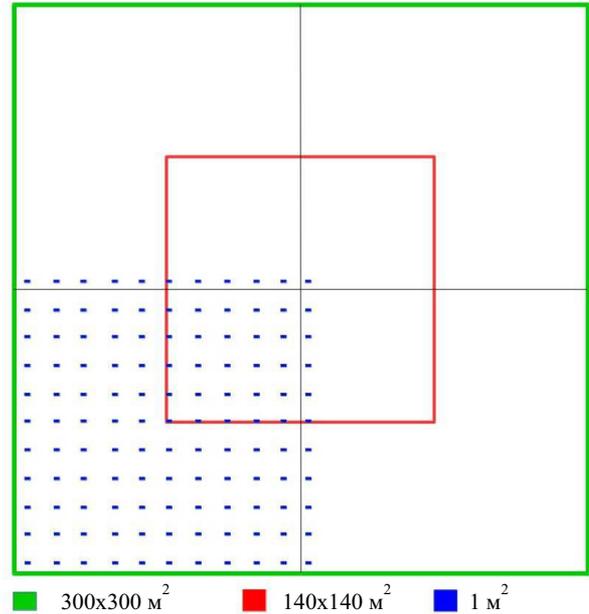


Рис. 1: Схема расположения детекторов заряженных частиц

б. все упавшие на детекторы частицы с помощью GEANT4 [8] были прослежены через их объёмы (2 мм Al + 2 см полистирола); в этом случае измеренными данными были энерговыделения и моменты прихода фронта энерговыделений в каждый из детекторов.

Использовались ливни от протонов 1 и 10 ПэВ. Объёмы выборок составляют 60 событий для каждого метода. E_0 оценивается по интегралу от ПР частиц/ионизации в круге радиуса 100 м с центром на оси. Однако выяснилось, что в случае нестандартных (проскочивших) ливней такой подход увеличивает ошибки определения энергии. В то же время интегрирование в пределах кольца с внутренним радиусом 40 м и внешним радиусом 100 м заметно уменьшает эти ошибки (рис. 2). Это объясняется тем, что у проскочивших ливней в круге радиуса 40 м число частиц/энерговыделение заметно больше, чем у нормальных ливней. Исходя из этого E_0 оценивалась по интегралу от ПР в кольце 40 м/100 м, неопределённости показаны в табл. 1.

4. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ МАССОВОГО СОСТАВА ПКИ ПО ДАННЫМ ДЕТЕКТОРОВ ЧАСТИЦ

Оценка массы первичной частицы ливня на основании данных детекторов частиц установки ШАЛ обычно производится путём анализа абсолютных характеристик каскада на уровне наблюдения: полного числа электронов N_e , полного числа заряженных частиц N_{ch} и полного или частичного (выше некоторого энер-

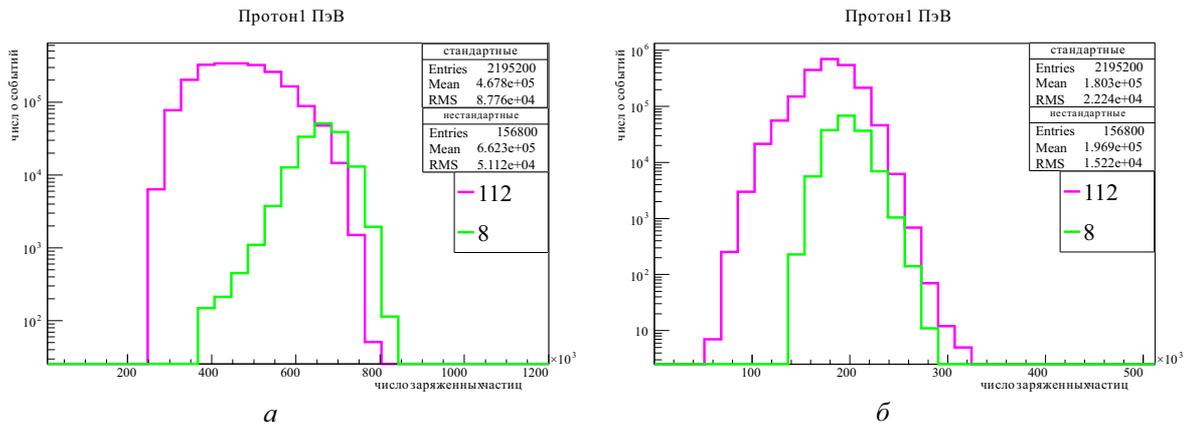


Рис. 2: Оценка E_0 по интегралу от ПР 112 нормальных ливней и 8 проскочивших ливней: а — интегрирование в круге радиуса 100 м, б — интегрирование в кольце с радиусами 40 м/100 м

