

Критерий оценки массы первичных частиц наклонных ливней эксперимента СФЕРА-2

В. И. Галкин,^{*} Е. А. Кобякова,[†] В. С. Латыпова[‡]
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
 физический факультет, кафедра физики космоса
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
 (Статья поступила 04.03.2020; подписана в печать 29.05.2020)

Рассмотрена новая методика разделения наклонных событий широких атмосферных ливней по массам первичных частиц на основе непосредственно измеряемых характеристик пространственного распределения черенковского света, позволяющая с небольшой вероятностью ошибки отнести ливни к одной из трех групп в рамках индивидуального подхода в диапазоне первичных энергий $\sim 10^{16}$ эВ. Методика развивается для обработки наклонных ливней, зарегистрированных детектором СФЕРА-2. Приводятся количественные показатели универсального критерия разделения, продемонстрирована его слабая зависимость от фона ночного неба. Приведенные показатели качества критерия следует рассматривать как ориентиры для дальнейшей работы, поскольку они получены для черенковского света на уровне снежной поверхности, то есть не учитывают процесса регистрации отраженного света телескопом СФЕРА-2. Методика может быть интересна действующим и планируемым наземным установкам, предназначенным для регистрации ШАЛ по их черенковскому свету.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

УДК: 524.1

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

ВВЕДЕНИЕ

Энергетический спектр первичных космических лучей (ПКЛ) охватывает более 12 порядков по энергии [1], и если частицы с энергиями до 10^{15} эВ могут регистрироваться прямыми методами [2, 3], то малая интенсивность частиц с более высокими энергиями позволяет судить об их энергетическом спектре и химическом составе только по характеристикам широких атмосферных ливней (ШАЛ).

Компоненты ШАЛ могут быть разделены на две большие группы: каскадные частицы (адроны, мюоны, электроны и гамма-кванты) и излучения, сопровождающие развитие каскада (черенковский и флуоресцентный свет, радиоизлучение, микроволновое излучение и акустические эффекты).

Несмотря на большое количество экспериментов, проведенных в последние десятилетия, существует значительная неопределенность в определении химического состава ПКЛ сверхвысоких энергий. Оценка массы первичной частицы ливня на основании данных детекторов частиц 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 энергетического порога и/или в некотором диапазоне расстояний от оси) числа мюонов N_μ . Неопределенности оценок N_{ch} , N_e , N_μ и их соотношений, входящих в оценку массового числа частицы, за

счет каскадных флуктуаций и ошибок локальных детекторов ограничивают точность данного метода [4]. Для получения оценки массового числа A необходимы расчётные зависимости $N_e(E_0, A)$ и $N_\mu(E_0, A)$. Обычно они получаются путем усреднения результатов статистического моделирования и используются также для оценки первичной энергии E_0 .

Существует несколько вариантов анализа: обработка корреляционных плотностей $N_\mu - N_e$ ($N_\mu - N_{ch}$) [5], рассмотрение распределений отношения $N_\mu - N_e$ ($N_\mu - N_{ch}$) [6], рассматриваются также более сложные комбинации абсолютных чисел частиц как для оценки E_0 , так и для оценки A [7]. Применяются и различные варианты анфолдинга [8] и Байесовых критериев [9] для двумерных гистограмм $N_\mu - N_e$ ($N_\mu - N_{ch}$). Экспериментально N_e и N_μ можно оценить по интегралам от пространственного распределения электронов и мюонов при наличии достаточно развитой сетки 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 неопределённости оценок N_{ch} , N_e , N_μ и их отношений. Эти неопределённости входят в оценки E_0 и A , получаемые на основе N_e и N_μ , и ограничивают разрешение по массе. Кроме того, показатель числа мюонов сильно зависит от выбора модели ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях, а электронная компонента — от энергии первичной частицы.

