

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИСЕРТАЦИЯ

**«ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗОВ ОТРАЖЕННОГО ОТ СНЕГА ЧЕРЕН-
КОВСКОГО СВЕТА ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ В ТЕЛЕ-
СКОПЕ СФЕРА-3»**

Выполнил студент

214М группы

Иванов Владимир Александрович

Научный руководитель:

Профессор, д.ф.-м.н. Галкин Владимир Игоревич

Допущена к защите

Зав. кафедрой _____ С.И. Свертилов

Москва

2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Изучение широких атмосферных ливней.....	5
1.1 История изучения космических лучей	5
1.2 Развитие ШАЛ	8
1.3 Методы изучения КЛ по характеристикам ШАЛ.....	13
1.4 Детекторы ШАЛ	16
1.5 Проект СФЕРА.....	19
2. Моделирование и обработка событий ШАЛ в детекторе СФЕРА-3.....	28
2.1 Моделирование событий ШАЛ в детекторе СФЕРА-3.....	28
2.2 Оценка способности различать массы первичных ядер	38
ВЫВОДЫ.....	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	44
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	46

ВВЕДЕНИЕ

Исследование первичного космического излучения (ПКИ) является предметом научных изысканий на протяжении многих десятилетий. Полученные в последнее время результаты [1] указывают на то, что основная часть событий первичных космических лучей (ПКЛ) с энергией 1-1000 ПэВ может иметь экстрагалактическую природу. Таким образом, состав ПКЛ в данном диапазоне может иметь решающее значение для построения модели перехода от галактических космических лучей к экстрагалактическим. Понимание физики этого процесса необходимо для описания процессов ускорения и распространения космических лучей.

Для первичных частиц с энергиями меньше 10^{15} эВ используются прямые методы регистрации с помощью детекторов, поднимаемых в стратосферу или в космическое пространство. В области энергий выше «колена» ($\geq 3 \cdot 10^{15}$ эВ) регистрация частиц ПКИ происходит с помощью косвенных методов из-за чрезвычайно низкой интенсивности космических лучей, которая составляет менее 1 частицы на м^2 в год на ср.

Применение калориметра для измерения энергии таких частиц нецелесообразно, так как для такого уровня энергий требуется установка гигантских размеров. Восстановление характеристик первичной частицы, таких как энергия и масса, возможно путем анализа свойств широких атмосферных ливней (ШАЛ), включая адронные, мюонные, электронно-фотонные компоненты, флюоресценцию, радиоизлучение, акустические эффекты, излучение Вавилова-Черенкова и др. В экспериментах проекта СФЕРА изучение характеристик ШАЛ происходит с помощью регистрации черенковского света.

Регистрация черенковского света ШАЛ производится как наземными, так и воздушными установками. Яркими представителями установок наземного базирования являются эксперименты проектов HiRes [2], TAIGA [3], Telescope Array (TA) [4], AGASA [5], Pierre Auger Observatory (Auger) [6], Якутская установка [7, 8] и другие. Метод проекта СФЕРА основан на идее А.Е.

Чудакова [9] регистрировать черенковский свет ШАЛ, отраженный от поверхности земли, фотоприемниками, установленными на летательных аппаратах. В эксперименте СФЕРА измеряется пространственное распределение черенковского света ШАЛ и, в частности, интенсивность света в приосевой области, которая является чувствительной к типу первичной частицы.

В эксперименте СФЕРА основной информационной единицей является образ на мозаике, так как именно он предоставляет ключевые данные о событии. Возникает необходимость получения как можно более точного и физически достоверного образа на мозаике детектора. Таким образом возникает первая задача, которая заключается в генерации достоверных образов на мозаике в терминах модели планируемого детектора, вторая же задача заключается в обработке получаемых образов для оценки качества геометрии телескопа. Глобальной же целью является поиск оптимальной конфигурации детектора СФЕРА-3.

1. Изучение широких атмосферных ливней

1.1 История изучения космических лучей

Космические лучи представляют собой элементарные частицы и атомные ядра, которые получают ускорение в активных объектах Галактики или в ходе взрывов сверхновых [10], часть которых достигает земной атмосферы. Открытие космических лучей совершил Виктор Гесс в начале XX века, когда он, используя спектрометр на борту аэростата, зафиксировал повышение уровня ионизации атмосферы. Эти данные позволили сделать вывод, что основная часть ионизирующего излучения исходит извне, причем его интенсивность не зависит от времени суток, что указывает на несолнечный источник излучения

Американский физик Роберт Э. Милликен и русский физик Дмитрий В. Скобельцын внесли значительный вклад в изучение космических лучей. Скобельцын с помощью камеры Вильсона в магнитном поле не только подтвердил данные Милликена о заряженной природе космических лучей, но и впервые обнаружил группы высокоэнергетических частиц, которые впоследствии были названы атмосферными ливнями, формируемыми этими лучами.

Со временем развитие экспериментальной техники позволило ученым изучать КЛ более высоких энергий. Пьер Оже в 1938 году провел эксперимент в Альпах, используя несколько детекторов, расположенных на расстоянии нескольких метров друг от друга, и отметил высокую степень совпадения сигналов от детекторов. Так были открыты широкие атмосферные ливни (ШАЛ) – каскады вторичных частиц, генерируемые частицами ПКЛ в атмосфере Земли. Оже удалось зарегистрировать частицы с энергией 10^{15} эВ.

В дальнейшем для изучения КЛ стали использовать системы из большого числа детекторов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Они позволили изучить пространственное распределение частиц на

уровне земли, восстанавливая информацию о первичных частицах, инициировавших ШАЛ.

Впервые Блеккет обратил внимание на то, что черенковское излучение, возбуждаемое быстрыми заряженными частицами, должно наблюдаться не только в плотных средах, но и в воздухе, а Джелли и Галбрайт обнаружили в ночном небе короткие вспышки света, сопровождающие прохождение ШАЛ космического излучения. Последующими экспериментами было доказано, что этот свет по своей природе представляет черенковское излучение электронов ШАЛ или же черенковский свет ШАЛ.

В дальнейшем черенковский свет ШАЛ был использован, с одной стороны, для получения информации об особенностях развития этих ливней, главным образом путем анализа пространственного распределения света в них, а с другой стороны, - для получения информации об источниках космического излучения.

Для интерпретации этих экспериментов необходимы расчеты пространственного распределения света, ожидаемого на основании определенных модельных представлений о структуре ливней. Такие расчеты нужны также для выяснения чувствительности пространственного распределения к изменению тех или иных характеристик ливней. Первую серьезную попытку теоретической трактовки этой проблемы сделали Гольданский и Жданов. Независимо от них такие расчеты выполнил также Галбрайт, однако расчеты Галбрайта были выполнены без учета поперечного размера ливня, и углового распределения частиц в нем.

В 1965 году Арно Пензиас и Роберт Вильсон открыли реликтовое излучение [11]. Всего лишь несколько месяцев спустя Кеннет Грейзен [12], и независимо от него, Георгий Тимофеевич Зацепин и Вадим Алексеевич

Кузьмин [13] предположили, что протоны с энергиями выше 10^{19} эВ могут взаимодействовать с фотонами реликтового излучения, рождая пионы способами, описываемыми формулами, приведенными ниже, пока их энергия не

упадёт ниже вычисленного ими порога ($\sim 10^{19}$ эВ). Данный эффект должен приводить к резкому падению спектра для энергий выше пороговой.

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$$

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^0$$

На рисунке 1 представлен основной результат работы Г.Т. Зацепина и В. А. Кузьмина. Данный эффект получил название “эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина”. Если характерное время для столкновения протона с фотоном становится достаточно малым по сравнению со временем жизни КЛ этих энергий в Метагалактике, то будет иметь место эффективное обрезание спектра КЛ.

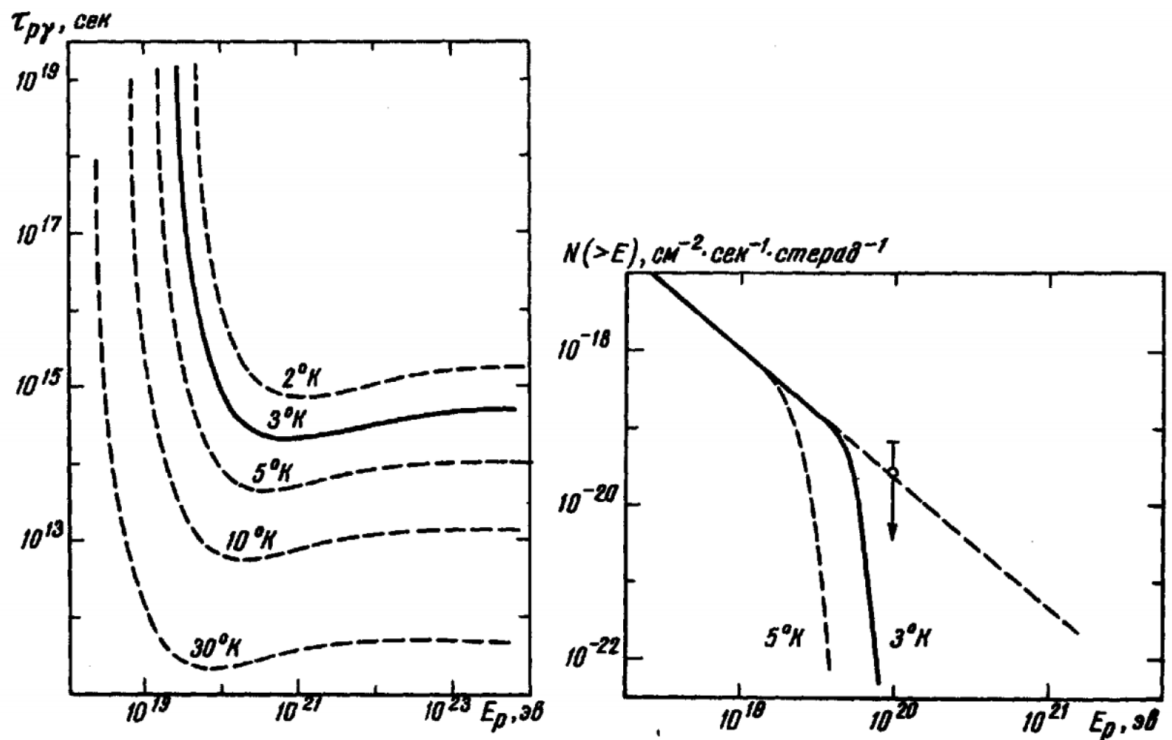


Рисунок 1 Слева: характерное время ГЗК-столкновений как функция от энергии протонов для различной температуры фотонного газа. Справа: ожидаемое подавление спектра для упрощенной модели источников космических лучей.

В 1960-е годы получила развитие новая технология регистрации ШАЛ самых высоких энергий, основанная на наблюдении флуоресцентного излучения при возбуждении молекул азота ионизирующими частицами. Атмосфера, в этом случае, играет роль калориметра, позволяя определять энергию

первичных частиц. Важную роль играет тот факт, что флуоресцентное излучение от взаимодействия ШАЛ с атмосферой изотропно. Таким образом возможен одновременный мониторинг больших объемов воздуха. Поставив два детектора, разнесенных на некоторое расстояние, можно получить стереометрическую картину.

Данная идея легла в основу эксперимента Fly's Eye. Далее он был усовершенствован в установку High-Resolution Fly's Eye (HiRes). Она состояла из двух флуоресцентных станций, HiRes I и HiRes II, расстояние между которыми составляло 12.6 км. Значительный прогресс в технологиях регистрации ШАЛ позволил зарегистрировать и изучить множество характеристик и явлений, связанных с космическими лучами, в том числе и измерить энергетический спектр вплоть до энергий $10^{20.5}$ эВ. Было получено подавление спектра при энергиях выше $10^{19.75}$ эВ, хорошо согласующееся с предсказаниями ГЗК-эффекта [14].

Сейчас задачей об изучении ШАЛ с помощью флуоресцентного излучения занимается установка Telescope Array (ТА). Обсерватория ТА представляет собой гибридную детекторную систему, состоящую из массива 507 сцинтилляционных поверхностных детекторов, которые измеряют распределение заряженных частиц на поверхности Земли, и трех флуоресцентных станций, которые наблюдают за ночным небом над поверхностными детекторами.

При энергиях выше 10^{17} эВ, исследуя флуоресцентное излучение, можно получить больше информации о частице, нежели прибегая к другим характеристикам ШАЛ. В отличие от черенковского света флуоресцентный свет ШАЛ не обладает направленностью и его выход ниже, чем черенковского света, поэтому порог флуоресцентных детекторов, как правило, составляет не менее $3 \cdot 10^{17}$ эВ.