Таблица I: Неопределённости оценки направления δ_{dir} и положения δ_{loc} оси и первичной энергии $\delta E_0, \%$ сетью из 11×11 детекторов частиц для ШАЛ от протона 1 и 10 ПэВ. Энергия оценивалась на основании интеграла от ПР частиц/энерговывделений по кольцу 40 м/100 м. Систематические погрешности для оценки направления δ_{dir} , положения оси δ_{loc} и первичной энергии δE_0 — 13%

E_0 , ПэВ	По варианту а			По варианту б		
	δ_{dir}°	δ_{loc} , М	$\delta E_0, \%$	δ_{dir}°	δ_{loc} , М	$\delta E_0, \%$
1	0.39	1.3	12	0.46	1.2	10
10	0.15	0.6	12	0.18	0.3	12

гетического порога и/или в некотором диапазоне расстояний от оси) числа мюонов N_μ . Анализ использует известный факт: при заданном N_e или N_{ch} число мюонов в среднем оказывается больше в ШАЛ от более тяжёлых первичных, чем от более лёгких.

Для получения оценки массового числа A необходимы расчётные зависимости $N_e(E_0, A)$ и $N_\mu(E_0, A)$. Обычно они получаются усреднением результатов статистического моделирования и используются также для оценки первичной энергии E_0 [9]. Существует несколько вариантов анализа: обработка корреляционных плотов $N_\mu - N_e$ ($N_\mu - N_{ch}$) [10], рассмотрение распределений отношения N_μ / N_e (N_μ / N_{ch}) [11], рассматриваются также более сложные комбинации абсолютных чисел частиц как для оценки E_0 , так и для оценки A [12]. Применяются и различные варианты анфолдинга [13] и Байесовых критериев [14] для двумерных гистограмм $N_\mu - N_e$ ($N_\mu - N_{ch}$).

Экспериментально N_e и N_μ можно оценить по интегралам от ПР электронов и мюонов при наличии достаточно развитой сети детекторов заряженных частиц. Однако, этому мешают каскадные флуктуации и флуктуации случайных процессов в детекторах, создающие измерительные ошибки.

Любая процедура оценки N_e и N_μ включает в себя измерение плотности электронов/мюонов на всей площади ШАЛ. Ошибки локальных детекторов ограниченной площади приводят к неопределёностям оце-

нок N_μ , N_e и их отношения. Эти неопределённости входят в оценки E_0 и A , получаемые на основе N_e и N_μ , и ограничивают разрешение по массе.

В результате чаще всего анализ массового состава ПКИ по абсолютным характеристикам ШАЛ заканчивается разделением спектра всех первичных частиц на спектр легких и спектр тяжёлых ядер [15]. Дальше других в плане анализа первичного массового состава продвинулась коллаборация KASCADE, переросшая в начале XXI века в KASCADE-Grande. Поскольку установка KASCADE имела плотную сетку детекторов электронов/мюонов и изначально создавалась для анализа массового состава ПКИ, коллаборация KASCADE предпринимала попытки расщепить спектр сначала на три [16], а потом и на пять [17,18,19] парциальных спектров. Ошибки разделения масс в первом и особенно в последнем случае недвусмысленно показывали, что деление спектра первичных масс более чем на две группы превышает возможности используемого подхода к проблеме, включающего детекторный комплекс и способ обработки. Ситуация осложняется ещё и тем обстоятельством, что используемые для обработки расчётные соотношения $N_{e(0, text A)}$ и $N_\mu(E_0, A)$ сильно зависят от выбранной модели ядерного взаимодействия. Это приводит в итоге к недопустимым неопределёностям выводов относительно массового состава ПКИ даже на уровне среднего массового числа.