Коллаборация KASCADE, переросшая в KASCADE-Grande в начале XXI века, продвинулась в вопросе разделения ПКЛ по первичной массе дальше дру-

*E-mail: v_i_galkin@mail.ru

†E-mail: jaysmilt@yandex.ru

‡E-mail: 2000vi0501g@mail.ru

гих. Поскольку их установка имела плотную сетку детекторов электронов/мюонов и изначально создавалась для анализа массового состава ПКИ, KASCADE предпринимала попытки расщепить спектр сначала на три [10], а потом и на пять [11] парциальных спектров. Ошибки разделения масс в первом и особенно в последнем случае показали, что деление спектра первичных масс более чем на две группы, используя для обработки расчётные соотношения $N_e(E_0, A)$ и $N_\mu(E_0, A)$, превышает возможности используемого подхода к проблеме [12].

Традиционным критерием масс первичного ядра для детекторов излучений ШАЛ (черенковского и флуоресцентного света и радиоизлучения) является показатель глубины максимума каскада X_{max} . Глубина максимума развития каскада в черенковских измерениях обычно оценивается по некоторой непосредственно измеряемой характеристике ШАЛ (крутизне поперечного распределения света или ширине черенковского импульса на расстояниях $\gtrsim 300$ м от оси) на основании получаемой из расчетов связи между средней X_{max} и средним значением измеряемой характеристики [13], причем эта связь существенно зависит от выбранной модели сильных взаимодействий. Такая косвенная оценка первичной массы имеет ограниченную точность и позволяет в лучшем случае разделить первичные ядра на две группы.

Детектор СФЕРА-2 также использует для регистрации ШАЛ его оптическое излучение Вавилова-Черенкова, также называемое черенковским светом (ЧС), отраженное от заснеженной поверхности льда озера Байкал [14]. Этот детектор представлял собой самую совершенную из длинного ряда реализаций [15, 16, 17, 18] оригинальной идеи А.Е. Чудакова [19] о возможности наблюдения значительной части пятна ЧС оптическим детектором, поднятым над снежной поверхностью. В отличие от наземных установок, этот тип детектора позволяет достаточно хорошо видеть пространственную структуру пятна, что практически не возможно для наземных установок с широко расставленными оптическими детекторами. Использование быстрых фотосенсоров и наносекундной электроники позволяет надежно отделять сигнал ШАЛ от фоновых событий и оценивать первичные параметры ливня. Труднее всего дается оценка массы первичного ядра.

1. ЛОГИКА НОВОГО КРИТЕРИЯ

При обработке материала, полученного от установок СФЕРА-2, были учтены ограниченные возможности метода максимума глубины каскада, и было решено использовать относительный критерий формы функции пространственного распределения (ФПР) ЧС ШАЛ [20]. Параметр непосредственно не измеряется в эксперименте, он был оценен исходя из статистических зависимостей показателя наклона ФПР — от-

ношения интегралов полного числа черенковских фотонов в кольцах с различными радиусами. Это позволило разделить ПКИ по массовому составу на три группы ядер, однако использованный критерий эффективен лишь для ливней, ось наклона которых близка к вертикали (зенитный угол до $\sim 30^\circ$), а значительная часть зарегистрированных событий лежит вне данного диапазона зенитных углов, то есть критерий не является универсальным и не может быть использован при анализе ливней с большими зенитными углами.

Из расчетов известно, что распределение черенковского света вдоль пятна, создаваемого наклонным ливнем, хорошо коррелирует с продольным развитием ливня, поэтому решено было найти безразмерный параметр, характеризующий форму этого распределения и вычисляемый из непосредственно измеряемого черенковского образа. Это свойство можно назвать непосредственной наблюдаемостью критерия, которая гарантирует минимальные методические искажения экспериментальной информации. Еще одним требованием к критерию является его интегральность: он должен опираться на значительную долю света, содержащуюся в пятне, что важно с точки зрения подавления флуктуаций как сигнала, так и шума. Наконец, критерий должен слабо зависеть от модели сильного взаимодействия. Этим свойством обладают относительные критерии, основанные на параметрах формы распределения, но не его абсолютных характеристиках: им обладает параметр наклона, использованный при обработке вертикальных событий, полученных в эксперименте СФЕРА-2, или, например, угловой критерий, разработанный для проекта ПАМИР-XXI [21, 22].

