

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА»
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА
«ПОИСК НОВЫХ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ МАССЫ ПЕРВИЧНОГО
ЯДРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА СФЕРА-2»

Выполнила студентка
414 группы:
Кобякова Елизавета Андреевна

подпись студента

Научный руководитель:
д.ф.-м.н, профессор Галкин Владимир Игоревич

подпись научного руководителя

Допущена к защите «____».05.2019

Зав. кафедрой _____

подпись зав. кафедрой

Москва

2019

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛИВНИ	6
1.1 Заряженная компонента	8
1.2 Излучения ШАЛ	9
1.3 Оптический фон	11
2 СФЕРА-2	13
3 ОБРАБОТКА ДАННЫХ	17
3.1 Требования к критерию	17
3.2 Байесов классификатор	20
3.3 Полученные результаты	21
ВЫВОДЫ	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	25
Список использованных источников	26

ВВЕДЕНИЕ

Энергетический спектр первичных космических лучей 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 сверхвысоких энергий позволяет судить об их энергетическом спектре и химическом составе только по характеристикам широких атмосферных ливней (ШАЛ).

По современным теоретическим представлениям, основным механизмом образования частиц Галактических космических лучей (ГКЛ) очень высоких энергий являются взрывы сверхновых звезд. При этом максимальная энергия галактических космических частиц не может превышать 100 ПэВ/нуклон. Однако в действительности наблюдаются космические частицы более высоких энергий вплоть до 100 ЕэВ. Происхождение этих ультра высокоэнергичных частиц пока не выяснено. В частности, предполагается, что их источниками могут быть активные ядра иных галактик. Изучение характеристик ПКЛ предельно высоких энергий может пролить свет на те процессы, которые происходят за пределами нашей Галактики.

Важнейшими характеристиками космического излучения являются абсолютная интенсивность, энергетический спектр и состав излучения. Космические лучи являются составной частью вещества в известной нам области Вселенной, поэтому они должны в значительной степени повторять средний химический состав галактик, звезд, других форм вещества, и различные аномалии состава указывают на особенности рождения и распространения космического излучения. Метагалактика на 80 процентов состоит из водорода, поэтому в составе космических лучей преобладают протоны. Ядерный состав космических лучей является их

важнейшей характеристикой, отражающей не только химический состав источников, но и процессы ускорения и диффузии космических частиц в межзвездной среде[4]. Для уточнения теории этих процессов необходимо более детальное изучение характеристик ШАЛ.

Несмотря на большое количество экспериментов, проведенных в последние десятилетия, существует значительная неопределенность в определении химического состава ПКЛ сверхвысоких энергий. 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 обычно оценивается по некоторой непосредственно измеряемой характеристике ШАЛ на основании получаемой из расчетов связи между средней X_{max} и средним значением характеристики, существенно зависящей от выбранной модели сильных взаимодействий. Такая косвенная оценка первичной массы имеет невысокую точность и позволяет в лучшем случае разделить первичные ядра на две группы.

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[5].

Традиционно используемые методы позволяют разделить спектр первичных частиц на две компоненты: спектр легких и спектр тяжелых ядер. Более подробную информацию о развитии ливня в атмосфере, в сравне-

нии с традиционными подходами, можно получить из анализа продольного профиля каскада. Необходимые измерения могут базироваться на регистрации оптических излучений, генерирующихся ШАЛ на всем пути его развития. Черенковский свет (ЧС) ШАЛ достигает уровня наблюдения без существенного ослабления, поэтому может служить показателем продольного развития ливня.

Эксперимент СФЕРА-2 регистрировал ЧС, отраженный от снежной поверхности. При обработке материала, полученного от установки, использовался относительный критерий формы функции пространственного распределения (ФПР) ЧС ШАЛ, демонстрирующий специфику продольного профиля ливня[6]. Это позволило разделить ПКЛ по химическому составу на 3 группы ядер. Данный критерий показал свою эффективность для ливней, ось наклона которых близка к вертикали (зенитный угол до ~ 30 градусов), поэтому целесообразной оказалась разработка относительного критерия формы и для наклонных событий, который позволит уточнить химический состав излучения, так как значительная часть зарегистрированных событий лежит в диапазоне зенитных углов более 40 градусов. В данной работе были проанализированы выборки модельных событий от ШАЛ с углами наклона 45 и 60 градусов с энергией первичной частицы 1 ПэВ. Был найден относительный критерий первичной массы частицы, позволяющий с высокой точностью разделить ПКЛ на 3 группы. В качестве легкой компоненты рассматривались протоны, средней - ядра азота (N), тяжелой - ядра железа (Fe).

1 ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛИВНИ

Данные о космических лучах очень высоких энергий получают из наблюдений широких атмосферных ливней. На них обратили внимание еще в некоторых ранних экспериментах с камерами Вильсона, но систематическое их изучение началось в конце 1930-х годов Оже и его сотрудниками с помощью разнесенных на расстояние детекторов. Они заметили, что детекторы, разнесенные на расстояние до 300 м, одновременно регистрируют события, и сделали правильный вывод, что это — ливни космических лучей, которые вызываются космической частицей очень высокой энергии, попавшей в верхние слои атмосферы.