Анализ данных более масштабной, но менее плотной установки KASCADE-Grande, включавшей в себя установку KASCADE, ведётся уже на уровне разделения первичных ядер на две группы [20,21], что вполне адекватно возможностям детекторов и способам обработки. Вместе с тем, проблема неопределённости, идущей от модели взаимодействия, не ушла. Создаётся впечатление, что исследователи массового состава ПККИ методом ШАЛ воспринимают её как обстоятельство непреодолимой силы, больше всего рассчитывая на скорое уточнение модели ядерного взаимодействия. По нашему мнению, критерий, работающий только для конкретной модели взаимодействия, не является полноценным и не позволяет делать достоверные выводы о физике ускорения и распространения космических лучей по их свойствам вблизи Земли.

Как ни странно, мы не нашли в доступной литературе ни одной постановки задачи поиска критерия разделения первичных масс, не чувствующего модель взаимодействия. Поскольку у нас уже есть опыт построения такого критерия по угловому распределению черенковского света (ЧС) ШАЛ [1,2,3,4], мы поставили задачу найти новый критерий на основе данных по угловому распределению мюонов с $E_\mu \geq 1$ ГэВ. Первая попытка [22] была не слишком удачной, но продемонстрировала некоторые возможности подхода, которые мы использовали в настоящей работе.

Для построения мюонного критерия мы используем три соображения, приведшие к успеху при поиске черенковского критерия:

- необходимо использовать компоненту ШАЛ, генерируемую каскадом на разных стадиях его развития, несущую информацию об этом развитии и способную донести её до уровня наблюдения;
- детектор должен смотреть на ШАЛ с некоторого удаления, чтобы сигнал выглядел как скан продольного развития каскада, то есть распределение сигнала по углу зрения в системе детектора (телескопа, трекера);
- критерий должен использовать параметры формы углового распределения, но не его абсолютные характеристики, сильно зависящие от модели взаимодействия.

Угловые распределения ЧС и мюонов ШАЛ удовлетворяют этим требованиям, но число черенковских фотонов на много порядков больше числа энергичных мюонов, что позволяет использовать предлагаемый подход к обработке мюонов при первичных энергиях $\gtrsim 100$ ПэВ.

5. ВОЗМОЖНОСТИ МЮОННОГО ТРЕКЕРА

Мы попытались найти новую меру первичной массы A на данных гипотетического локального детектора, работающего в составе комплексной установки. Мера

выбиралась из параметров формы углового распределения мюонов. В качестве детектора использовался мюонный трекер площадью $S = 400 \text{ м}^2$ с угловым разрешением $0.1\text{--}0.2$ градуса дуги. Трекер располагается на расстоянии $\geq 100 \text{ м}$ от оси ливня. Столь значительная его площадь нужна для обеспечения приемлемых флуктуаций при измерении углового распределения мюонов в указанном диапазоне расстояний для первичных энергий $100 \text{ ПэВ--}1 \text{ ЭэВ}$. Это очень дорогой детектор, но подобные машины уже строились и использовались для измерений, например, мюонный трекер и центральный детектор KASCADE [23]. К тому же детектор такой площади и детальности может с некоторой помощью со стороны сетки детекторов заряженных частиц оценивать энергию и направление прихода ливня.

Распределение мюонов, проинтегрированное по азимуту φ (рис. 3), представляет собой скан мюонной каскадной кривой, которая обязана различаться для ШАЛ от разных первичных ядер.

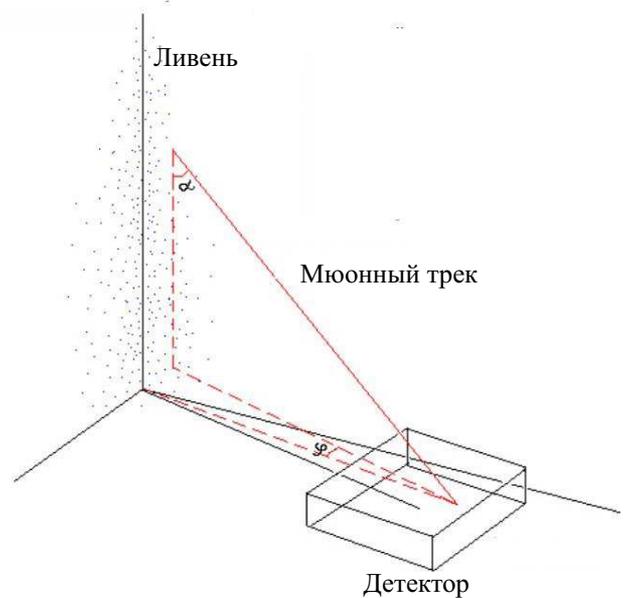


Рис. 3: Геометрия регистрации ШАЛ с помощью мюонного трекера

Процедура обработки углового распределения мюонов заключается в вычислении интегралов