В настоящей работе речь идет о критерии разделения ШАЛ по первичным массам на основании параметра формы ФПР ЧС на уровне заснеженной поверхности, то есть о первом этапе создания критерия, пригодного для реальной обработки событий эксперимента СФЕРА-2. Второй этап — учет отражения ЧС от снега и регистрация его детектором — имеет смысл только в том случае, если информация о массе первичной частицы может быть получена на уровне отражения.

2. ГЕНЕРАЦИЯ И ОБРАБОТКА ИСКУССТВЕННЫХ НАКЛОННЫХ СОБЫТИЙ ШАЛ

Хотя порог регистрации СФЕРА-2 заведомо выше 1 ПэВ, первые попытки построения нового критерия были сделаны именно для событий этой энергии по соображениям скорости моделирования. Были получены выборки по 60 событий с зенитными углами 45° и 60° для первичных протонов, ядер азота и железа по модели QGSJET01 [23, 24] с помощью CORSIKA7.5600 [25]. Для каждого события данные сохранялись в виде карты пространственно-временного распределения черенковского света, представляющей собой массив $1280 \times 1280 \times 102$ элементов, каждая ячейка которого содержала число черенковских фотонов, по-

павших в квадратную ячейку $2.5 \text{ м} \times 2.5 \text{ м}$ в интервале времени 5 нс. Можно считать, что на уровне наблюдения существует ковер $3200 \text{ м} \times 3200 \text{ м}$ с центром на оси ливня, заполненный быстрыми квадратными детекторами.

Все ливни имели одинаковый азимутальный угол 0° . Использовалась идеальная ситуация, когда положение оси и ориентация ливня считались известными. Критериальный параметр r представлял собой отношение интегралов по прямоугольным областям на уровне наблюдения, длинные стороны которых были перпендикулярны длинным осям черенковского пятна. Размеры и положение прямоугольников варьировались до получения наилучшего разделение пар классов событий (р-N, N-Fe). В качестве критерия использовался нормальный Байесов алгоритм.

Байесовский подход к классификации основан на теореме, утверждающей, что если плотности распределения каждого из классов известны, то искомым алгоритм можно выписать в явном аналитическом виде [26]. Более того, этот алгоритм оптимален, то есть обладает минимальной вероятностью ошибок классификации на данных классовых распределениях. В качестве критерия при парной классификации рассматривался параметр L , характеризующий вероятность первичной частице принадлежать тому или иному классу по массе, где \mathbf{x} — вектор признаков классифицируемой частицы (в нашем случае — один критериальный параметр или признак), а $w_{1,2}$ — классы, $p(x|w_{1,2})$ — плотность вероятности частице того или иного класса иметь значение критериального параметра в интервале от x до $x + dx$, а $P(w_{1,2})$ — априорные вероятности классов, считаемые в данном случае равными:

$$L = \frac{p(x|w_1)}{p(x|w_2)} \times \frac{P(w_1)}{P(w_2)} \quad (1)$$

Если $L > 1$, то x принадлежит классу w_1 , если $L < 1$, то x принадлежит w_2 .

При поиске оптимального критерия для каждой пары классов и зенитного угла предполагалось, что параметр r распределен по нормальному закону. Тогда для отнесения частицы к той или иной группе можно рассматривать параметр L , в котором μ_1 и σ_1 — математическое ожидание и дисперсия первого класса, μ_2 и σ_2 — математическое ожидание и дисперсия второго класса:

$$\ln L = -\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1} + \frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2} - \ln \sigma_1 + \ln \sigma_2 \quad (2)$$

Если $\ln L > 0$, то x принадлежит w_1 , если $\ln L < 0$, то x принадлежит w_2 . В рамках работы над созданием критерия разделения по первичной массе наклонных черенковских событий на основе нормального Байесова алгоритма был найден относительный параметр, характеризующий первичную массу частицы, позволяющий с высокой точностью разделить ПКЛ на три основные группы. В качестве легкой компоненты рассматривались протоны, средней — ядра азота (N), тяжелой —

ядра железа (Fe). Добавление к интегралам по прямоугольникам случайного фона ночного неба с последующим вычитанием среднего значения фона не помешали работе критерия: сказалось свойство его интегральности. Полученные вероятности ошибочной классификации оказались очень малы, поэтому следующим шагом стал переход к построению аналогичного критерия для энергий, входящих в диапазон чувствительности установки СФЕРА-2.