Эти ливни есть не что иное, как каскадный процесс, начало которому дает космическая частица такой высокой энергии, что многие продукты достигают земли, сохранив часть своей энергии. Широкие атмосферные ливни интенсивно изучались с помощью специальных установок, занимающих большие площади. Определялись их энергетические спектры, химический состав и изотропия космических лучей самых высоких энергий. ШАЛ представляют собой потоки лептонов (электронов и мюонов) и адронов, возникающие в атмосфере в результате взаимодействия первичных космических частиц с ядрами атомов воздуха. Поперечные размеры ШАЛ могут достигать нескольких км.

При попадании в атмосферу частица КЛ высокой энергии — протон или более тяжелое ядро, — сталкивается с ядром атома атмосферы и рождает новые ядерно-активные частицы (протоны, нейтроны и в большей степени π - и K -мезоны), которые в дальнейшем также сталкиваются с атомами среды. Это приводит к лавинообразному увеличению числа ядерно-активных частиц. Если образовавшиеся π -мезоны имеют небольшую энергию, — а при высокой энергии характерный пробег до их взаимодействия с атомами среды меньше пробега до распада вследствие

релятивистского замедления времени, и π -мезоны дальше участвуют в развитии каскада, — то они распадаются и рожают мюонную компоненту ливня:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu-} \quad (1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_{\mu+} \quad (2)$$

π^0 -мезоны распадаются на γ -кванты, которые дают начало электронно-фотонной компоненте ливня:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (3)$$

В сильном электромагнитном поле ядер атомов атмосферы фотоны рожают пары электрон-позитрон, которые в дальнейшем рассеиваются в кулоновских потенциалах атомов среды. Электроны и позитроны получают ускорение, и, следовательно, рожают фотоны тормозного излучения. Если их энергия велика, вновь образуются пары, и процесс повторяется. Вследствие этого число частиц в электронно-фотонном каскаде лавинообразно возрастает, а средняя энергия частиц резко уменьшается на каждом шаге, пока не упадет до некоторого критического значения, при котором средние ионизационные и радиационные потери за единицу проходимого электроном пути сравниваются. Тогда число частиц в лавине достигнет максимума, а затем начнёт постепенно уменьшаться[7].

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).

1.1 Заряженная компонента

Наблюдение заряженных частиц ШАЛ - один из традиционных и самых проработанных методов исследования первичных космических лучей. Именно по числу заряженных частиц в ливне был обнаружен известный излом в спектре ПКЛ при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ. Основную часть заряженных частиц составляют электроны и позитроны, однако при энергии порядка 10^{15} эВ на уровне моря большинство частиц каскада – мюоны. С увеличением энергии ситуация меняется в пользу электронов, вследствие чего положение максимума спускается ниже: энергия ливня пропорциональна числу частиц в максимуме его развития, и чем больше энергия частицы, тем ниже в атмосфере расположен максимум ливня. Для регистрации заряженных частиц ШАЛ используются различные методы: изначально, как это было в установке ШАЛ МГУ, применялись счетчики Гейгера-Мюллера, в эксперименте Auger используются 1600 водяных баков площадью 12 м^2 каждый [8]. На сегодняшний день наиболее распространенными являются сцинтилляционные детекторы, задействованные в проектах KASCADE-Grande, Agasa, TA.

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 $N_\mu - N_e$ ($N_\mu - N_{ch}$) [9], рассмотрение распределений отношения $N_\mu - N_e$ ($N_\mu - N_{ch}$) [10], рассматриваются также более сложные комбинации абсолютных чисел частиц как для оценки E_0 , так и для оценки A [11]. Применяются и различные варианты анфолдинга [12] и Байесовых критериев [13] 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 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 неопределённостям оценок N_{ch} , N_e , N_μ 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. 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 других. 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 [14], а потом и на пять [15] 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 [16].

1.2 Излучения ШАЛ

Быстрые электроны, которые собственным полем поляризуют атомы среды, близкие к траектории своего движения, являются основным источником черенковского света (ЧС). Для каждой отдельной заряженной частицы волновой вектор и частота электромагнитной волны, распространяющейся в прозрачной среде, связаны соотношением $k = n\omega/c$, где

n — показатель преломления среды. С другой стороны, частота Фурье-компоненты поля равномерно движущейся в среде частицы связана с x -компонентой волнового вектора (ось x направлена вдоль скорости частицы) соотношением $\omega = kx * v$. Для того, чтобы такая компонента представляла собой свободно распространяющуюся электромагнитную волну, соотношения $k = n\omega/c$ и $kx = \omega/v$ не должны противоречить друг другу. Если θ — угол между направлением движения частицы и направлением излучения, то из соотношения $\omega/v = kx = k * \cos \theta = (n\omega/c) * \cos \theta$ следует, что:

$$\cos \theta = \frac{c}{v * n} = \frac{1}{\beta * n} \quad (4)$$

где $\beta = v/c$ — безразмерная скорость частицы. Таким образом, излучение Вавилова-Черенкова распространяется в узком конусе с углом раствора θ .

Полный поток ЧС ШАЛ приблизительно пропорционален энергии первичной частицы, образовавшей ШАЛ. Поток ЧС не измеряется непосредственно наземными установками, однако по плотности потока фотонов в отдаленных друг от друга детекторах можно восстановить полный поток ЧС и энергию первичной частицы, используя расчетные функции пространственного распределения (ФПР). Форма ФПР ЧС может быть воссоздана с меньшей погрешностью, чем форма ФПР электронов ШАЛ, что упрощает исследование состава ПКЛ.