1.2 Развитие ШАЛ

Из теоретических соображений и экспериментальных данных известно, каким образом космические лучи проходят сквозь атмосферу

На высотах в несколько десятков километров первичные частицы испытывают ядерное (сильное) взаимодействие с ядрами атомов воздуха. В результате этих столкновений образуется множество вторичных частиц, одна из которых обладает значительной долей первичной энергии и проносит ее глубже в атмосферу. Такая лидирующая частица способна еще несколько раз провзаимодействовать на своем пути. В подобных взаимодействиях рождаются различные вторичные частицы: каоны - $K^{\pm,0}$, пионы - $\pi^{\pm,0}$, гипероны, нуклон-антинуклонные пары. Но до поверхности земли в основном доходят продукты их взаимодействия со средой, а также их распадов.

Состав вторичной компоненты зависит от физических процессов взаимодействия первичной частицы с ядрами атмосферы. Совокупность взаимодействий первичной частицы и рождаемых ею вторичных частиц называется каскадным процессом. Схема развития ШАЛ представлена на рис. 1. От пионов (π^{\pm}) и каонов (K^{\pm}) образуется мюонная компонента каскада.

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu} & \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu} \\ K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu} & K^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}\end{aligned}$$

Образуются также пары протон-антипротон, нейтрон-антинейтрон и нестабильные частицы: K -мезоны и гипероны. Их роль в развитии ливней невелика по сравнению с пи-мезонами. На уровне моря эти нестабильные частицы составляют лишь 1 % от остальных компонент.

От пионов (π^0) и мюонов (μ^{\pm}) развивается в электромагнитный каскад.

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_{\mu} \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu}$$

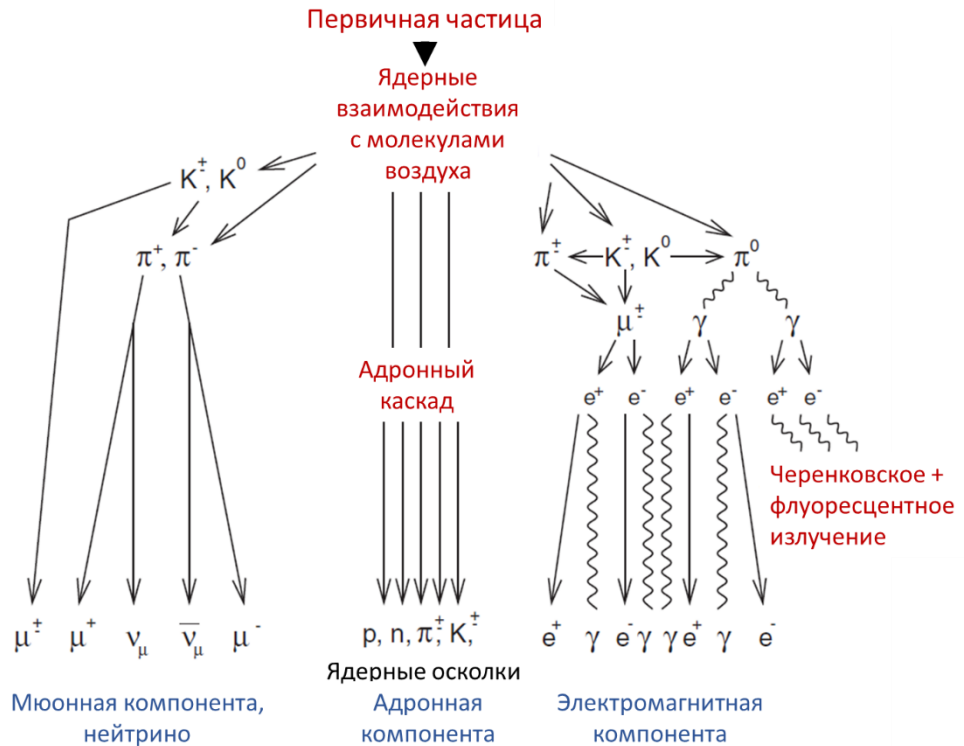


Рисунок 2 – Схема развития ШАЛ

Пионы образуются два гамма-кванта с энергией, сильно превосходящей порог для рождения электрон-позитронных пар (1.022 МэВ) в поле ядер.

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

Электроны и позитроны испытывают рассеяние на ядрах атомов воздуха, образуя при этом фотон.

$$e^+ \rightarrow e^+ + \gamma \quad e^- \rightarrow e^- + \gamma$$

Он снова способен родить электрон-позитронную пару, если его энергия достаточно велика. Эти два процесса обеспечивают размножение частиц электронно-фотонного каскада. Вследствие чего число частиц в каскаде лавинообразно растет, а средняя энергия частиц уменьшается, пока не достигнет критического значения, при котором средние радиационные потери станут равными ионизационным на единице пути, проходимой электроном, порядка $E_k \sim 80$ МэВ. В этот момент в ливне будет максимальное число частиц, которое после начнет уменьшаться. Таких каскадов в составе ШАЛ много, с точки зрения наиболее многочисленных заряженных частиц – электронов и позитронов

– его можно представить как один большой электронно-фотонный каскад с подпиткой от адронной и мюонной компонент.

Адронная компонента в процессе взаимодействий слабо отклоняется от направления движения первичной частицы и концентрируется в области оси ливня (порядка нескольких метров), электронная компонента располагается на расстоянии сотни метров от оси, а мюонная в области нескольких сотен метров. Частицы, движущиеся на удалении от оси ливня, отстают от частиц, расположенных вблизи оси. Таким образом, информация о временном распределении частиц в диске может использоваться для определения оси ливня.

1.2.1 Черенковское излучение

Черенковское излучение (или излучение Вавилова-Черенкова) возникает при движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью большей скорости света в этой среде, т.е. при $v = \frac{c}{n}$, где c – скорость света в вакууме, а n – показатель преломления среды.

Черенковское излучение является совместным излучением множества атомов среды, расположенных вдоль траектории движения частицы и поляризованных её электрическим полем. Таким образом, непосредственно излучает не частица, а среда, в которой движется частица. Волновой фронт этого излучения представляет собой поверхность конуса, вершиной которого является частица, а осью — её траектория (рис. 3). Угол раствора конуса θ фиксирован и определяется скоростью частицы v и свойствами среды $\theta = \frac{c}{n}$.

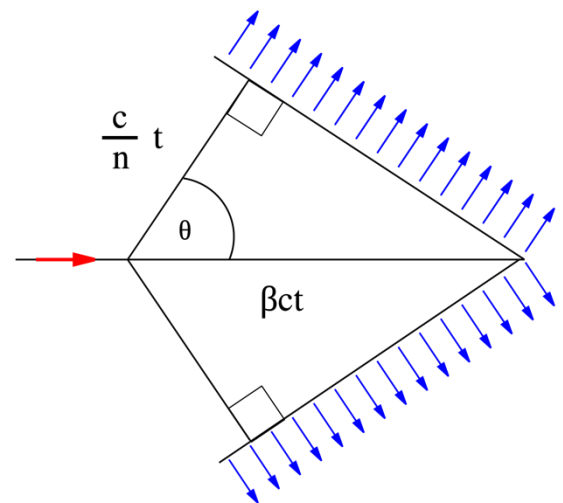


Рисунок 3 – Конус черенковского излучения

Энергия частицы, конвертируемая в черенковское излучение, мала по сравнению с энергией, которую она тратит на ионизацию и возбуждение атомов среды. Число фотонов, излучаемых на 1 см пути, в зависимости от среды

колеблется от нескольких единиц до нескольких сотен. Это излучение можно наблюдать визуально и регистрировать с помощью фотоплёнки, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) или кремниевого фотоумножителя (КЭУ), преобразующего энергию излучения в электрический сигнал. На цветной фотоплёнке, расположенной перпендикулярно направлению движения частицы, излучение, выходящее из радиатора, имеет вид сине-фиолетового кольца.

Большая часть заряженных частиц каскада (в основном, электронов и позитронов), обладает скоростью, превышающей скорость света в атмосфере, и в соответствии с эффектом, открытым И. А. Черенковым и С. И. Вавиловым, вызывает излучение, называемое черенковским светом.

Черенковское излучение ШАЛ является уникальным инструментом изучения ШАЛ. Регистрация полного потока черенковского света позволяет использовать земную атмосферу, как гигантский калориметр для частиц сверхвысоких энергий, а регистрация пространственно-временной структуры вспышки света ШАЛ позволяет судить о продольном развитии электронно-фотонной лавины в атмосфере:

Черенковское излучение является одной из важнейших компонент ШАЛ, но наблюдать его непросто. Атмосфера рассеивает свет звёзд, поэтому ночное небо слабо светится. Интенсивность свечения ночного неба в интервале

длин воли $4300 - 5500 \text{ \AA}$ составляет $6.5 \cdot 10^7 (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер})^{-1}$. Черенковское излучение ШАЛ гораздо слабее, но для регистрации кратковременной вспышки света важно, чтобы она превышала флуктуации свечения ночного неба в регистрируемом диапазоне частот.

Возможность появления вспышек от черенковского света ШАЛ прямо следует из теории эффекта Вавилова-Черенкова. Коэффициент преломления света в воздухе при атмосферном давлении $n = 1.00029$, и при скорости частиц $v = \frac{c}{n}$ должно возникать свечение. При таких условиях угол излучения будет мал ($\theta = 1.3^\circ$), а пороговая энергия велика ($E_{min} = 21 \text{ МэВ}$ для электронов)

1.3 Методы изучения КЛ по характеристикам ШАЛ

1.3.1 Методы, основанные на заряженных частицах ШАЛ

Характеристики вторичных частиц и излучений ШАЛ зависят от следующих параметров – энергии, направления и типа/массы первичной частицы. Для оценки энергии подходят абсолютные размеры компонент – полные числа электронов и позитронов или мюонов на уровне наблюдения. Для исследования ядерного состава ПКЛ может быть использована форма функции пространственного распределения (ФПР) электронов ливня [15].

Максимальное число электронов находится в максимуме ливня, при приближении к Земле их количество уменьшается, причем градиент уменьшения зависит от профиля атмосферы. Детекторы ставят на поверхности Земли, поэтому форма ФПР электронов ливня, как правило, может быть определена со значительной погрешностью, что снижает чувствительность этой величины к ядерному составу ПКЛ. Поэтому для исследования ядерного состава ПКЛ обычно используется комбинация двух величин – измеренного количества электронов N_e и мюонов N_μ в ливне [16]. Тем не менее, этот метод является одним из наиболее часто применяемых для получения информации о массовом числе первичной частицы.

Количество мюонов N_μ в ливне невелико по сравнению с N_e , поэтому величина N_μ трудна для точного измерения. Кроме того, расчетная величина N_μ особенно сильно зависит от модели ядро-ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях [17], что серьезно затрудняет исследование ядерного состава ПКЛ указанным методом. В свою очередь, величина N_e , которая часто используется как мера энергии первичной частицы, также зависит от состава ПКЛ, что приводит к появлению систематической погрешности при измерении первичной массы.

1.3.2 Метод X_{max}

Изучение спектра и химического состава, космических лучей в области колена остаётся одной из интригующих проблем современной физики космических лучей. Несмотря на то, что исследования ведутся на протяжении нескольких десятилетий, данные по химическому составу первичного спектра при энергиях $> 10^{15}$ эВ всё ещё нуждаются в уточнении. Разделение первичного спектра по группам ядер остаётся трудоёмкой задачей, во-первых, из-за неопределённостей, заложенных в адронных моделях, во-вторых, из-за неопределённостей, ассоциированных с решением обратной задачи ШАЛ.

Положение максимума лавины X_{max} связано с природой первичной частицы. Положение максимума ливня, образованного первичным ядром, расположено выше, чем для протона. Это можно установить с помощью расчёта, развития каскада в атмосфере, используя различные модели.

Различие в положении максимума X_{max} для первичного протона и ядра железа, составляет по результатам моделирования $90 - 100 \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$. Предполагая справедливость модели суперпозиции ядро-ядерных столкновений (предполагает независимое взаимодействие нуклонов, входящих в состав ядра), можно аппроксимировать положение максимума для разных ядер с атомным номером A и энергией ядра E следующей приближённой формулой (Гайссер, 1990):

$$X_{max} = (1 - B)t_0 \left(\ln \left(\frac{E}{\varepsilon} \right) - \langle \ln A \rangle \right)$$

1.3.3 Методы, основанные на излучениях ШАЛ

Функция пространственного распределения черенковского света ШАЛ несет информацию о форме каскадной кривой. Используя расчетные ФПР, возможно оценить полный поток черенковского света ШАЛ и энергию первичной частицы, поскольку полный поток черенковского света ШАЛ приблизительно пропорционален энергии первичной частицы. Однако непосредственно измерить полный поток черенковского света наземными установками нельзя: измеряется только плотность потока черенковских фотонов в

детекторах установки, как правило, удаленных друг от друга на довольно большие расстояния (десятки или сотни метров).

Форма ФПР черенковского света ШАЛ может быть восстановлена с меньшей погрешностью, чем форма ФПР электронов ливня, что делает черенковский метод предпочтительным для исследования состава ПКЛ.

Поскольку характер развития каскадных процессов случаен, существуют флуктуации, а также различные систематические неопределенности, возникающие при регистрации ШАЛ (например, неопределенности модели ядерного взаимодействия и модели атмосферы).