В дальнейшем в качестве материала для разработки критерия были использованы выборки по 60 искусственных событий от ШАЛ с зенитными углами наклона оси 45° и 60° , со случайным поворотом оси, от частиц, имеющих энергию 10 ПэВ, полученные также с использованием CORSIKA7.5600/QGSJET01. В этом случае постановка задачи была значительно ближе к реальности: считался известным только зенитный угол, который хорошо оценивается детектором СФЕРА-2 по временным задержкам фронта ЧС.

Для того, чтобы найти точку пересечения оси ливня с уровнем наблюдения, были использованы линейные комбинации первых моментов (среднего значения координаты по x и по y) и третьих моментов, коэффициент этой комбинации был найден в результате оптимизации. Среднеквадратичная ошибка положения оси для протонных ливней с зенитным углом 60° составляет ~ 4.0 метра, для других ядер и зенитного угла 45° она несколько меньше. Поле зрения детектора ограничено и не может перекрыть площадь $3 \text{ км} \times 3 \text{ км}$, поэтому для определения первичных параметров было необходимо установить нижний уровень (порог) потока ЧС ШАЛ — количества черенковских фотонов, приходящих на единичную площадку — таким образом, чтобы использовалась более близкая к оси часть ФПР ЧС. Этот порог не может быть слишком малым, чтобы для определения положения оси не использовались зашумленные крылья ФПР, но и не должен быть слишком большим, чтобы в определении азимута черенковского пятна использовалась большая его часть. На основе минимизации ошибки положения оси было выбрано обрезание на уровне $u = 0.36$ от максимального значения потока (содержимого максимальной ячейки). Для оценки азимутального угла ливня были использованы вторые моменты ФПР. Для повернутых событий была рассчитана среднеквадратичная ошибка оценки азимута при уже установленном пороге потока ЧС ШАЛ, она равна 1.8° .

В процессе дальнейшей обработки образ черенковского света методом Монте-Карло интегрировался по выделенным прямоугольным областям, а полученные интегралы S_i образовали отношения $r = S_1/S_2$. Расположение и размеры прямоугольников варьировались до получения r , дающего наилучшее разделение образов от различных первичных частиц.

Как и для случая 1 ПэВ, в процессе оптимизации критерия для разных пар и зенитных углов использовался нормальный Байесов алгоритм. В дальнейшем по реальным распределениям для найденного критерия

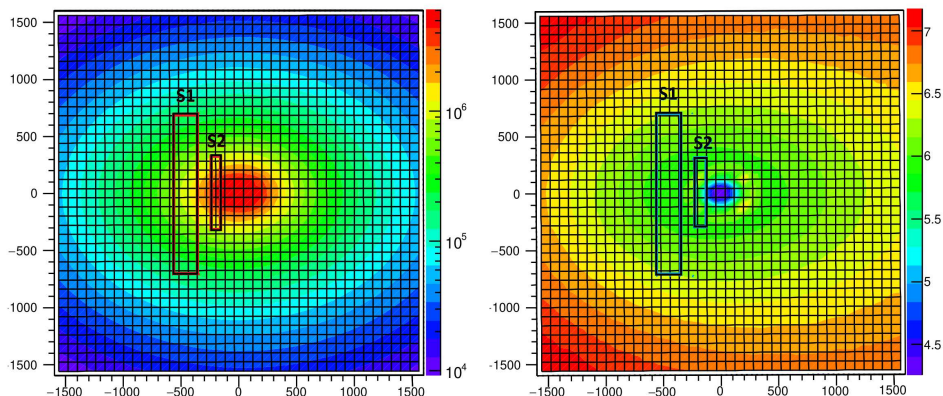


Рис. 1: Области интегрирования, отмеченные на поперечном распределении ЧС (слева) и на карте средних высот излучения ЧС (справа) ШАЛ от протонов при зенитном угле 45°. Цветная шкала левого рисунка градуирована в фотонах на квадрат 2.5 м×2.5 м, правого рисунка — в километрах высоты над уровнем моря