Заряженные частицы ШАЛ при прохождении атмосферы возбуждают молекулы азота. Снимая это возбуждение, молекулы азота изотропно излучают флуоресцентный свет, регистрируемый на современных установках (Auger, HiRes) при помощи телескопов. Релятивистский электрон вызывает излучение порядка 4,7 фотонов на метр пройденного в атмосфере пути (при нулевой температуре и нормальном давлении). Флуоресцентное свечение атмосферы при прохождении ШАЛ пропорционально

числу частиц ливня.

Восстановление энергии и типа первичной частицы по данным флуоресцентных телескопов и детекторов ЧС проводится по форме каскадной кривой, регистрирующейся на матрице ФЭУ, и глубине максимума каскада X_{max} .

Существенным недостатком метода регистрации излучений ШАЛ является его ограниченность по времени: проведение эксперимента возможно только в ясные безлунные ночи. Напротив, регистрация заряженной компоненты ШАЛ не зависит от прозрачности атмосферы и уровня фоновой засветки, что позволяет обеспечить почти непрерывное время работы установки, что является большим преимуществом при изучении формы спектра и анизотропии ПКЛ.

На сегодняшний день быстро развивается методика наблюдения и анализа радиосигнала ШАЛ, которая позволяет оценивать значение X_{max} и обеспечивает круглосуточные наблюдения. Этот метод, имеющий порог наблюдения порядка $5 * 10^{16}$ эВ, является перспективным в области предельно высоких энергий.

1.3 Оптический фон

Все эксперименты, регистрирующие оптические компоненты ШАЛ, должны выделять сигнал черенковского и флуоресцентного света ШАЛ над оптическим шумом (или фоном). Источники такого фона можно разделить на две группы: внеатмосферные (звёздный и зодиакальный свет) и атмосферные (собственное свечение верхней атмосферы, люминесценция (флуоресценция) компонентов воздуха под действием космических лучей низких энергий, метеоритов, атмосферных электрических разрядов и естественной радиации). Оценка вкладов различных источников шума приведена в работе [17], самый значимый вклад в шум вносят:

рассеянный звёздный свет — 30 процентов, собственное свечение ночной атмосферы — до 40 процентов и зодиакальный свет — 15 процентов. . Вклады разных компонент оценены для видимой области спектра, данные расходятся [18-19]. В той же работе [17] отдельно рассматривается вопрос о влиянии облачного покрова на уровень перечисленных шумов. Для регистрации черенковского и флюоресцентного света подходят детекторы с чувствительностью в диапазоне длин волн менее 530 нм [20], поэтому возможные источники фоновой засветки в красной области видимой полосы не должны вносить существенных поправок в результаты экспериментов. Из-за различия в характерных спектрах энергий и соответствующих длин волн, направления излучения и выхода фотонов вблизи оси (вплоть до расстояний порядка 1 км) доминирует ЧС, далее – ФС. При прохождении атмосферы ФС и ЧС ослабляются за счет релеевского рассеяния и поглощения в тонком атмосферном слое. В эксперименте СФЕРА-2 черенковский свет ШАЛ проходит путь до снежной поверхности, ослабляется поглощением и релеевским рассеянием, отражается от снежной поверхности (с альбедо порядка 95 процентов) и проходит вторую часть пути до высоты детектора, повторно ослабевая. Аналогично, в оптических фонах две составляющие: фотоны, рассеянные релеевским рассеянием назад, попадающие напрямую в детектор, и фотоны, отраженные от снежной поверхности и вернувшиеся на уровень детектора, дважды пройдя приземный слой атмосферы.

2 СФЕРА-2

Детектор СФЕРА-2 построен на использовании такой методики изучения ПКЛ как регистрация излучения Вавилова-Черенкова, также называемого черенковским светом (ЧС), отраженного от снежной поверхности. Этот подход имеет явные преимущества:

- 1) метод дает возможность обеспечивать значительную площадь регистрации ЧС при использовании компактного прибора;
- 2) поля зрения отдельных ФЭУ прибора покрывают существенную часть обзораемой поверхности, благодаря чему можно наблюдать ЧС ШАЛ непосредственно в приосевой области ливня;
- 3) возможность изменения высоты подъема детектора позволяет менять характерный диапазон исследуемых энергий первичной частицы.

Установка предназначена для подъема в темное время суток на привязном аэростате на высоту до 1 км над снежной поверхностью. Она состоит из зеркала диаметром 1,5 м и радиусом кривизны 0,94 м, в фокусе которого установлена мозаика из 108 ФЭУ-84-3 и одного ФЭУ Hamamatsu R3886. Для лучшего пространственного разрешения перед зеркалом находится диафрагма диаметром 0,93 м. Угол зрения оптической системы установки составляет 52 градуса, и с высоты 1 км каждый ФЭУ осматривает область диаметром около 50 м на заснеженной поверхности. Электронная аппаратура СФЕРЫ-2 позволяет записывать форму импульса с каждого из 109 фотоэлектронных умножителей с дискретностью 12,5 наносекунд в течении 12 микросекунд.