Разделение первичных частиц по массам проводится, основываясь на форме поперечного распределения ЧС ШАЛ. Традиционные способы детектирования ЧС на земной поверхности с помощью сетей широко разнесенных детекторов предполагают получение информации не более чем с 1% площади пятна ЧС. Детектирование же отраженного от снега ЧС позволяет обзирать 30 – 50% площади пятна. Именно этот метод использован в экспериментах СФЕРА [18].

Заряженные частицы ШАЛ при прохождении атмосферы возбуждают молекулы азота. Снимая это возбуждение, молекулы азота изотропно излучают флуоресцентный свет, регистрируемый в современных установках (Auger [19], TA [4], HiRes [2]) с помощью телескопов. Ими регистрируется каскадная кривая ливня. Восстановление энергии и типа первичной частицы по данным флуоресцентных телескопов проводится по форме каскадной кривой и глубине максимума каскада X_{\max} .

Свидетельство чувствительности радиосигнала к ядерному составу ПКЛ получены не так давно [20]. Методика наблюдения и анализа радиосигнала ШАЛ в настоящее время развивается [21]. Порог для уверенного наблюдения радиосигнала от ШАЛ довольно высок: так, в работе [22] рассматриваются характеристики событий с энергиями выше $5 \cdot 10^{16}$ эВ, поэтому радиометод, будучи сравнительно дешевым, наиболее перспективен в области предельно

1.4 Детекторы ШАЛ

1.4.1 Проект KASCADE

Важнейшим проектом по изучению ШАЛ является проект KASCADE. Первым экспериментом проекта стал массив детекторов KASCADE, запущенный в 1996 г. Он состоял из 252 сцинтилляционных детекторных станций. Детекторная система была организована в виде 16 кластеров, центры которых отстояли друг друга на 13 м, кластеры имели компоновку 4×4 станции. Охватываемая массивом площадь была равна $200 \times 200 \text{ м}^2$ [23].

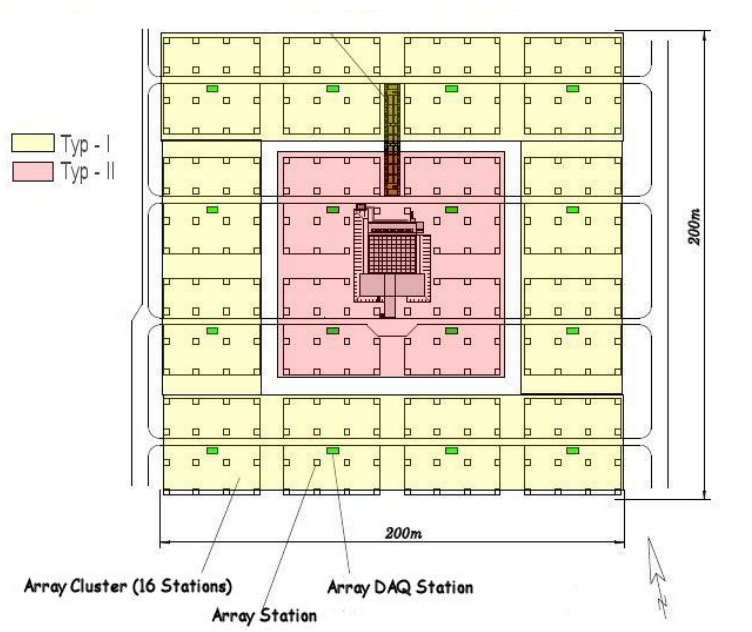


Рисунок 4 – Схематичное представление массива KASCADE
(*Haungs A., Kang D., Schoo S. et al., 2018*).

На рис. 4 видно, что в массиве используются детекторы двух видов – внутренние кластеры (Тип 2) содержат неэкранированные сцинтилляционные детекторы для регистрации электронно-фотонной составляющей. Внешние кластеры (Тип 1) помимо сцинтилляционного детектора имеют железные и свинцовые поглощающие листы между слоями сцинтиллятора для измерения

только мюонной компоненты. Таким образом детектор мог измерять мюонную и электромагнитную компоненты одновременно и независимо.

Детекторная система KASCADE использовалась для изучения ШАЛ, образованных от первичной частицы с энергией в диапазоне $10^{14} - 10^{17}$ эВ. Для расширения изучаемого диапазона энергий, было произведено расширение детекторной системы, которое получило название KASCADE-Grande.

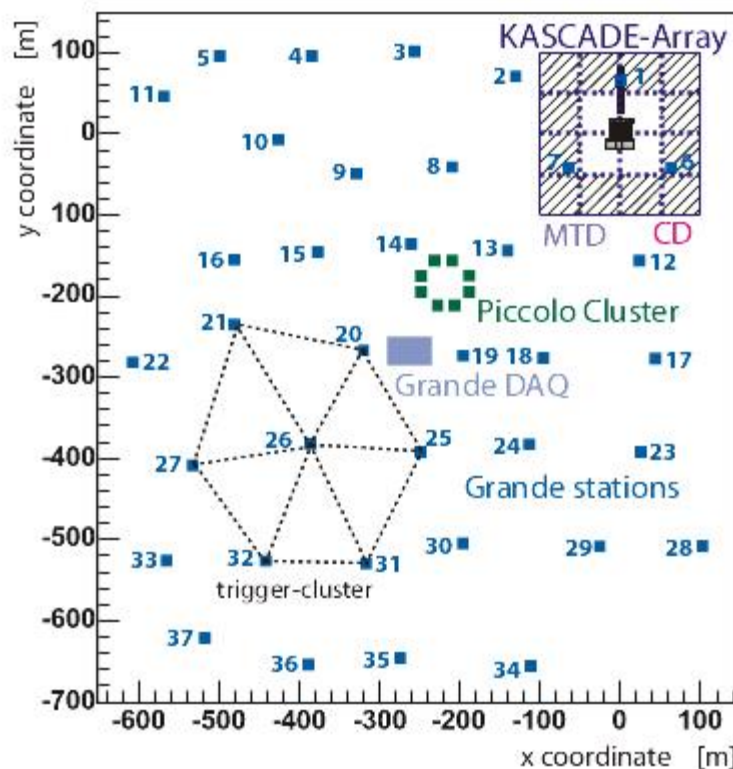


Рисунок 5 — Схема эксперимента KASCADE-Grande.
(Haungs A., Kang D., Schoo S. et al., 2018)

Массив KASCADE-Grande позволил получать информацию о событиях с энергией первичной частицы в диапазоне $10^{14} - 10^{18}$ эВ. Это было достигнуто путем увеличения площади, охватываемой сеткой детекторов KASCADE, с $200 \times 200 \text{ м}^2$ до $700 \times 700 \text{ м}^2$ с помощью 37 сцинтилляционных детекторных станций с активной площадью 10 м^2 [24] каждая.

Массив Grande состоит из 37 детекторных станций, установленных над нерегулярной треугольной сеткой со средним расстоянием 137 м, таким

образом, покрывая площадь около $0,5 \text{ м}^2$. Каждая детекторная станция включает в себя в общей сложности 10 м^2 пластиковых сцинтилляторов, разделенных на 16 отдельных модулей, каждый из которых просматривается снизу Фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) для измерения времени прихода и плотности частиц (ФЭУ с высоким коэффициентом усиления), центральные модули также оборудованы дополнительными ФЭУ с более низким значением напряжения (ФЭУ с низким коэффициентом усиления).

1.4.2 Проект TAIGA

Эксперимент TAIGA регистрирует ШАЛ, образованные первичной частицей с энергией в диапазоне $10^{14} - 10^{18} \text{ эВ}$ [25], который соответствует диапазону энергий эксперимента KASCADE-Grande. Схема установок проекта TAIGA представлена ниже.

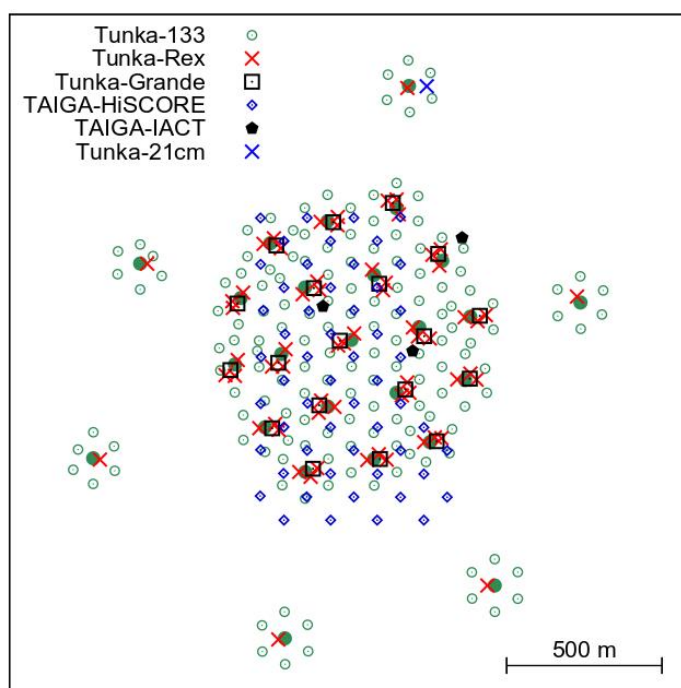


Рисунок 6 – Расположение установок проекта TAIGA. (TAIGA Detector / Taiga, 2022)

Tunka-133 – первая установка эксперимента TAIGA. Она состоит из 133 основных ФЭУ, расположенных на площади 1 км^2 и 42 дополнительных,

находящихся на расстоянии 1 км от центра установки. ФЭУ измеряют ЧС от ШАЛ во время ясных и безлунных ночей. Установкой был промерен энергетический спектр КЛ в диапазоне от 10^{16} эВ до 10^{18} эВ [26].

Tunka-Rex [27] – вторая установка эксперимента TAIGA. Она состоит из 63 антенн, расположение которых соответствует кластерной системе установки Tunka-133. Антенны используются для регистрации радиоизлучения от ШАЛ, генерируемого в процессе развития каскада.

Tunka-Grande [27] – третья установка эксперимента TAIGA. Она состоит из 380 сцинтилляционных счетчиков с площадью $0,64 \text{ м}^2$ каждый. Счетчики размещены в 19 станциях. Станции имеют наземную, в которой расположены по 12 счетчиков, и подземную части, в которой расположено 8 счетчиков. Общая площадь установки составляет около $0,8 \text{ км}^2$. Эти станции регистрируют мюонную и электромагнитную компоненты ШАЛ на уровне земли.

TAIGA-HiSCORE [27] – четвертая установка эксперимента TAIGA. Она использует принцип, аналогичный установке Tunka-133. В отличие от своего предшественника Tunka-HiSCORE использует более чувствительные модули с более низким порогом регистрации. Насчитывает около 120 станций, находящихся на расстоянии 150 – 200 м друг от друга, покрывая площадь порядка $\sim 1 \text{ км}^2$.

TAIGA-IACT [27] – пятая установка эксперимента TAIGA. Она будет состоять из 16 телескопов ЧС, которые имеют отражательную поверхность занимающую площадь в 10 м^2 и оборудованы камерой из 560 фотоумножителей. Пиксель имеет обзор порядка $0,36^\circ$. Поле зрения телескопа будет порядка $8^\circ \times 8^\circ$. Установки расположены в среднем на расстоянии 300 – 600 метров.

1.5 Проект СФЕРА

В случае оценки параметров первичной частицы по излучению Вавилова-Черенкова, также называемого черенковским светом ШАЛ,

калориметром служит вся толщина атмосферы. От частицы на высоте 20 км образуется 10 фотонов на м, а на высоте 1 км – 20. Но в силу колоссального количества частиц в каскаде, суммарная интенсивность оказывается достаточно высокой.

Черенковский свет ШАЛ генерируется релятивистскими заряженными частицами, преимущественно электронами, идущими в окрестности оси ливня. Они излучают черенковские фотоны под достаточно малым ($< 1.5^\circ$) черенковским углом к направлению своего движения. Поэтому основная часть черенковского света концентрируется вблизи оси. В зависимости от первичной энергии пятно черенковского света может иметь диаметр 500 – 2000 м.