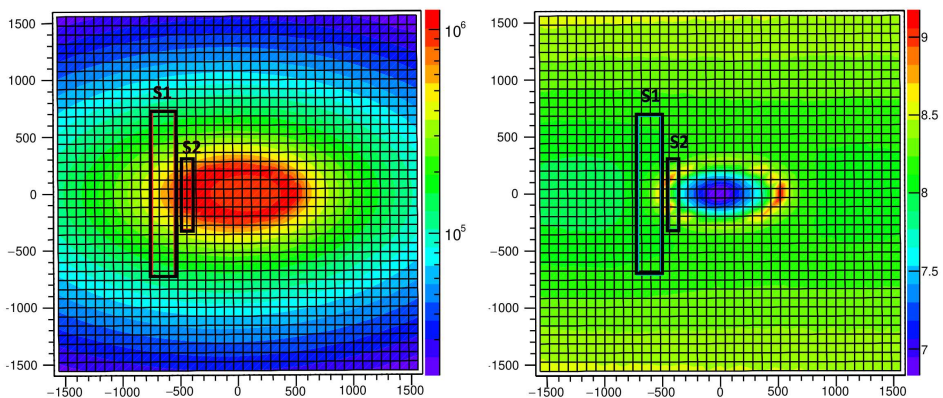


Рис. 2: Области интегрирования, отмеченные на поперечном распределении ЧС (слева) и на карте средних высот излучения ЧС (справа) ШАЛ от протонов при зенитном угле 60°. Цветная схема та же, что и на рис. 1

рия была проведена парная классификация ядер, демонстрирующая небольшие вероятности ошибок классификации для всех рассмотренных пар классов и зенитных углов.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе работы были найдены области интегрирования ФПР ЧС для получения параметра $r = S_1/S_2$, демонстрирующего оптимальное поведение. Для угла наклона оси ливня в 45° S_1 представляет собой интеграл потока черенковского света по прямоугольной области площадью 700000 м², S_2 — интеграл по области 75000 м². Для зенитного угла 60° S_1 интегрировался по области 525000 м², S_2 — по области 150000 м². Их расположение не случайно: была найдена взаимосвязь между ФПР ЧС ШАЛ и высотой излучения

ЧС, что хорошо видно из сравнения карт ФПР ЧС и карт высот излучения. Области интегрирования приведены на рис. 1 и 2, они отмечены на карте ФПР ЧС и на карте высот излучения ЧС, оси абсцисс и ординат градуированы в метрах. На рис. 3 изображены гистограммы распределения значений параметра r для трех типов частиц.

Наряду с оптимальными критериями для каждой пары p-N, N-Fe и двух зенитных углов, для каждого угла был найден компромиссный критерий, единый (универсальный) для обеих пар, дающий лишь немногим большие ошибки классификации по сравнению с оптимальными вариантами. Эти универсальные критерии придают парной классификации новый смысл: соответствующие параметры r можно воспринимать как непосредственно измеряемый аналог массы первичного ядра, становящийся нечетким из-за косвенного характера измерений.