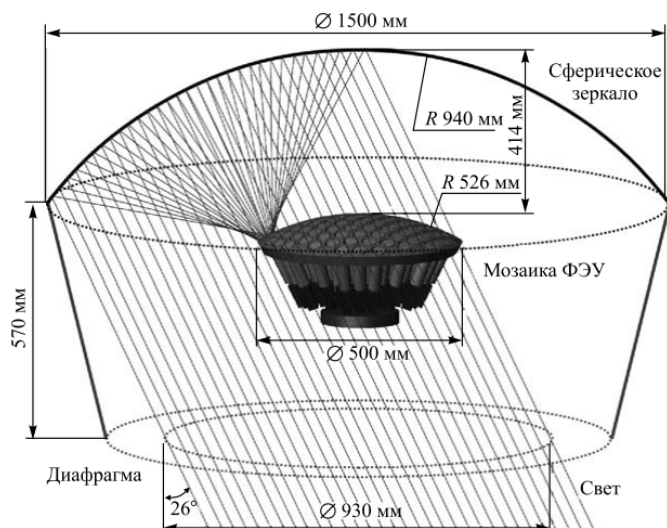


Рис. 1. Устройство оптической системы СФЕРА-2

СФЕРА-2 регистрирует динамику световых пятен, образуемых ЧС ШАЛ. Установка работала в диапазоне энергий $10^{16} \text{ эВ} < E_0 < 10^{18} \text{ эВ}$. При проведении измерений высота подъема установки позволяет регулировать диапазон энергий регистрируемых событий и оптическое разрешение (детальность) изображения вспышек черенковского света (ЧС) широких атмосферных ливней на снежной поверхности. То есть, чем выше поднята установка, тем большие первичные энергии регистрируемых частиц, но тем меньше чувствительность фотоумножителей к данной вспышке [21]. Изначально планировался подъем установки на высоту до 3 км. Однако из-за технических сложностей использовался аэростат БАПА-1 около 250 м^3 вместо предполагаемого 750 м^3 , вследствие чего максимальная высота подъема снизилась до 1000 м, что привело к уменьшению площади наблюдаемой снежной поверхности и, соответственно, уменьшению максимальной регистрируемой энергии до 500 ПэВ вместо ожидаемых 1000 ПэВ. Расчёты показали, что оптимальная рабочая высота - это 600-700 м над снежной поверхностью. Всего в период с 2008 по 2013 год было осуществлено 23 подъёма, общее время измерений

составило 139 часов.

Основными целями проекта СФЕРА-2 являлись:

- 1) измерение спектра всех ядер ПКЛ с помощью расчета эффективного геометрического фактора регистрации ливней и оценки энергии первичных частиц;
- 2) разделение по массе групп ядер ПКЛ, при этом производилась оценка показателя наклона ФПР для зарегистрированных ШАЛ и учет зависимости эффективного геометрического фактора от массы ядра.

Оценка энергии события производилась путем нормировки экспериментальной ФПР на модельную ФПР с известной энергией. Был получен дифференциальный энергетический спектр частиц в изучаемом диапазоне энергий, совпадающий в пределах погрешностей с результатами работы других установок (рис.2).

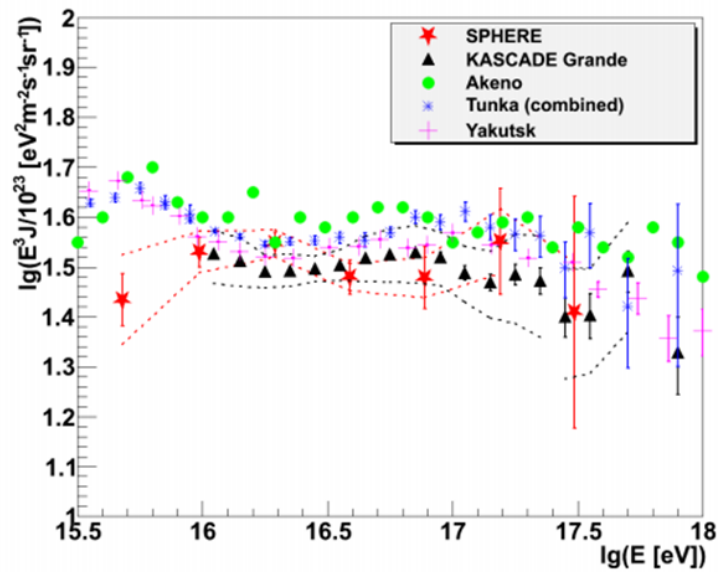


Рис. 2. Дифференциальный энергетический спектр по данным 2011-2013 гг.

Для восстановления спектра всех ядер производилось моделирование распределения ливней по энергиям и подбиралась форма, при которой распределения согласуются. При этом образовались систематические по-

грешности в связи с миграцией событий между Е бинами (>20 ПэВ), погрешностью расчета геометрического фактора, зависимостью формы спектра от химического состава и дискретностью энергий модельных ливней.

Определение химического состава КЛ проводится в режиме индивидуальных событий на основе сравнения образов зарегистрированных событий с моделированными. Оценка состава ПКЛ указывает на утяжеление при энергиях 40 - 100 ПэВ (рис.3).

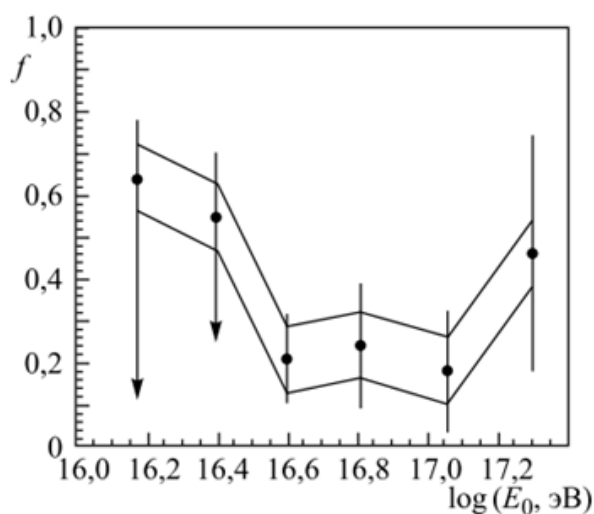


Рис. 3. Зависимость доли легких ядер от логарифма энергии первичной частицы в эксперименте СФЕРА-2 по данным 2012 г.