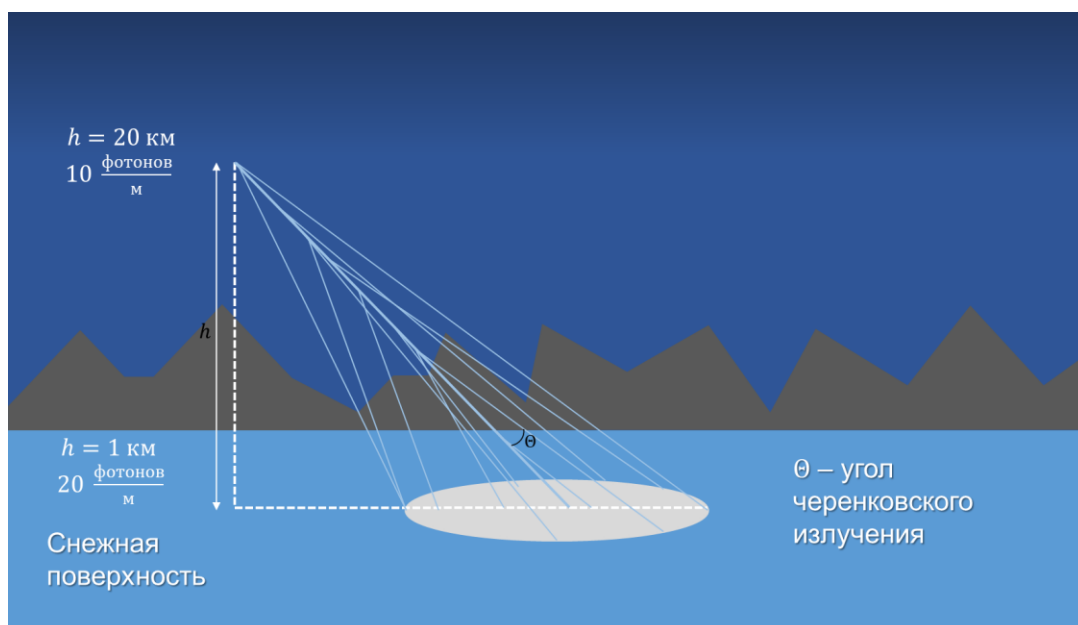


Рисунок 7 – Пятно черенковского света ШАЛ.

1.5.1 Идея метода

Метод регистрации отраженного от снежной поверхности черенковского света ШАЛ, генерируемого лучами сверхвысоких энергий, был впервые предложен А.Е. Чудаковым [9]. Предлагалось установить на борту самолета два фотоумножителя и два электронно-оптических преобразователя (ЭОП) с одинаковыми углами зрения $\pm 45^\circ$. Все четыре прибора должны были

обозревать заснеженную поверхность Земли с высоты порядка 10 км. Одновременное срабатывание двух амплитудных дискриминаторов ФЭУ полагалось триггерным условием срабатывания затворов фотоаппаратов, установленных на ЭОП. Последующая обработка изображений пятен излучения Вавилова-Черенкова от ШАЛ на снимках должна была дать информацию об энергии и направлении прихода первичной космической частицы.

1.5.2 Прототип установки СФЕРА

В начале 1990-х гг. в горах Тянь-Шаня были проведены первые измерения энергетического спектра ПКЛ методом регистрации черенковского света, отраженного от снежной поверхности Земли. Со склона горы установка обозревала заснеженную поверхность замерзшего Большого Алматинского озера.

В результате проведенных измерений с прототипом установки СФЕРА впервые в мире методом регистрации отраженного от снежной поверхности черенковского света был получен энергетический спектр ПКЛ (рис. 8). Сложная геометрия эксперимента привела к увеличению порога регистрации телескопа, что сказалось на измеренном спектре.

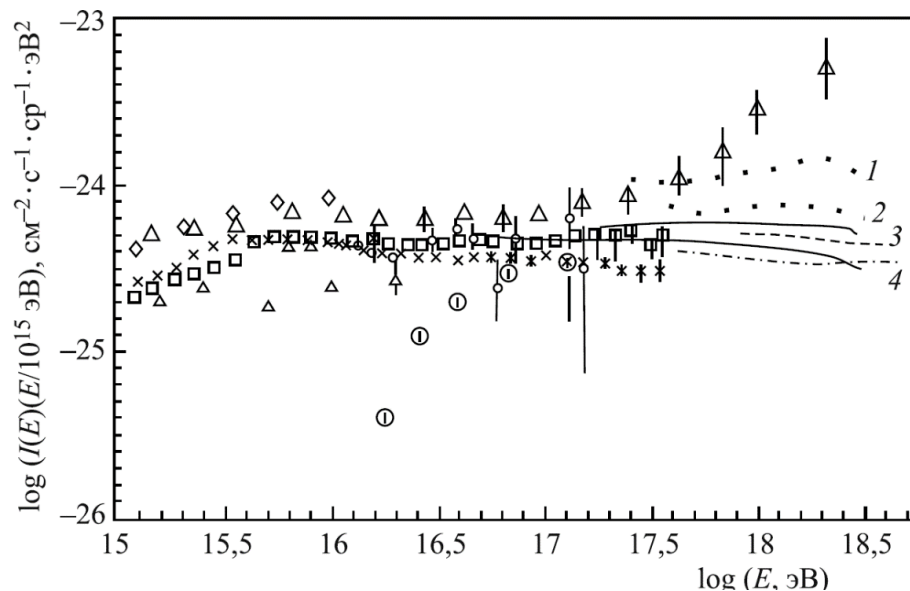


Рисунок 8 – Дифференциальный энергетический спектр по данным прототипа установки СФЕРА (1996 г.): × МГУ; □ Акено; ◇ Тянь-Шань; △ Самарканд; ○ Якутск; ○ СФЕРА. [28]

1.5.3 Установка СФЕРА-1

В конце 1990-х гг. была создана аэростатная установка СФЕРА-1. Аппаратура поднималась на привязном аэростате на высоту до 1000 м.

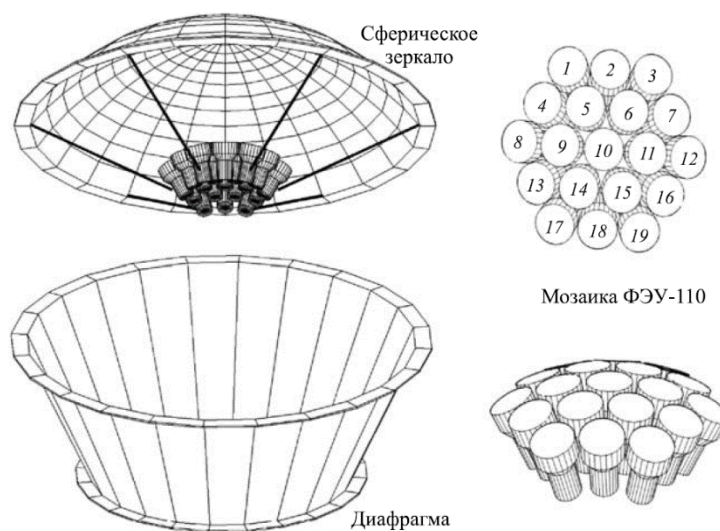


Рисунок 9 – Схема оптической системы установки СФЕРА-1. [28]

На рис. 9 представлена оптическая часть установки, состоявшая из сферического зеркала диаметром 1,2 м, в фокальной поверхности которого размещена мозаика из 19 фотоумножителей (ФЭУ), и корректирующей диафрагмы диаметром 0,8 м. При высоте подъема 1 км каждый из ФЭУ осматривал площадь диаметром около 200 м. При выполнении триггерного условия регистрировался заряд анодных импульсов за интервал времени 2,0 мкс в каждом фотоумножителе, а также времена начала и окончания импульса с дискретностью 30 нс. Управление работой электроники осуществлялось бортовым компьютером в автоматическом режиме.

В 2000 г. в течение 10-часового полета установки СФЕРА-1 на привязном аэростате на высоте 900 м было зарегистрировано около 400 событий, вызванных ЧС ШАЛ. Обработка экспериментальных данных позволила впервые получить изображения вспышек черенковского света от ШАЛ на снежном

«экране». По полученным данным был построен спектр ПКЛ (рис. 10) в области $10^{16} - 10^{17}$ эВ [28].

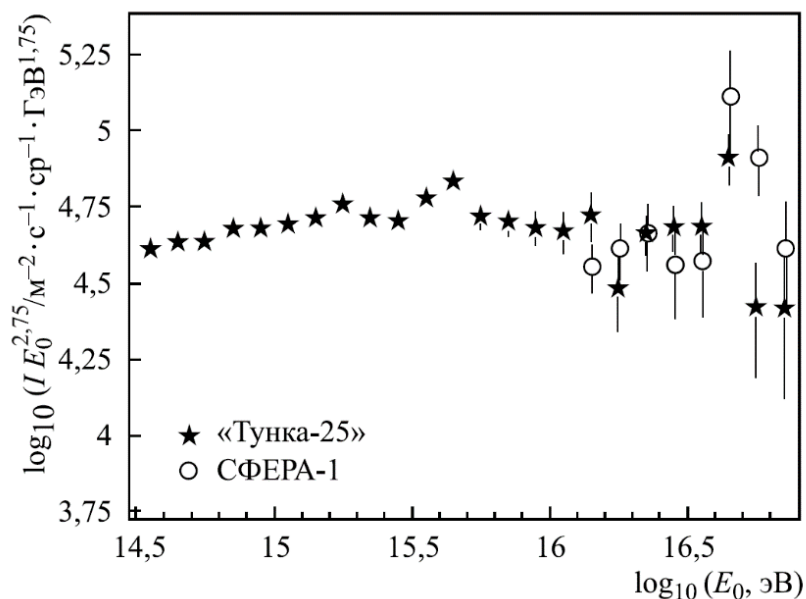


Рисунок 10 – Энергетический спектр ПКЛ установки СФЕРА-1 по данным на 2001 г. [28]

Время измерений составило 457 минут. Подавляющая часть событий была обусловлена флуктуациями светового фона звездного неба, величина которых составляла около 100 фотоэлектронов на детектор за 2 мкс. Анализ полученных данных показал, что события, вызванные как звездным небом, так и техногенными причинами, практически не содержат импульс длительностью более 30 нс, что позволяет хорошо отсеивать такие события.

1.5.4 Установка СФЕРА-2

Дальнейший прогресс в развитии данного метода связан с модернизацией установки и проведением регулярных подъемов установки в климатически более благоприятном районе.

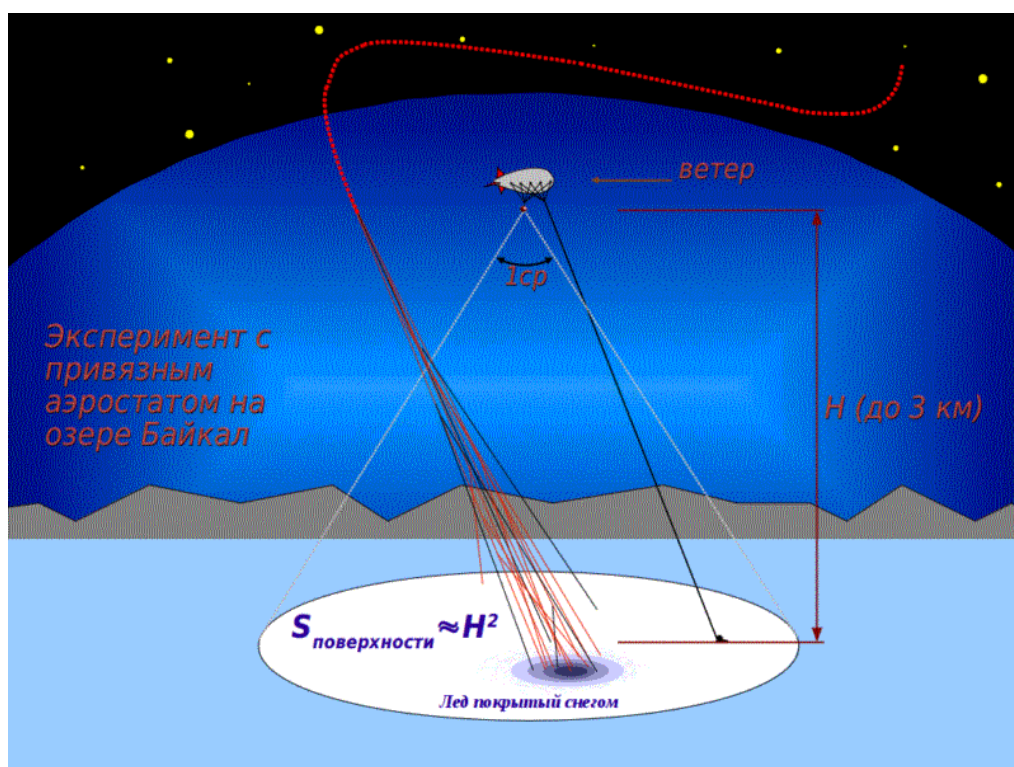


Рисунок 11 – Схема эксперимента с установкой СФЕРА-2.
[29]

Установка СФЕРА предназначена для подъема в темное время суток на привязном аэростате на высоту до 1 км. Установка регистрирует динамику световых пятен, образуемых ЧС ШАЛ на покрытой снегом поверхности Земли. Старты аэростата проводились с площадки на льду озера Байкал. В месте проведения измерений были изучены оптические свойства снега. Абсолютный коэффициент отражения рассеянного солнечного света от снега принимал значения от 0,82 до 0,85.

На основе опыта эксплуатации установки СФЕРА-1 было принято решение увеличить светосилу, пространственное и временное разрешение новой установки СФЕРА-2 по сравнению с прототипами. Увеличение числа ФЭУ в мозаике светоприемника и регистрация формы импульсов в каждом канале позволяет понизить величину энергетического порога, увеличить точность определения направления прихода ливня и изучать ФПР ЧС ШАЛ в широком диапазоне расстояний от оси.