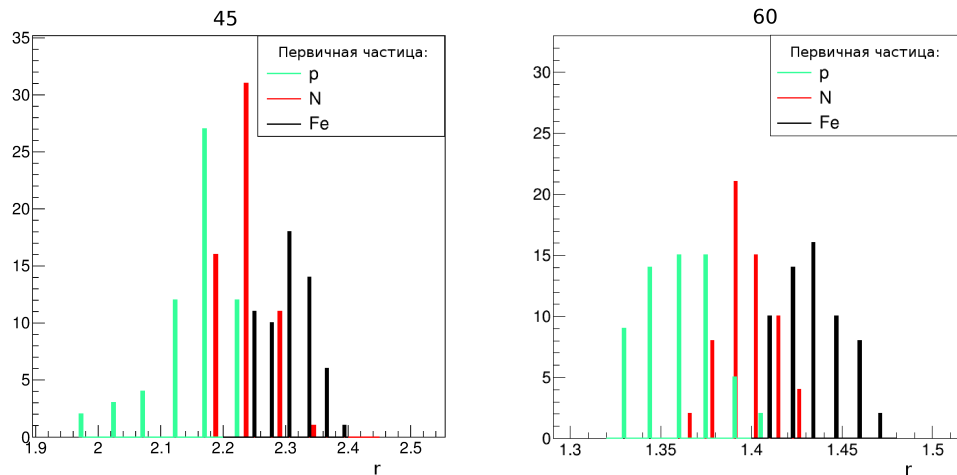


Рис. 3: Гистограммы распределения параметра r для протонов, ядер азота и железа при зенитных углах ШАЛ 45 и 60°

Таблица 1: Вероятности неправильной классификации, для каждого зенитного угла использован свой универсальный критерий.

Градусная мера	p-N	N-Fe
45	0.17	0.20
60	0.13	0.12

В табл. 1 приведены вероятности ошибочной классификации с помощью универсальных критериев, согласно которым события можно с хорошей точностью разделить по массе первичной частицы на 3 группы. Классификация проводилась с использованием Байесова подхода по реальным распределениям параметра r , уже не используя предположения о его нормальности. На интегрируемые области был распределен шум от фона ночного неба плотностью потока фотонов в $5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, практически не повлиявший на результат классификации. Результаты, представленные в таблице, представляют собой отношение количества неправильно распознанных частиц к общему объему рассматриваемой выборки для каждой из пар.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе были изучены выборки модельных событий от ШАЛ с углами наклона 45 и 60° с энергией первичной частицы 10 ПэВ с произвольным поворотом оси ливня от протонов, ядер азота (N) и железа (Fe). Была выявлена зависимость формы ФПР от массы первичной частицы и взаи-

мосвязь ФПР и высоты, на которой в среднем генерировался свет.

2. На основе нормального Байесова алгоритма был найден оптимальный относительный критерий $r_{ij} = S_i/S_j$ разделения событий ЧС ШАЛ по массе на 3 группы ядер. В качестве легкой компоненты рассматривались протоны, средней — ядра азота (N), тяжелой — ядра железа (Fe).
3. Был определен единый (для каждого наклона) критерий, дающий лишь немного большие ошибки классификации, чем оптимальный критерий для каждой из пар. Критериальные параметры r единых критериев можно рассматривать как нечеткие аналоги массы первичной частицы, то есть их можно использовать для оценки массы любых промежуточных ядер.
4. По реальным распределениям критерия проведена парная классификация ядер, демонстрирующая малые вероятности ошибки для двух пар классов.
5. Оценено влияние фона ночного неба на результаты классификации при значении плотности потока фотонов в $5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, для критерия, использующего отношение интегралов от ФПР ЧС по значительным площадям (порядка десятков тысяч м^2), этим влиянием можно пренебречь.
6. Полученный критерий предстоит перенести на образы событий в камере детектора СФЕРА-2 с учетом диффузного отражения от снега.