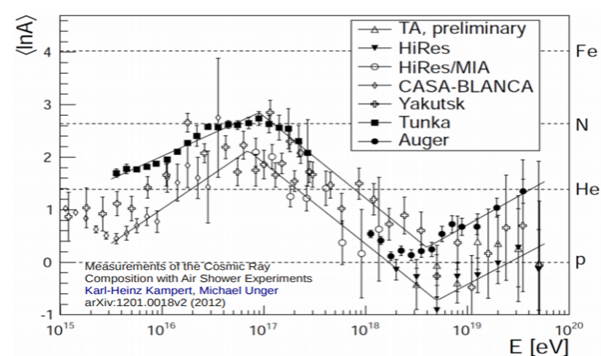


Рис. 4. Зависимость среднего массового числа от логарифма энергии первичной частицы в различных экспериментах

3 ОБРАБОТКА ДАННЫХ

При обработке материала, полученного от установки СФЕРА-2, были учтены ограниченные возможности метода максимума глубины каскада, и было решено использовать относительный критерий формы функции пространственного распределения (ФПР) ЧС ШАЛ. Оптимальный параметр-критерий был разработан на основании распределений показателя наклона ФПР ЧС для почти вертикальных ливней. Параметр наклона позволяет построить критерии индивидуального разделения групп ядер ПКЛ для ливней, ось наклона которых имеет зенитный угол до ~ 30 градусов. Это дало возможность разделить ПКЛ по химическому составу на 3 группы ядер. Такая методика не может быть использована при анализе ливней с большими зенитными углами, и поэтому в данной работе был осуществлен поиск нового критерия формы ФПР ЧС ШАЛ, с помощью которого может быть проведена обработка оставшихся событий и уточнен химический состав ПКЛ.

3.1 Требования к критерию

Известно, что распределение черенковского 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 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 сла-

бо зависеть от выбранной модели ядерного взаимодействия. Это общее свойство относительных критериев, основанных 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[22,23].

Для того чтобы получить новый относительный критерий, были использованы искусственные события от ШАЛ, угол наклона оси которых составляет 45 и 60 градусов. Так как информативным является именно продольное развитие ШАЛ, каждый образ ЧС суммировался по одной из пространственных координат. На рисунке 5 можно видеть просуммированные, отнормированные на единицу и усредненные по 30-ти событиям образы ШАЛ от протонов, ядер азота и железа.

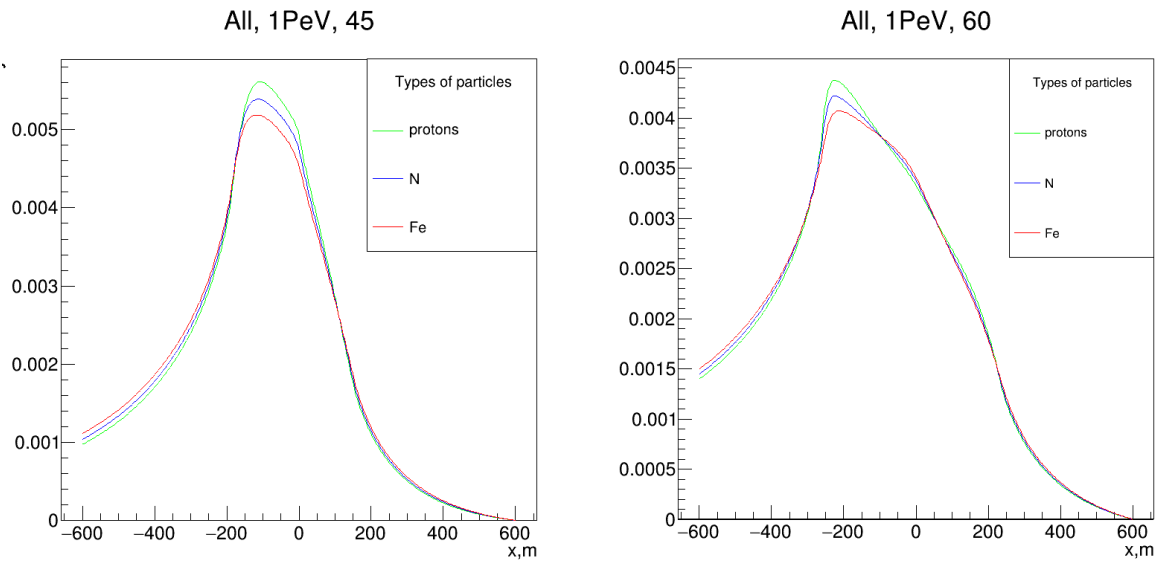


Рис. 5. Усредненные нормированные спектры ЧС ШАЛ от протона, ядер N и Fe при зенитных углах 45 и 60 градусов

В процессе обработки нормированный образ черенковского света интегрировался по выделенным прямоугольным областям (рис. 6), а полученные интегралы S_i образовали отношения $r_{ij} = S_i/S_j$. С помощью