$$S_i = \int_{-0.2}^{0.2} d\varphi \int_{\alpha_{i_{min}}}^{\alpha_{i_{max}}} F(\alpha, \varphi) d\alpha$$

$i = 1, 2, 3, 4$ по бинам гистограммы и использовании их отношений $k_{ij} = S_i/S_j$ в качестве признаков, характеризующих события. Ширина бинов варьируется до получения k_{ij} , дающего наилучшее разделение различных первичных частиц.

Были найдены оптимальные критерии разделения для пар $p\text{--}N$ и $N\text{--}Fe$ с первичными энергиями 100 ПэВ и 1 ЭэВ для различных R (расстояний от оси ливня

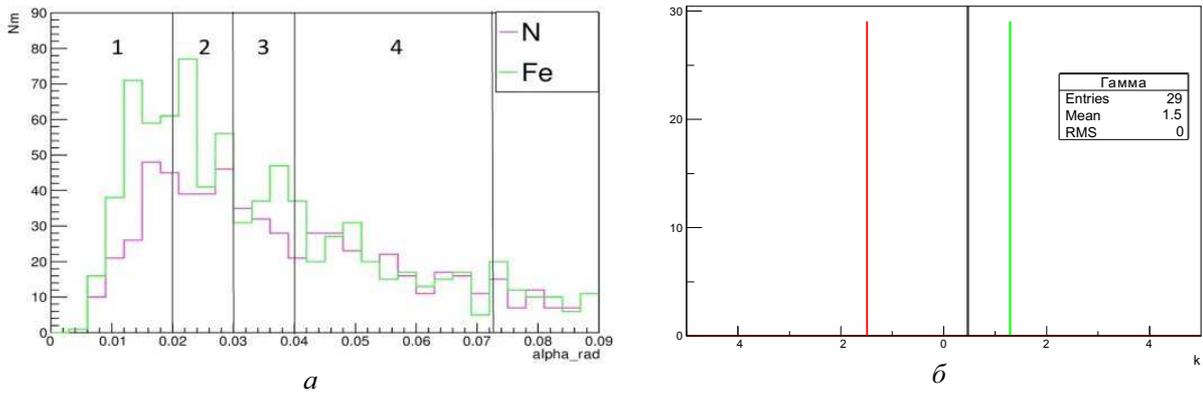


Рис. 4: Процедура обработки углового распределения мюонов: *a* — угловое распределение индивидуальных ливней N и Fe на расстоянии 100 м от оси ливня с энергией 100 ПэВ. Ширина бинов 0.020; 0.010; 0.010; 0.033 в радианах; *б* — значения критерия k_{24} , характеризующие данные события. Выбрано отношение второго бина к четвертому

Таблица II: Вероятности неправильной классификации для пар p -N и N-Fe, $E_0 = 100$ ПэВ-1 ЭэВ. Объёмы всех выборок по 200 событий (QGSJET01). Ошибки вероятностей всюду ± 0.02

E_0	100 ПэВ			1 ЭэВ					
R , м	100	120	150	100	150	200	250	300	400
p -N	0.34	0.33	0.31	0.35	0.35	0.32	0.35	0.33	0.35
N-Fe	0.34	0.31	0.31	0.32	0.30	0.33	0.31	0.32	0.32