- [1] Гинзбург В. Л. // УФН. 1996. **166**, № 2. С. 169.
- [2] Derbina V. A. et al. (RUNJOB Coll.) // *Astrophys. J. Lett.* 2005. **628**, N 1. P. 41.
- [3] Asakimori K. et al. // *Astrophys. J.* 1998. **502**, N 1. P. 278
- [4] Arteaga-Velazquez J. C. et al. // *Journal of Physics: Conference Series.* 2015. **651**. 012001.
- [5] D'Agostini G. // *NIM A.* 1995. **362**. P. 487.
- [6] Antoni T. et al. // *Astropart. Phys.* 2002. **16**. P. 245.
- [7] Kampert K.-H. et al. // *Nuclear Physics B. (Proc. Suppl.)* 2004. **136**. P. 273.
- [8] Haungs A. et al. // *EPJ Web of Conferences.* 2017. **145**. 13001.
- [9] Будник А. П., Лунев В. П. / Свечение ночного неба. 2008. С. 61.
- [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] Antokhonov B. A., Besson D., Beregnev S. F. et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* 2011. **A 639**. P 42.
- [14] Чернов Д. В., Бонвеч Е. А., Джатдоев Т. А., Фингер Мир., Фингер Мих., Галкин В. И., Гарипов Г. К., Кожин В. А., Подгрудков Д. А., Скурихин А. В. // *PoS, (ICRC2017).* 2017. P. 1.
- [15] Castagnoli C., Navarra G., Morello C. // *Proc. 17th ICRC.* Paris. 1981. **8**. P. 103.
- [16] Antonov R. A., Ivanenko I. P., Rubtsov V. I. // *Proc. 14th ICRC.* Vunich. 1975. **9**. P. 3360.
- [17] Антонов Р. А., Иваненко И. П., Кузьмин В. А. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1986. **11**, № 50. С. 2217.
- [18] Антонов Р. А. и др. // *Краткие сообщ. по физике.* М.: ФИАН. 1989. С. 78.
- [19] Чудаков А. Е. Возможный метод регистрации ШАЛ по черенковскому излучению, отраженному от заснеженной поверхности Земли // *Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий: Материалы Всесоюз. симп. Якутск. 19-23 июня 1972 г. Якутск. фил. Сиб. отд. АН СССР.* 1974. С. 69.
- [20] Antonov R. A., Bonvech E. A., Chernov D. V., Dzhatdоеva T. A., Galkin V. I., Podgrudkov D. A., Roganova T. M. // *Astroparticle Physics* 2019. **108**. P. 24.
- [21] Бахромзод Р. Галкин В. И. // *Ученые записки физического ф-та* Московского ун-та. 2018. № 3. 1830203.
- [22] Мукумов А. Р., Галкин В. И. // *Ученые записки физического ф-та* Московского ун-та. 2018. № 3. 1830801.
- [23] Калмыков Н. Н., Остапченко С. С. // *ЯФ.* 1993. **3**. С. 105.
- [24] Калмыков Н. Н., Остапченко С. С., Павлов А. И. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 1994. **58**, № 12 С. 21.
- [25] CORSIKA // *Wissenschaftliche Berichte.* FZKA 6019. Forschungszentrum Karlsruhe/ Eds.: D. Heck et al. 1998.
- [26] Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 1979. С. 368.

A Criterion for the Mass Estimation of the Primary Particles of the Inclined Showers in SPHERE-2 Experiment

V. I. Galkin^a, E. A. Kobayakova^b, V. S. Latypova^c

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

E-mail: ^av_i_galkin@mail.ru, ^bjaysmilt@yandex.ru, ^c2000vi0501g@mail.ru

A new method for the separation of inclined extensive air showers (EAS) according to their primary particle masses is considered based on the directly measurable characteristics of the lateral distribution (LD) of Cherenkov light (CL) and enabling to attribute the showers to one of the three mass groups in the event-by-event approach in the primary energy range $\gtrsim 10^{16}$ eV. The method is destined for the processing of the inclined EAS events detected by SPHERE-2 experiment.

Quantitative characteristics of the universal selection criterion are specified, its weak dependence on the night sky background is stated. The criterion's quality measures are to be considered as the landmarks for the future work because they are assessed for CL LD at the snowed ground level and thus do not account for the process of the reflected CL detection by SPHERE-2 telescope. The method might be interesting for the now active and future detector arrays intended for EAS studies using CL.

PACS: 96.50.sb, 96.50.sd.

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

Received 04 March 2020.

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. Кобякова Елизавета Андреевна — студент; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: jaysmilt@yandex.ru.
3. Латыпова Василиса Сергеевна — студент; тел.: (495) 939-36-06, e-mail: 2000vi0501g@mail.ru.