программного кода расположение и ширина прямоугольников варьировались 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. Для каждой из пар p-N, N-Fe и для каждого из двух зенитных углов с помощью нормального Байесова алгоритма с предположением о равенности априорных вероятностей отнести частицу к одному или другому классу были найдены свои оптимальные критерии r_{ij} . Анализ показал, что интервалы интегрирования вдоль длинной оси пятна, соответствующие оптимальным r_{ij} , в основном зависят от наклона ливня, и можно с минимальной потерей точности определить единый критерий $r = S_1/S_2$, ошибки классификации которого лишь немного превышают ошибки локальных оптимальных критериев. Для угла наклона оси ливня в 45 градусов S_1 представляет собой интеграл потока черенковского света по прямоугольной области площадью 60000 м², отдаленной от центра пятна на 375 м, S_2 - интеграл по области 12000 м², отдаленной от центра на 425 м. Для зенитного угла 60 градусов S_1 интегрировался по области 120000 м², отдаленной от центра пятна на 300 м, S_2 - по области 12000 м², отдаленной от центра на 350 м (рис. 6). Оси на рисунке подписаны в ячейках, каждая из которых соответствует квадрату 2,5 м х 2,5 м.

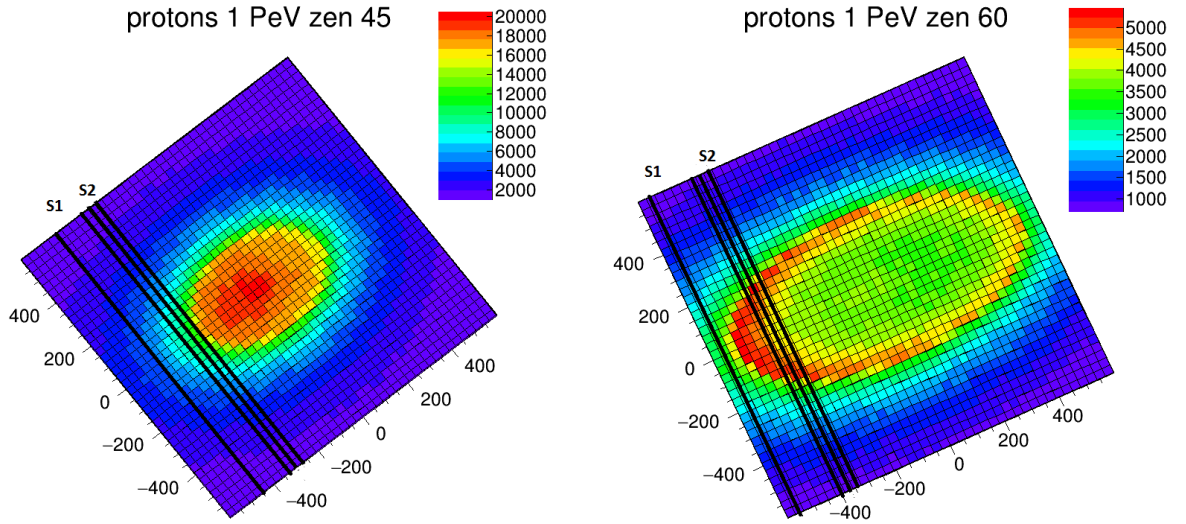


Рис. 6. Области интегрирования, отмеченные на спектрах ЧС ШАЛ от протонов при зенитных углах 45 и 60 градусов

3.2 Байесов классификатор

Анализ на основе байесовской классификации активно изучался и использовался, начиная с 1950-х годов, он является масштабируемым по числу признаков. В данной задаче рассматривалась парная классификация между основными и промежуточными ядрами. Как и любой классификатор, байесовский присваивает метки классов наблюдениям, представленным векторами признаков. Байесовский подход к классификации основан на теореме, утверждающей, что если плотности распределения каждого из классов известны, то искомый алгоритм можно выписать в явном аналитическом виде[22]. Более того, этот алгоритм оптимален, то есть обладает минимальной вероятностью ошибок. В качестве критерия при парной классификации рассматривался параметр L , характеризующий вероятность частицы являться тем или иным химическим элементом, где x - вектор признаков классифицируемой частицы, а $w_{1,2}$ - классы:

$$L = \frac{P(x|w_1)}{P(x|w_2)} * \frac{P(w_1)}{P(w_2)} \quad (5)$$

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

При реализации классификации предполагалось, что параметр r_{ij} распределен по нормальному закону. Тогда для отнесения частицы к той или иной группе можно рассматривать параметр:

$$\ln L = -\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1} + \frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2} - \ln \sigma_1 + \ln \sigma_2 \quad (6)$$

Если $\ln L > 0$, то x принадлежит w_1 , если $\ln L < 0$, то x принадлежит w_2 .

3.3 Полученные результаты

В качестве материала для разработки были использованы выборки искусственных событий от ШАЛ с зенитными углами наклона оси 45 и 60 градусов от частиц, имеющих энергию 1 ПэВ, построенные с использованием модели QGSJET01 в версии CORSIKA6.5001. Для энергии 1 ПэВ для каждого события данные сохранялись в виде карты поперечного распределения черенковского света, представляющей собой массивы из 480x480 элементов, содержащие информацию о количестве света, попавшего на квадратные ячейки 2,5 м x 2,5 м. Можно считать, что на уровне наблюдения существует квадратный ковёр размером 1200 м x 1200 м с центром на оси ливня, заполненный квадратными детекторами.

В ходе работы были найдены интервалы интегрирования для получения универсального параметра r , практически не зависящего от пар классов и демонстрирующего почти оптимальное поведение. На рисунке 7 изображены гистограммы распределения значений параметра для этих частиц. На рисунке 8 короткими штрихами отмечены значения параметра

r_{ij} для 3 основных и 4 промежуточных частиц, а длинными - значения, усредненные по 30-ти событиям от каждого типа частицы.