Аэростатная установка СФЕРА-2 (рис. 12) [29] состоит из семисегментного сферического зеркала диаметром 1,5 м и радиусом кривизны 0,94 м, в фокусе которого установлена мозаика из 109 ФЭУ. Для лучшего пространственного разрешения перед зеркалом установлена диафрагма диаметром 0,93 м. Угол зрения оптической системы установки составляет 52° . С высоты 1 км каждый ФЭУ осматривает область диаметром 50 м на заснеженной поверхности. Триггерная плата способна отбирать события, в которых в течение 1 мкс срабатывают дискриминаторы ФЭУ, находящихся рядом друг с другом. Установка работала в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ.

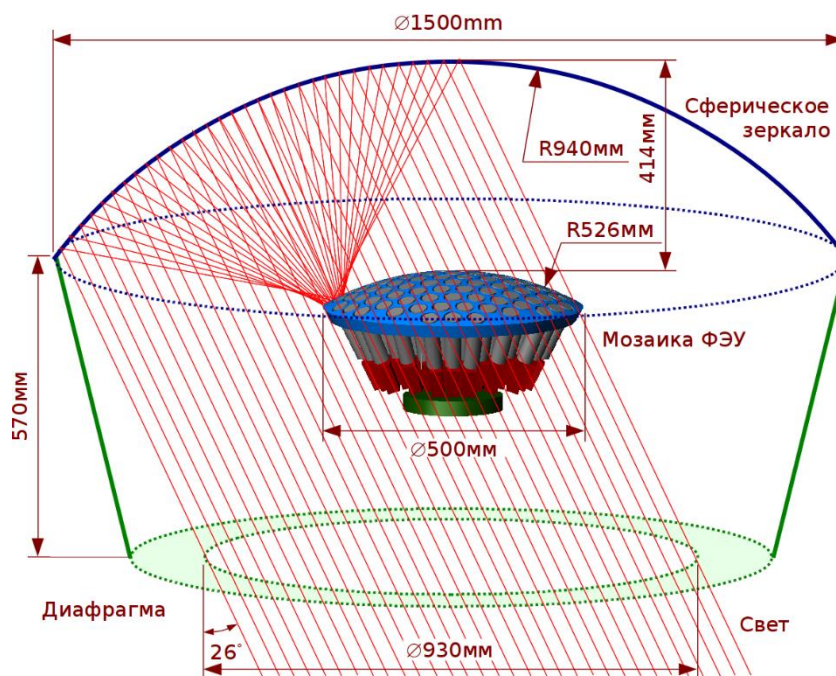


Рисунок 12 – Схема оптической системы установки СФЕРА-2. [29]

Оценка энергии события производилась путем нормировки экспериментальной ФПР на модельную ФПР с известной энергией. Был получен дифференциальный энергетический спектр частиц в излучаемом диапазоне энергий [30], совпадающий в пределах погрешностей с результатами работы других установок (рис. 13).

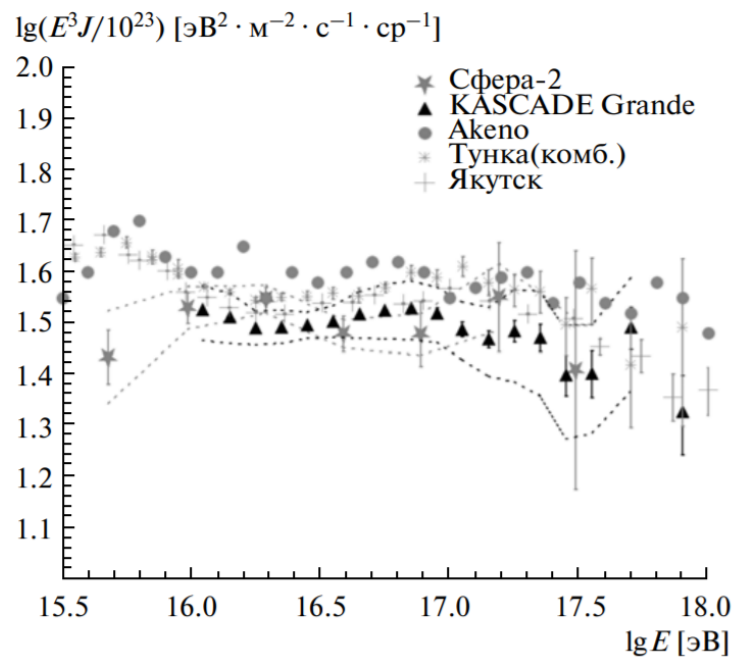


Рисунок 13 – Дифференциальный энергетический спектр на 2011–2013 гг. [31]

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

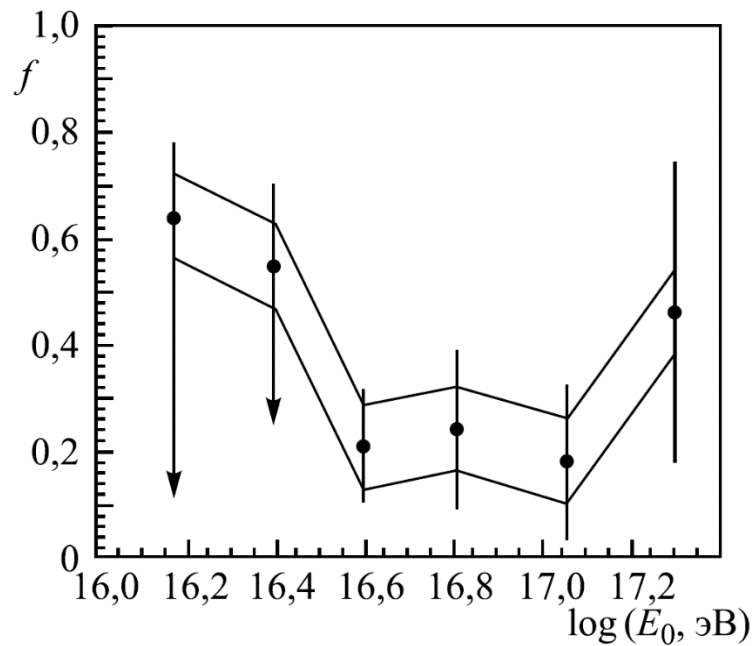


Рисунок 14 – Зависимость доли легких ядер от логарифма энергии первичной частицы в эксперименте СФЕРА-2 на 2012 г. [31]

1.5.5 Установка СФЕРА-3

Экспериментальные данные, полученные в ходе работы проекта, показали, что методика изучения ПКЛ, предложенная А.Е. Чудаковым, в реализации детекторов СФЕРА способна дать сравнимый с большими наземными установками результат. Новым витком в развитии проекта СФЕРА должен стать новый детектор СФЕРА-3, разработка которого активно происходит в настоящий момент.

Новый детектор получит увеличенное сферическое зеркало, предполагается использовать зеркало с диаметром порядка 2,2 м. На смену ФЭУ придут кремниевые фотоумножители (КФУ), соединенные в сегменты по 7 элементов. Ожидается, что количество сегментов мозаики будет порядка 380, т. е. порядка 2700 КФУ в мозаике. Таким образом, по сравнению с детекторной системой СФЕРА-2, возрастет как количество каналов, так и точность регистрации. Планируется установка детектора на промышленный беспилотный летательный аппарат (БПЛА) с максимальной высотой полета порядка 2 км, что даст возможность набирать большую статистику событий для снижения порога энергетического разрешения установки. В отличие от аэростата, использование БПЛА даст возможность динамично менять высоту полета детектора, что позволит проводить дополнительные калибровки экспериментальных данных.

Ожидается, что с помощью нового прибора можно будет получать новые научные знания о химическом составе ПКЛ в области энергий 1 – 1000 ПэВ методом регистрации отраженного ЧС ШАЛ. При успешной реализации проекта будут получены экспериментальные данные для восстановления парциальных спектров для нескольких групп ПКЛ (протоны, группы CNO и Fe) в области энергий 1 – 1000 ПэВ на основе обработки индивидуальных событий ШАЛ. Данные о составе ПКЛ в указанном диапазоне энергий будут иметь определяющее значение для выбора механизма ускорения галактических лучей и модели перехода от галактических КЛ к экстрагалактическим, что

крайне важно для построения глобальной теории ускорения и распространения КЛ во Вселенной.

2. Моделирование и обработка событий ШАЛ в детекторе СФЕРА-3

2.1 Моделирование событий ШАЛ в детекторе СФЕРА-3

Создание программного комплекса подразумевает не только разработку отдельных приложений для решения конкретных задач, но и объединение их в общую структуру. Основные этапы конвейера вычислений для модели телескопа СФЕРА-3 представлены на схеме.

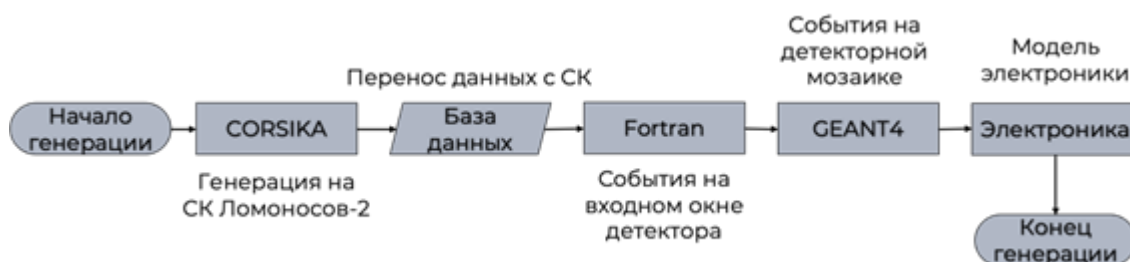


Рисунок 15 – Схема конвейера вычислений для телескопа СФЕРА-3

Каждый шаг данной схемы представляет собой отдельное приложение, которое было доработано или разработано с нуля в рамках данной работы. Также важно отметить, что ещё одно приложение объединяет все эти отдельные приложения в общий комплекс.

2.1.1 Генерация событий ШАЛ

Традиционно телескопы СФЕРА регистрировали черенковский свет ШАЛ, отраженный от снежной поверхности. Оценка первичных параметров ливней производилась по пространственно-временному распределению света на мозаике телескопа. На части событий телескопа СФЕРА-2 отчетливо виден сигнал [32], опережающий отраженный от снега свет на характерное время

распространения фотонов от уровня наблюдения до снега и обратно. Сигнал был однозначно интерпретирован как прямой черенковский свет, попавший на мозаику через технологические отверстия в зеркале. Так возникла идея регистрации прямого черенковского света наряду с отраженным.

При конструировании телескопа СФЕРА-3 планируется рассмотреть несколько вариантов мозаики SiPM, корректирующей линзы, зеркала и, возможно, объектива и светочувствительной матрицы для черенковского света. Поэтому для каждого моделируемого события ШАЛ необходимо сохранить:

- Пространственно-временное распределение черенковского света на уровне снежной поверхности для дальнейшего моделирования образа отраженного света;
- Распределение фотонов по поперечному пространству, углам и временам прихода на нескольких потенциальных уровнях наблюдения над снегом для последующей генерации образов прямого черенковского света.

Код CORIKA [33] позволяет сразу учесть спектральную чувствительность используемых фотосенсоров и поглощения света в атмосфере, что дает возможность для оптимизации расчетов, таким образом прослеживаются только те фотоны, которые имеют вероятность 1 быть зарегистрированными при попадании на детектирующий элемент.

Мы не используем стандартные выводные файлы CORSIKA для частиц и черенковского света в силу их избыточной детальности, приводящей к большому размеру выводных файлов.

Вместо этого мы сохраняем распределения в виде многомерных массивов, адекватных по подробности и объему. Пространственно-временное распределение света на снегу сохраняется в виде квадратного ковра 3.2 км x 3.2 км в массиве 1280x1280, где каждая ячейка соответствует квадрату 2.5 м x 2.5 м. Импульс света в каждом квадрате сохраняется в массив из 100 ячеек размером 5 нс. Прямой же свет сохраняется на уровнях 0.5, 1.0 и 2.0 км над снегом в три массива размером 40x40x50x50x30. Первые две размерности

соответствуют пространственным координатам (400м x 400м), вторые две – угловым (50о x 50о), последняя – временной задержке (60 нс).

Набор параметров, задаваемых коду при моделировании, включает первичную энергию, зенитный и азимутальный углы и тип первичной частицы, а также модель атмосферы и модель ядерного взаимодействия при сверхвысоких энергиях (модель ШАЛ). Мы используем набор фиксированных первичных энергий 1, 3, 10, 30 и 100 ПэВ и набор фиксированных зенитных углов 5, 10, 15, 20 и 25о, а азимутальные углы разыгрываются равномерно в диапазоне 0-360о. Базовый набор первичных ядер: H, He, N, S, Fe. Используются несколько моделей атмосферы из набора CORSIKA и модели ШАЛ QGSJET01 [34] и QGSJETII-04 [35]. Набор параметров при необходимости будет изменен и дополнен в процессе работы.