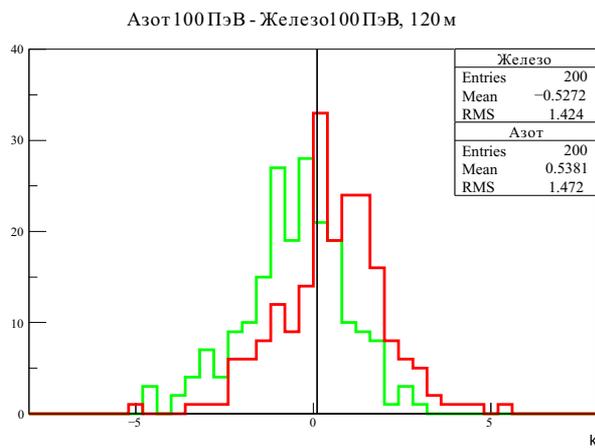


Рис. 5: Распределения оптимальных критериев для пар N-Fe на расстоянии 120 м от оси ливня. Ширина бинов 0.020; 0.015; 0.013; 0.025 в радианах. В качестве критерия выбрано отношение интеграла по второму бину к интегралу по четвертому бину. Вертикальная черная линия указывает на границу между азотом и железом, вероятность ошибок классификации 31%

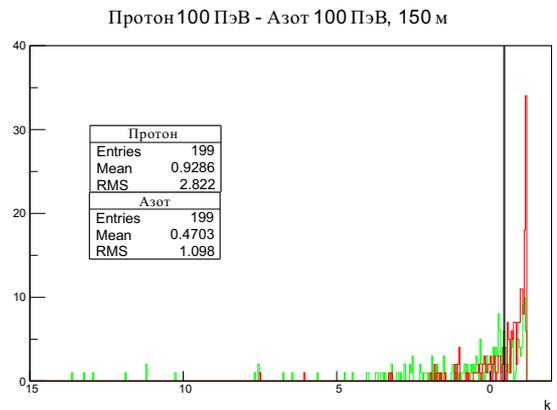


Рис. 6: Распределения оптимальных критериев для пар p -N на расстоянии 150 м от оси ливня. Ширина бинов 0.015; 0.017; 0.012 ; 0.014 в радианах. В качестве критерия выбрано отношение интеграла по второму бину к интегралу по четвертому бину. Вертикальная черная линия указывает на границу между протоном и азотом, вероятность ошибок классификации 31%

до трека), принадлежащие классу Байесовых классификаторов, минимизирующих вероятность ошибки решения [24]. Оптимальное отношение k_{opt} зависит от пары, E_0 и R . В каждом случае граница между классовыми распределениями значений критерия k_{opt} вы-

биралась так, чтобы вероятности ошибок классификации (например, $P\{p \rightarrow N\}$ и $P\{N \rightarrow p\}$) были равны (рис. 5, 6). Поэтому табл. 2 содержит только одно значение вероятности ошибки для каждого сочетания параметров.

Таблица III: Вероятности неправильной классификации для пар p-N и N-Fe, E₀ = 100 ПэВ. Объёмы всех выборок по 200 событий. Ошибки вероятностей всюду ±0.02

Оптимальные критерии QGSJET01 и QGSJET-II				Универсальные критерии. Ширина бинов 0.015; 0.020; 0.010; 0.027 в радианах, k ₂₄					
				QGSJET01			QGSJET-II		
R, м	100	120	150	100	120	150	100	120	150
p-N	0.39	0.40	0.35	0.40	0.35	0.34	0.39	0.37	0.32
N-Fe	0.37	0.37	0.38	0.34	0.30	0.34	0.34	0.36	0.37

Найденные оптимальные критерии разделения для пар p-N и N-Fe для модели адронных взаимодействий при высоких энергиях QGSJET01 были проверены на модели QGSJET-II-04. Результаты показывают незначительное ухудшение ошибок классификации для пар p-N и N-Fe для модели QGSJET-II-04. Также был найден универсальный критерий (при таком критерии ширина бинов для всех расстояний выбирается одинаково) для пар p-N и N-Fe с первичными энергиями 100 ПэВ для обеих моделей. Результаты приведены в табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предлагаемый вариант сети детекторов заряженных частиц способен оценивать для ливней

1 и 10 ПэВ положение оси с точностью ~ 1 м, направление прихода с точностью ~ 0.5° и первичную энергию с точностью лучше 12%. Систематическая ошибка оценки, полученная при обработке выборок разных моделей взаимодействия, не превышает 13%.