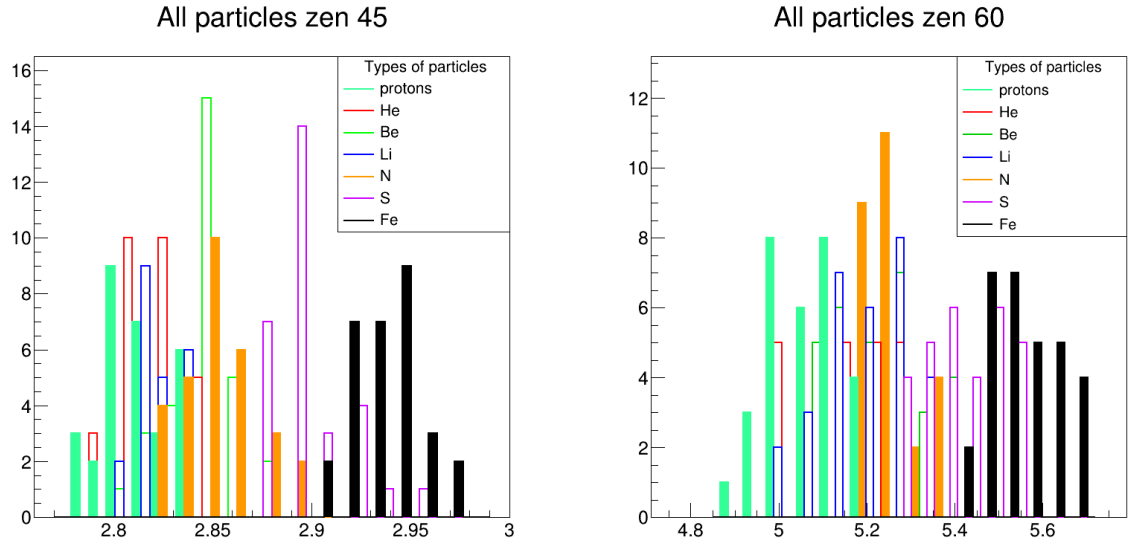


Рис. 7. Распределение параметров r_{ij} для протонов и ядер N, Fe (закрашенные гистограммы) и промежуточных He, Li, Be и S при зенитных углах 45 и 60 градусов

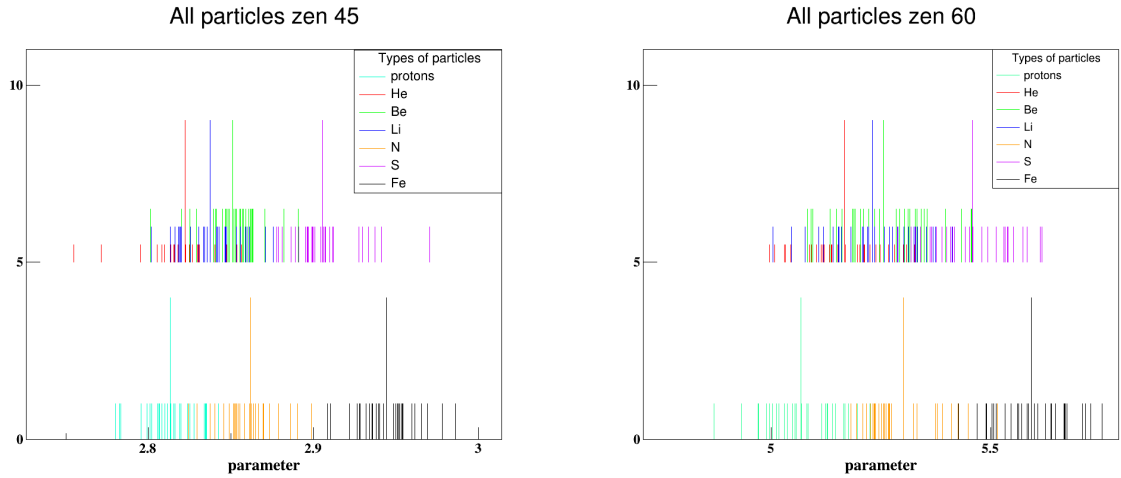


Рис. 8. Усредненные (длинные штрихи) и частные (малые штрихи) значения параметров r_{ij} для протонов и ядер N, Fe и промежуточных ядер He, Li, Be и S при зенитных углах 45 и 60 градусов

На основе найденных оптимальных критериев и реального распределения признаков, уже без учета предположения нормальности распре-

деления, была проведена классификация разных пар частиц, априорные вероятности в данном случае полагались одинаковыми. Вероятности ошибочной классификации приведены в таблице 1. Оценка вероятности при парной классификации является усредненной между ошибками в одну и в другую сторону. Для основных пар событий в обе стороны она практически не различается.

Таблица 1. Вероятность неправильной классификации с универсальным для всех пар критерием для двух значений зенитного угла

Градусная мера	p-N	N-Fe	p-He	He-N	p-Li	Li-N	p-Be	Be-N	N-S	S-Fe
45	0.07	0.03	0.38	0.17	0.27	0.25	0.17	0.4	0.15	0.15
60	0.07	0.05	0.35	0.23	0.1	0.45	0.18	0.47	0.23	0.3

При последующей обработке на интегрируемые области был распределен шум от фона ночного неба с плотностями потока фотонов, лежащими в диапазоне от $1 * 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ до $1 * 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. В результате этого точность разделения ядер осталась без изменения, и вероятности ошибочной классификации совпадают с указанными в таблице 1 значениями.