Базовый объем выборки искусственных событий ШАЛ составляет 100, что вполне достаточно для выявления основных флуктуаций продольного развития ливней. Поскольку сохраняются практически полные распределения по поперечному пространству и задержкам, на основе этих выборок затем генерируются значительно более объемные выборки черенковских образов.

2.1.2 Расшифровка и клонирование событий

Необходимость этого шага диктуется двумя фактами:

- Данные, полученные в результате выполнения CORSIKA, имеют бинарную кодировку;
- Без потери мощности и значимости в условиях постановки эксперимента существует возможность значительно увеличить выборку.

Обе этих проблемы решаются с помощью вспомогательного приложения на Fortran.

Так как генерация событий в программном пакете CORSIKA требует огромных вычислительных мощностей и впоследствии больших временных затрат, возникает вопрос, существует ли более эффективный способ увеличить

исходную статистику событий. Такой способ есть, и он не приводит к потере физического смысла. Одно и то же событие будет по разному зарегистрировано телескопом в зависимости от взаимного расположения оси детектора и оси ливня, этот факт позволяет нам законно клонировать получаемые из CORSIKA события с помощью параллельного переноса оси ливня относительно оси телескопа. Благодаря этому процессу мы можем получать из каждого первичного события 100 событий клонов.

Физический же смысл этого шага заключается в пересчете образа на снегу в образ на входном окне телескопа.

2.1.3 Получение образов на мозаике детектора СФЕРА-3

Для определения оптимальных параметров будущего детектора необходимо создать модель, с помощью которой можно будет получить информацию об эффективности прибора.

Схема детектора СФЕРА-3, на основе которой будет произведено моделирование представлена на рис. 16. Основными элементами являются сферическое зеркало, входное окно и мозаика детектора. Лучи ЧС, проходя через входное окно детектора, отражаются от зеркала и концентрируются на элементах мозаики.

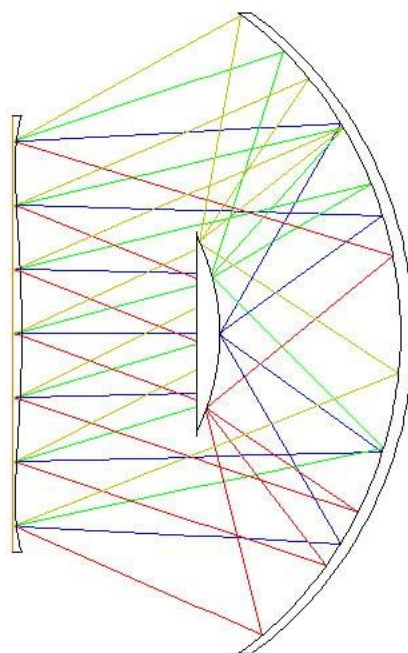


Рисунок 16 – Оптическая модель детектора СФЕРА-3

Процесс моделирования можно разделить на два этапа: получение геометрической модели детектора и построение хода лучей ЧС.

2.1.3.1 Геометрическая модель детектора

Важнейшей частью детекторов СФЕРА является мозаика, так как именно ее элементы отвечают за регистрацию черенковского света. Новый детектор проекта получит современную детекторную базу, на смену ФЭУ придут кремниевые фотоумножители. В эксперименте планируется использовать SiPM MicroFC-SMA-60035 размером 6×6 мм. 7 таких элементов будут объединяться в общий сегмент. Каждый сегмент планируется размещать на отдельной печатной плате, пример использования данной модели SiPM можно увидеть на рис. 17. В нашем случае ячейки будут представлять собой правильные шестиугольники. Для улучшения качества регистрации на каждый пиксель будет установлен сферический светосборник, представляющие собой полусферу, усеченную шестиугольной призмой (рис. 19).

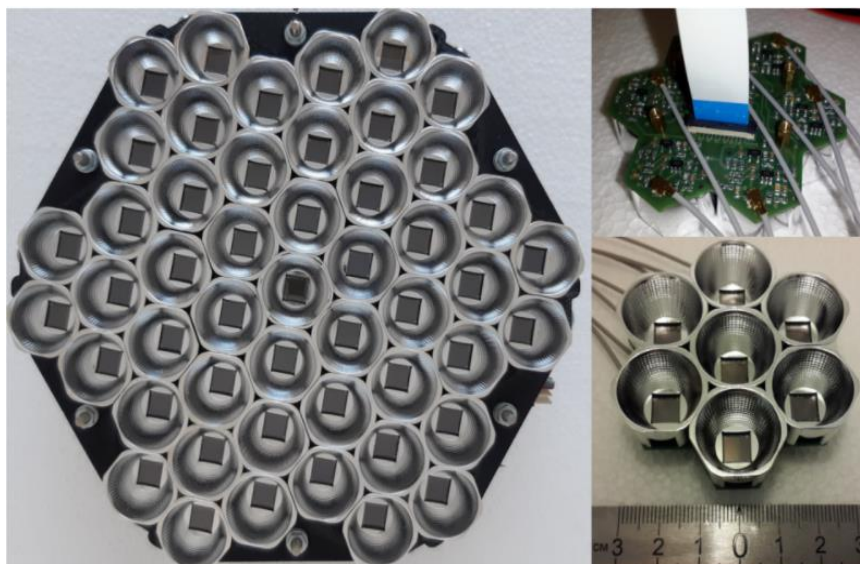


Рисунок 17 – Прототип матрицы из 49 SiPM собранной из семи электронных плат с 7 SiPM с предусилителями.

Для моделирования телескопа и получения образов на мозаике детектора используется программный пакет GEANT4 [36].

Вид мозаики телескопа СФЕРА-3 представлен на рис. 18. На данный момент планируется использовать 2653 КЭУ, которые будут объединены в иерархию сегментов по 7 элементов, таким образом получится 379 сегментов.

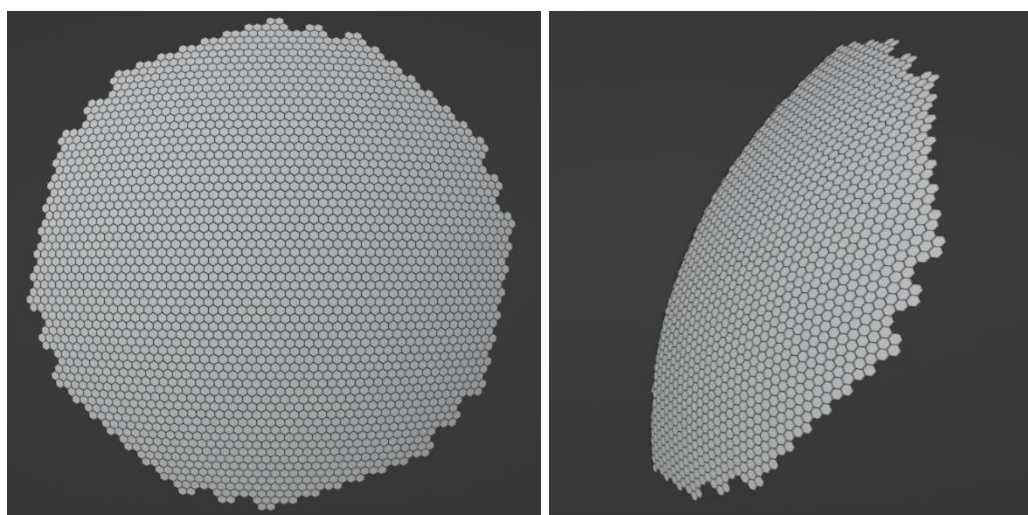


Рисунок 18 – Проекция мозаики детектора

Модель геометрии необходима для расчета оптического хода лучей и получения распределения фотонов на мозаике. Элементом мозаики в нашем случае выступает светосборник и КЭУ, находящийся под ним. Регистрация частицы происходит именно на пластинке SiPM, что позволяет моделировать физически достоверные образы.



Рисунок 19 – Светосборник и КЭУ SiPM

На рис. 20 представлен основной вариант геометрии телескопа. Видны входное окно с асферической линзой корректором на входе, подложка мозаики с нанесенной на нее мозаикой и асферическое зеркало.

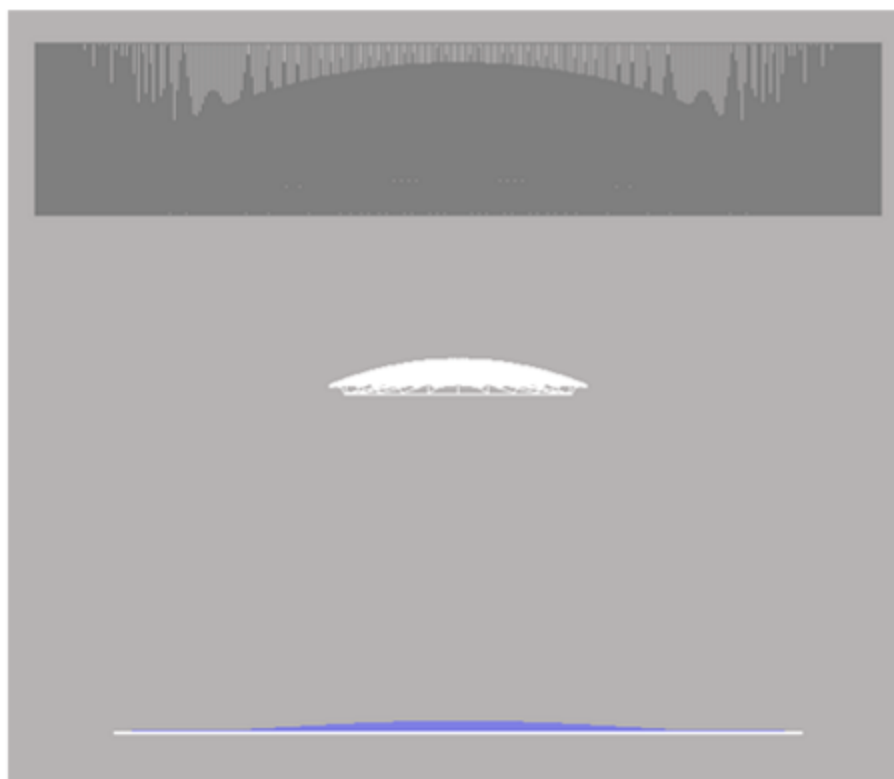


Рисунок 20 – Визуализация геометрии детектора СФЕРА-3 в GEANT4

Качество сбора образа на детекторной мозаике было проверено с помощью моделирования тестовой выборки фотонов и сверки с оптической моделью детектора. После успешной проверки данная модель используется для набора статистики образов телескопа СФЕРА-3.

Уже на этом этапе мы получаем данные с образами событий на мозаике, которые можно использовать для получения характеристик ливня.

Для энергии 10 ПэВ дискретизация на отдельные пиксели является слишком подробной, поэтому в случае аппроксимации таких событий логичнее использовать менее подробную сетку на сегментах. Пример чистого события на мозаике представлен на рис. 21.

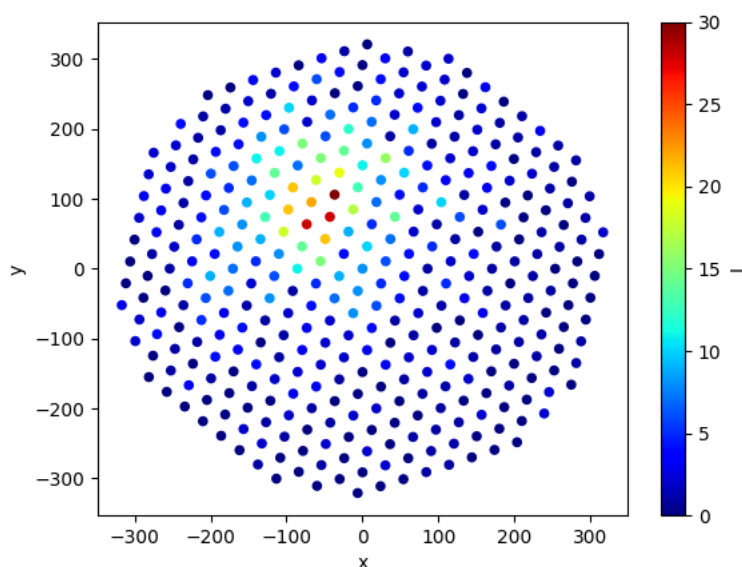


Рисунок 21 – Смоделированный образ черенковского света на мозаике детектора СФЕРА-3

2.1.4 Моделирование отклика электроники

На данном этапе производится моделирование отклика электроники при регистрации на детекторной мозаике черенковского света. Данное приложение является идейным продолжением существующего приложения для обработки экспериментальных событий на телескопе СФЕРА-2.

Приложение написано на C++ и поддерживает многопоточную работу для оптимального времени моделирования.