2. С помощью мюонного трекера, способного определить направление мюона с точностью не хуже 0.2°, можно разделить первичные ядра на три группы по массе в интервале энергий 0.1–1 ЭэВ. Критерий разделения почти не зависит от модели взаимодействия.

[1] *Borisov A. S., Galkin V. I.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. **409**, N 1. 012089.

[2] *Галкин В.И., Борисов А.С., Бахромзод Р., Батраев В.В., Латипова С.З., Мукумов А.Р.* Вестн. Московского ун-та. Физика. Астрономия. 2018. № 2. С. 57.

[3] *Galkin V. I., Borisov A. S., Bakhromzod R., Batraev V. V., Latipova S., Muqumov A.* EPJ Web of Conferences. 2017. **145**. 15004.

[4] *Topchiev N. P., Borisov A. S., Batraev V. V., Bakhromzod R., Galkin V. I., Muqumov A. R.* PoS. 2017. **301**. P. 475.

[5] *Heck D., Pierog T.* CORSIKA User's Guide. (KARLSRUHER INSTITUT FUR TECHNOLOGIE, 2011)

[6] *Greisen K.* Prog. Cosmic Ray Phys. 1956. **3**. P. 1.

[7] *Kamata K., Nishimura J.* Prog. Theor. Phys. Suppl. 1958. **6**. P. 93.

[8] <http://cern.ch/geant4>

[9] *Arteaga-Velázquez J. C.* et al. *J.Phys.: Conf.Ser.* 2015. **651**. 012001.

[10] *Apel W.* et al. (KASCADE-Grande Coll.). *Astropart. Phys.* 2012. **36**, P. 183.

[11] *Cantoni E.* et al. (KASCADE Coll.). Proc. of the 32nd ICRC. Beijing, China. 2012. **11**. P. 259.

[12] *Apel W. D.* et al. (KASCADE-Grande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 2011. **107**. 171104.

[13] *Fuhrmann D.* PhD thesis, University of Wuppertal, 2012.

[14] *D'Agostini G.* NIM A. 1995. **362**. P. 487.

[15] *Aglietta M.* et al. (EAS-TOP Collaboration). 2004. *Astropart. Phys.* **20**. P. 641.

[16] *Antoni T.* et al. *Astropart. Phys.* 2002. **16**. P. 245.

[17] *Kampert K.-H.* et al. *Nuclear Physics B. (Proc. Suppl.)* 2004. **136**. P. 273.

[18] *Antoni T.* et al. *Astropart. Phys.* 2005. **24**. P. 1.

[19] *Ulrich H.* et al. *Czechoslovak Journal of Physics.* 2006. **56**. Suppl. A. A261.

[20] *Arteaga-Velázquez J. C.* et al. *Journal of Physics: Conference Series.* 2015. **651**. 012001.

[21] *Haungs A.* et al. EPJ Web of Conferences. 2017. **145**. 13001.

[22] *Galkin V. I., Anokhina A. M., Bakhromzod R., Mukumov A.* arXiv:1507.03150v1 [astro-ph.HE].

[23] *Antoni T.* et al. NIM A. 2003. **513**. P. 490.

[24] *Фукунага К.* Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: «Наука», 1979.

Estimation of extensive air shower primary particle parameters using the data of particle detectors of high mountain setups

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

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

E-mail: ^amuqumov@physics.msu.ru, ^bglk@dec1.sinp.msu.ru

A method for estimation of extensive air shower (EAS) primary particle parameters with the help of particle detectors of high mountain setups was developed. The results were obtained in the framework of «Pamir-XXI» project. A configuration of charged particle detector network was proposed capable of evaluating the primary particle energy and direction in the energy range 1–10 PeV in the best way. A new method of EAS event separation by primary particle mass on the basis of muon angular distribution is described. A muon tracker of area 400 m² is to be used for this purpose. The obtained accuracy estimates should be considered as the upper limits of real experimental accuracy.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd

Keywords: extensive air showers, particle detectors, muon tracker, statistical pattern recognition.

Received 01 May 2018.

Сведения об авторах

1. Мукумов Аъзам Рустамович — аспирант; e-mail: muqumov@physics.msu.ru.

2. Галкин Владимир Игоревич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: glk@dec1.sinp.msu.ru