ВЫВОДЫ

1. В работе были изучены выборки модельных событий от ШАЛ с углами наклона 45 и 60 градусов с энергией первичной частицы 1 ПэВ от протонов, ядер гелия (He), лития (Li), бериллия (Be), азота (N), серы (S) и железа (Fe). Была выявлена зависимость формы ФПР от массы первичной частицы.
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.
4. По реальным распределениям критерия проведена парная классификация основных и промежуточных ядер, демонстрирующая малые вероятности ошибки для основных пар событий.
5. Оценено влияние фона ночного неба на результаты классификации при значениях плотности потока фотонов от $1 * 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ до $1 * 10^{14} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, для критерия, использующего отношение интегралов от ФПР ЧС по значительным площадкам (порядка тысяч м^2), этим влиянием можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведены найденные оптимальные критерии массы первичной частицы на основе искусственных событий ШАЛ и оценено влияние фона ночного неба на результаты использования данного критерия. Осуществленная оценка вероятности ошибочной классификации частиц на основе полученного критерия демонстрирует возможность использования данных результатов для обработки данных, полученных с установки СФЕРА-2.

Для того, чтобы можно было применять критерии к реальным экспериментальным данным, нам необходимо переформулировать их в терминах непосредственно измеряемых детектором СФЕРА-2 величин, то есть учесть процессы отражения света от снега, взаимодействия со слоем атмосферы на пути в детектор и регистрации его детектором.

Список использованных источников

1. Гинзбург В.Л. Астрофизика космических лучей (история и общий обзор) — УФН. 1996. Т.166. №2. с. 169-183
2. Derbina V.A. et al. (RUNJOB Coll.) Cosmic-Ray Spectra and Composition in the Energy Range of 10-1000 TeV per Particle Obtained by RUNJOB Experiment. — *Astrophys. J. Lett.* 2005. V. 628. №1. p.41
3. Asakimori K. et al. Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra: Results from JACEE Experiment — *Astrophys. J.* 1998. V. 502. №1. p.278
4. Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: Учебное пособие для вузов. — М.: Университетская книга; Логос, 2007. - 488 с.
5. Arteaga-Velazquez J.C. et al. — *Journal of Physics: Conference Series.* 2015. 651. 012001.
6. R.A. Antonov, E.A. Bonvech, D.V. Chernov, T.A. Dzhatdueva, V.I. Galkin, D.A. Podgrudkov, T.M. Roganova Spatial and temporal structure of EAS reflected Cherenkov light signal. — *Astroparticle Physics* 108. 2019.
7. Н.А. Добротин и др. Широкие атмосферные ливни космических лучей. — *Успехи Физических наук*, т.XLIX(вып.2), 1953.
8. Abraham J. et al. Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger observatory. — *Nucl.Instrum.Meth.*, V. A523. 2004. p.50-95
9. Apel W. et al. (KASCADE-Grande Coll.) — *Astropart. Phys.* 2012. 36. p. 183.

10. Cantoni E. et al. (KASCADE Coll.) Proc. of the 32nd ICRC. — Beijing, China. 2012. 11. p. 259
11. Apel W. D. et al. (KASCADE-Grande Collaboration) — Phys. Rev. Lett. 2011. 107. 171104.
12. Fuhrmann D. PhD thesis. — University of Wuppertal. 2012.
13. D'Agostini G. NIM A. — 1995. 362. P. 487.
14. Antoni T. et al. Astropart. Phys. — 2002. 16. P. 245.
15. Kampert K.-H. et al. Nuclear Physics B. (Proc. Suppl.) — 2004. 136. P. 273.
16. Haungs A. et al. EPJ Web of Conferences. — 2017. 145. 13001.
17. В.П. Будник, А.П. и Лунев. Свечение ночного неба. — 2008.
18. M. Bott-Bodenhausen et al. A new air cherenkov counter concept for the observation of extended air shower. — Nuclear instruments and Methods in Physics Research A315. 1992. P.236–251
19. Ch. et al Leinert. The 1997 reference of diffuse night sky brightness. — Astronomy and Astrophysics Supplement. 1998. V.127 P.1–99
20. Д. В. Чернов, Е. А. Бонвеч, Т. А. Джатдоев, Мир Фингер, Мих Фингер, В. И. Галкин, Г. К. Гарипов, В. А. Кожин, Д. А. Подгрудков, А. В. Скурихин. Position-sensitive sipm detector for separation of cherenkov and fluorescent light of eas. — PoS, (ICRC2017).2017. P.1–8
21. R.A. Antonov, E.A. Bonvech, D.V. Chernov, T.A. Dzhatdoeva, V.I. Galkin, D.A. Podgrudkov, T.M. Roganova Spatial and temporal structure of EAS reflected Cherenkov light signal. — Astroparticle Physics 108. 2019.

22. Бахромзод Р. Галкин В.И. Поиск оптимальных критериев для выделения широких атмосферных ливней от гамма-квантов — Ученые записки физического факультета Московского университета. №3. 2018
23. Мукумов А.Р., Галкин В.И. Оценка первичных параметров широкого атмосферного ливня по данным детекторов частиц высокогорных установок. — Ученые записки физического факультета Московского университета. №3. 2018
24. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов — М.: Наука, 1979. — 368 с.