На вход подается файл, содержащий всю информацию об образе на детекторной мозаике, но мы используем только порядковый номер пикселя (PM_{Tid}), в котором произошла регистрация и абсолютное время регистрации (T_{Phid}). После того, как файл прочитан и известно полное число зарегистрированных фотоэлектронов, необходимо сгенерировать чистое событие:

1. Сперва оценивается общее число фотоэлектронов, которые были зарегистрированы. После этого определяется время начала импульса $T_{st} = \min(T_{Phid})$ и происходит нормировка времени регистрации всех фотоэлектронов с учетом времени начала импульса $t_{Phid} = T_{Phid} - T_{st} + C$, где C – коэффициент, который подобран таким образом, чтобы итоговое событие находилось примерно в центре кадра.
2. Для каждого фотоэлектрона выбирается случайная амплитуда усиления в SiPM $A_{Phid} = rand$.
3. Используя данные о форме импульса в SiPM $pulse(t)$ в соответствии с номером пикселя, в котором произошла регистрация, и времени импульса заполняется массив с событием

$$data_{PM_{Tid}}^{Phid}(t + t_{Phid}) = A_{Phid} * pulse(t)$$

После получения чистого события можно приступить к добавлению фонового сигнала. Для расчета фона используется генератор случайных пуассоновых чисел, параметры которого выбираются из массива относительных токов по числу каналов оцифровки.

1. С учетом заданного среднего и относительного токов в канале производится расчет среднего ожидаемого числа фотоэлектронов в канале.

2. На основании этого числа происходит расчет числа фоновых фотоэлектронов через генератор случайных пуассоновых чисел для каждого канала.
3. Для каждого фонового фотоэлектрона в канале рассчитывается случайная амплитуда усиления и случайное время регистрации в пределах полного времени кадра.
4. После этого происходит добавление фоновых импульсов на изображение.

Также в приложении происходит имитация фильтра постоянной компоненты через вычитание поканального среднего значения интенсивности и имитация оцифровки с учетом наведенного шума и временного сдвига.

Полученные в результате этого шага отклики электроники могут быть использованы при разработке триггера. Примеры смоделированных откликов можно увидеть ниже:

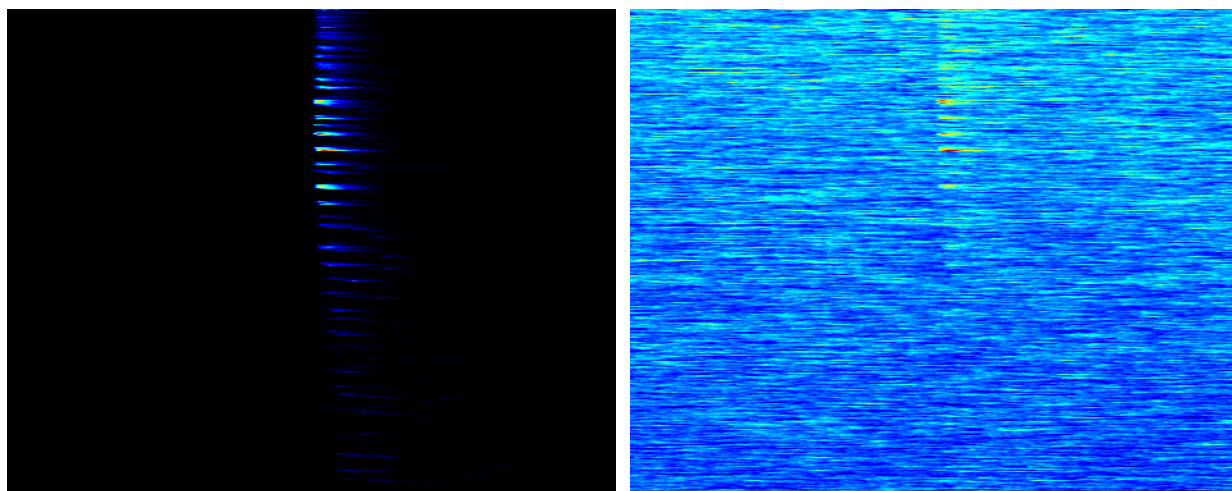


Рисунок 22 – Смоделированные отклики электроники для СФЕРА-3.
Слева - чистое событие, справа - событие с фоном.
Ох: время кадра, Оу: канал регистрации.
Цветом показана интенсивность фотоэлектронов.

2.1.5 Скрипт множественной генерации

Для связи всех приложений в одно было разработано приложение на языке программирования Python. Основная идея заключается в унификации вводных параметров и автоматизация работы с файлами:

- Приложение само исправляет вводные параметры для отдельных шагов на основе первичных параметров:
 - Количество файлов CORSIKA;
 - Первичная частица;
 - Энергия;
 - Модель атмосферы;
 - Модель взаимодействия.
- Приложение само взаимодействует с существующей базой данных и сохраняет полученные файлы в соответствии с принятой логикой хранения

Автоматизация рутинных задач и объединение приложений в общий комплекс позволит значительно упростить процесс, исключить из ошибок человеческий фактор, а также увеличит общую скорость генерации.

2.2 Оценка способности различать массы первичных ядер

Для оценки качества геометрии детектора требуется обработка получаемых событий и создание критериев, по которым можно выделить определённую геометрию на фоне других. Основной задачей детектора СФЕРА-3 является уточнение массового спектра ПКИ, исходя из этой задачи критерий оценки должен быть основан на качестве определения массы ПКИ по образу на мозаике детектора.

На данный момент разработан метод для восстановления массового состава космических лучей энергий 1-100 ПэВ для детекторов типа СФЕРА [15]. Существует программная реализация данного метода для детектора СФЕРА-2. В данной работе, на основе существующего метода планируется создание приложения для детектора СФЕРА-3. Таким образом, остается задача разработки критериев для оценки способности восстановления массового спектра для различных версий геометрии телескопа.

2.2.1 Аппроксимация ФПР

Детектор СФЕРА-3, как уже было сказано выше, состоит из 2653 КЭУ, которые обзоревают определенные области на снегу. В результате моделирования рассчитывается функция пространственного распределения ШАЛ, которая представляет собой количество фотонов, попавших в определенные КЭУ.

Критерий применяется к функции пространственного распределения в мозаике телескопа. Поскольку критерий является интегральным, необходимо аппроксимировать ФПР черенковского света ШАЛ. Чтобы с высокой точностью описывать события в телескопе СФЕРА была найдена лучшая аппроксимация, которая с высокой точностью описывает особенности ФПР на снегу.

ФПР от ливней с малым зенитным углом (до 20 градусов) можно считать осесимметричным. Относительное отклонение интенсивностей на разных азимутах от среднего значения интенсивности $I(R)$ для различных индивидуальных ФПР до 20 градусов зенитного угла в среднем порядка 5%. При том, что интегрирование дополнительно уменьшает расхождения в интегралах колец. Поэтому можно произвести усреднение по азимуту. Усреднением числа фотонов в ячейках, находящихся на одинаковом расстоянии от оси ливня, получается одномерная ФПР, с помощью которой будет проводиться весь дальнейший анализ образов.

На данный момент аппроксимирующая функция выглядит следующим образом:

$$\frac{p_0^2}{(1 + p_1 r + p_2 r^2 + p_3 r^{1.5})^2 (1 + p_4 r^s)}$$

Где p_0, p_1, p_2, p_3, p_4 и s – свободные параметры, которые находятся в результате минимизации с использованием пакета MINUIT [37] следующего функционала:

$$FCN = \sqrt{\frac{\sum_R \left(\left(I - \frac{p_0^2}{(1 + p_1 r + p_2 r^2 + p_3 r^{1.5})^2 (1 + p_4 r^s)} \right)^2 \right)}{N_{pix}}}$$

При варьировании ограничения поставлены только на следующие параметры: $p_0 \in [0, 1000]$, $p_1 \in [-10, 10]$, $p_3 \in (-\infty, 1)$, $p_4 \in [0.001, 1]$, $s \in [0.9, 1.1]$. Пример аппроксимации чистого события приведен на рис. 24.

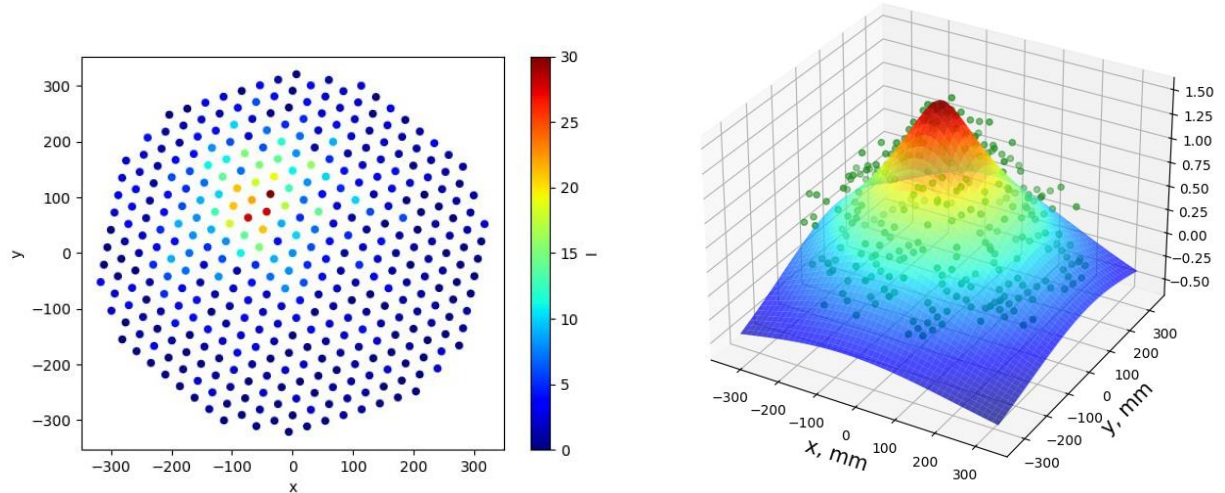


Рисунок 23 – Пример аппроксимации ФПР ЧС для чистого события в детекторе СФЕРА-3. На левом графике: по осям отложены расстояния оси детектора, цветом показана количество регистраций в сегменте. На правом графике: по осям x , y отложены расстояния от оси детектора, по z величина ФПР для каждого сегмента. Поверхность представляет собой аппроксимацию ФПР.

2.2.2 Идея критерия для разделения событий ШАЛ по типу частиц

Из расчетов известно, что поперечное распределение черенковского света хорошо коррелирует с продольным развитием ливня, поэтому был найден безразмерный параметр, характеризующий форму этого распределения и вычисляемый из непосредственно измеряемого черенковского образа. Еще одним требованием к критерию являлась 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 на его абсолютных характеристиках.

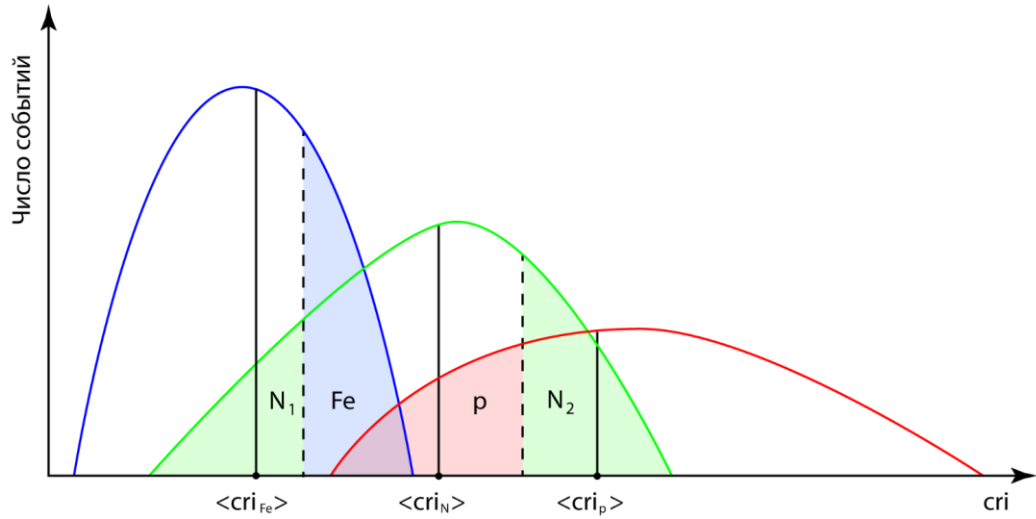


Рисунок 24 – Схема разделения ядер. $\langle cri_p \rangle$, $\langle cri_N \rangle$, $\langle cri_{Fe} \rangle$ - средние значения критерия для ядер; N_2 – количество событий от первичных ядер азота, которые лежат правее границы классов p -N; p – количество событий от первичных протонов, которые лежат левее границы классов p -N. Граница варьируется в пределах области $[\langle cri_N \rangle; \langle cri_p \rangle]$ до получения одинаковых ошибок классификации для классов пары, то есть одинаковых вероятностей $P\{p \rightarrow N\}$ и $P\{N \rightarrow p\}$. Аналогично для пары N-Fe.

Рассматривались вертикальные события (угол наклона 10 градусов) с энергией первичного ядра 10 ПэВ для трех типов ядер (Протон, Азот и Железо) при высоте полета детектора 1000 м. Был построен одномерный критерий, который определялся как отношение интеграла ФПР по области центрального круга радиуса r_1 к интегралу по кольцу с внутренним радиусом r_1 и внешним радиусом r_2 . Радиус мозаики КЭУ порядка 325 мм, поэтому предельная величина внешнего радиуса была выбрана 300 мм.

$$cri = \frac{\int_0^{r_1} I dr}{\int_{r_1}^{r_2} I dr}$$

Подбор радиусов производился в пределах $r_1 \in [80, 200]$ и $r_2 \in [100, 300]$. Для поиска наилучшего критерия была выбрана следующая метрика ошибок разделения по трем массам. Из теории следует, что чем выше масса начального ядра, тем уже будет пятно черенковского света, таким образом – чем выше значение критерия, тем легче изначальное ядро. Рассматривались две границы для разделения классов p -N и N-Fe. За основную метрику был взят минимум от максимума ошибок разделения для каждого ядра в паре класса. За ошибку классификации отношение числа неправильно

классифицированных событий относительно рассчитанного порога. В результате минимизации были получены следующие результаты:

Класс	p-N		N-Fe	
Граница и ошибки	Порог	Ошибка	Порог	Ошибка
	0.699	31.4%	0.614	31.7%

Результаты с оптимальными ошибками для детектора СФЕРА-2 в случае использования одномерного критерия выглядят следующим образом:

Класс	p-N		N-Fe	
Граница и ошибки	Порог	Ошибка	Порог	Ошибка
	5.9	32%	5.43	32%

На данный момент распределение построено без учета поправки на оптические эффекты и фона. В дальнейшем оценка будет уточняться и будет использован двумерный критерий для увеличения точности разделения. Пример распределения критериального параметра представлен на рис. 24.

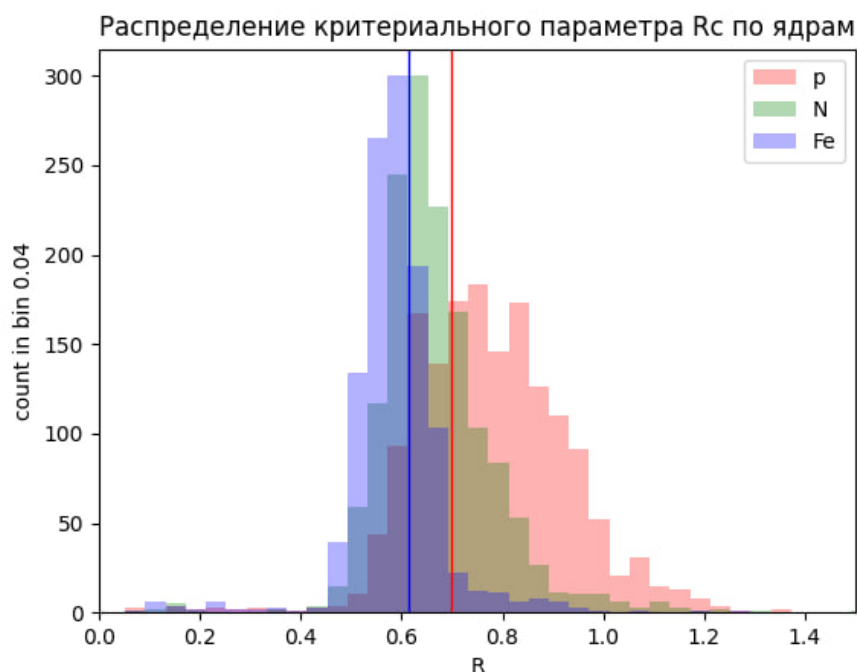


Рисунок 25 – Гистограмма распределения критериального параметра для $E = 10$ ПэВ, наклона 10 градусов, модели атмосферы 1 из списка CORSIKA и высоты наблюдения 1000 м детектора СФЕРА-3 на основе аппроксимации, описанной в параграфе 2.2.2.

ВЫВОДЫ

1. С помощью разработанных приложений на языках программирования Python, Fortran и C++, с использованием пакетов CORSIKA и GEANT4 создан программный комплекс для моделирования работы телескопа СФЕРА-3
2. Разработаны приложение для моделирования электроники детектора СФЕРА-3 и интеграционный шлюз для связки всех приложений в одно.
3. Полученный программный комплекс проверен на достоверность с использованием тестовой оптической выборки, а также с помощью смоделированных в CORSIKA событий.
4. Проведена аппроксимация образов для событий с энергией $E = 10$ ПэВ, зенитным углом 10 градусов от трех ядер: p, N, Fe.
5. С использованием полученных аппроксимаций показана возможность провести классификацию событий по массе первичного ядра с использованием одномерного критерия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день вопрос о массовом спектре первичных космических лучей остается открытым. Активно развиваются экспериментальные проекты, преследующие своей целью решение данной проблемы. Косвенные методы исследования широких атмосферных ливней, рождаемых первичной частицей высокой энергии, создают настоящий вызов для ученых-экспериментаторов. Из-за специфики экспериментов по изучению широких атмосферных ливней на наземных установках возникает необходимость создания больших детекторных массивов, расположенных на большой территории, порядка нескольких километров.

Решением этой проблемы может стать методика, лежащая в основе проекта СФЕРА. Эксперимент СФЕРА-2 доказал, что один телескоп, регистрирующий отраженное излучение Вавилова-Черенкова, способен предоставить данные, которые не уступают по значимости результатам больших наземных установок.

Следующим этапом проекта СФЕРА станет телескоп СФЕРА-3, который будет являться закономерным развитием идей проекта. Данный телескоп получит множество улучшений: новая детекторная база, увеличение размеров сферического зеркала, уменьшение энергетического порога. Все это позволит увеличить статистику эксперимента.

В данной работе была представлена программный комплекс для моделирования работы телескопа СФЕРА-3. Согласно распределениям, полученным в результате работы модели, можно ожидать, что разрешающая способность относительно массы первичной частицы повысится относительно телескопа СФЕРА-2.

Представлена обработка получаемых в программном комплексе образов ЧС с использованием одномерного критерия. Видно, что даже простейший одномерный критерий дает удовлетворительные ошибки классификации. В дальнейшем процедура оценки образов будет доработана с использованием

двумерного критерия, а в образах будут учтены абберрационные эффекты и фоновое излучение. Также будут произведены оценки для других высот полета детектора и более высоких энергий частиц. Не стоит забывать, что обработка была произведена с суммированием пикселей в сегментах, то есть на самом деле можно будет получать оценку на более мелкой сетке уже в пиксельном варианте.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Dova M.T., Mancenido M.E., Mariazzi A.G et al. The Mass Composition of Cosmic Rays near 10^{18} eV as Deduced from Measurements Made at Volcano Ranch // *Astroparticle Physics*, Vol. 21, No. 6, 2004. pp. 597-607.
2. Abbasi R.U. et al. // A Study of the Composition of Ultra-High-Energy Cosmic Rays Using the High-Resolution Fly's Eye // *Astrophys. J.* 2005. V. 622, N 2. P. 910
3. Chernov D. V. et al. // Primary Energy Spectrum and Mass Composition Determined with the Tunka EAS Cherenkov Array // *Mod. Phys. A.* 2005. V. 20, N 29. P. 6799-6801.
4. Tsunesada Y. // Telescope Array Composition Measurements // *Ibid.*
5. N. Chiba, K. Hashimoto, N. Hayashida et al. // Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) covering 100 km² area // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 1992. V. 311, I. 1-2. P. 338-349
6. Abraham J., Aglietta M., Aguirre I.C. et al. // Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 2004. V. 523, I. 1-2. P. 50-95.
7. Ivanov A. // The Yakutsk Array Experiment: Main Results and Future Directions // *EPJ Web of Conf.* 2013. V. 53. P. 04003-04013
8. Knurenko S. P. // Cosmic Ray Spectrum in the Energy Range $1.0E15$ - $1.0E18$ eV and the Second Knee According to the Small Cherenkov Setup at the Yakutsk EAS Array // *Proc. of the 33rd ICRC, Rio de Janeiro, Brazil, July 2013.*
9. Чудаков А.Е. // Возможный метод регистрации ШАЛ по черенковскому излучению, отраженному от заснеженной поверхности Земли //

Экспериментальные методы исследования космических лучей сверх-
высоких энергий: Материалы Всесоюз. симп., 19-23 июня 1972 г.
Якутск. фил. Сиб. отд. АН СССР, 1974. С.69-74

10. Н.Н. Калмыков, А.В. Тимохин // Изменение энергетических спек-
тров различных групп ядер в процессе распространения космических
лучей в Галактике, 29-я РККЛ, Москва, 2006

11. A.A. Penzias and R. W. Wilson. // A measurement of excess Antenna
Temperature at 4080 Mc/s // *Astroph. J.* 1965. V.142. P.419.

12. K. Greisen // End to the Cosmic-Ray Spectrum? // *Phys. Rev. Lett.*
1966. V.16. P.748.

13. Г.Т. Зацепин и В.А. Кузьмин // О верхней границе спектра косми-
ческих лучей // *Письма в ЖЭТФ* 1966 №4, С. 144

14. R.U. Abbasi et al. [HiRes Collaboration] // First observation of the
GreisenZatsepin-Kuzmin suppression // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V.100.
P.101101.

15. Dova M.T. et al. // The Mass Composition of Cosmic Rays near 1018
eV as Deduced from Measurements Made at Volcano Ranch // *Astropart.*
Phys. 2004. V.21, No.6. P.597-607.

16. Antoni T. et al. // KASCADE Measurements of Energy Spectra for El-
emental Groups of Cosmic Rays: Results and Open Problems // *Astropart.*
Phys. 2005. V.24, No.1-2. P.1-25.

17. Kampert K.H., Unger M. // Measurements of the Cosmic Ray Compo-
sition with Air Shower Experiments // *Astropart. Phys.* 2012. V.35, No.10.
P.660- 678.

18. R.A. Antonov, E.A. Bonvech, D.V. Chernov, T.A. Dzhatdоеva, V.I.
Galkin, D.A. Podgrudkov, T.M. Roganova // Spatial and temporal structure
of EAS reflected Cherenkov light signal. // *Astroparticle Physics* 2019.

19. Unger M., Ahn E.J. // Inferences about the Mass Composition of Cos-
mic Rays from Data on the Depth of Maximum at the Auger Observatory //
Proc. of the 33th ICRC, Rio de Janeiro, July 2013

20. Apel W.D. et al. // Experimental Evidence for the Sensitivity of the Air-Shower Radio Signal to the Longitudinal Shower Development // Phys. Rev. D.2012. V.85. P.071101.
21. Frank G. Schroeder. // Radio detection of Cosmic-Ray Air Showers and High-Energy Neutrinos // Progress in Particle and Nuclear Physics 93 (2017) 1-68
22. Huege T. // The Renaissance of Radio Detection of Cosmic Rays // Proc. of the 33th ICRC, Rio de Janeiro, July 2013.
23. Klages H.O., Apel W.D., Bekk K. et al. // Spatial and temporal structure of EAS rejected Cherenkov Light signal. // Astroparticle Physics. 2019.
24. Apel W.D., Arteaga J.C., Badea A.F. et al. The KASCADE-Grande experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2010. V. 620, I. 2-3. P. 202-216.
25. Budnev N., Astapov I., Barbashin N. et al. The TAIGA experiment: From cosmic-ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2017. V. 845. P. 330-333.
26. Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al. Tunka-133: Results of 3 year operation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2014. V. 756. P. 94-101.
27. TAIGA Detector | Taiga [Электронный ресурс] // TAIGA | facility in the Tunka valley: [сайт]. [2022]. URL: <https://taiga-experiment.info/>
28. Antonov R.A., Chernov D.V., Korosteleva E.E. et al. Balloon-Borne Measurements of the CR Energy Spectrum in the Energy Range 10-100 PeV // Proceedings of the 27th ICRC. Hamburg: Copernicus Gesellschaft. 2001. V. 1. P. 59-62.

29. Chernov D.V., Antonov R.A., Bonvech E.A., Shirokov A.V. Optical and Data Acquisition System for the SPHERE-2 Detector // Proceedings of the 30th ICRC. Mexico City. 2001. V. 5. P. 941-944.
30. Antonov R.A., Bonvech E.A., Chernov D.V. et al. The SPHERE-2 detector for observation of extensive air showers in 1 PeV – 1 EeV energy range // Astroparticle Physics. 2020. V. 121.
31. Антонов Р.А., Аулова Т.В., Бонвеч Е.А. и др. Регистрация отраженного черенковского света ШАЛ в эксперименте СФЕРА как метод изучения космических лучей сверхвысоких энергий // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46, № 1. С. 115-166.
32. Чернов Д.В. и др. // Ядерная физика. 85, № 6. 435 (2022).
33. Sandrock A. // Status and prospects of the CORSIKA 8 air shower simulation framework // arXiv (Cornell University) [Preprint] DOI:10.48550/arXiv.2211.16057.
34. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 52B. 17 (1997).
35. Ostapchenko S. // Phys. Rev. D89. 074009. (2014).
36. Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Geant4a simulation toolkit // NIMA 506 250. (2003). DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125
37. James F. // MINUIT Function Minimization and Error analysis // CERN Geneva, Switzerland 1994. D.506. V. 94.1.