

На правах рукописи

Пятовский Сергей Евгеньевич

Природа гало в стволах широких атмосферных ливней и доля легких ядер в первичном космическом излучении при $E_0 = 10$ ПэВ (эксперимент ПАМИР)

Специальность 01.04.16

Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Отделении ядерной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Пучков Виталий Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Стенькин Юрий Васильевич, Институт ядерных исследований Российской академии наук,
доктор физико-математических наук
Роганова Татьяна Михайловна, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Защита состоится « 19 » апреля 2021 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 при ФГБУ «Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук» по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук» или на сайте ФИАН им. П.Н.Лебедева Российской академии наук по ссылке:

<https://www.lebedev.ru/ru/fian-dissertation-councils/posts.html?id=373>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.023.04,

доктор физико-математических наук

Баранов С. П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Знания о массовом составе первичного космического излучения (ПКИ) и, в частности, доле легких ядер ($p+He$) позволяют анализировать нерегулярности энергетического спектра ПКИ и излом в спектре при $E_0 = 3-5$ ПэВ, установленный в 1958 г. в МГУ им. М.В.Ломоносова¹. Спектр по E_0 легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ относится к вопросам астрофизики частиц высоких энергий, ответ на который необходим для понимания механизмов ускорения ядер ПКИ в остатках сверхновых звезд, распространения и ускорения космических лучей (КЛ) в межзвездной среде, природы источников ПКИ.

Для оценки массового состава ПКИ интерес представляет изучение параметров стволов широких атмосферных ливней (ШАЛ), чувствительных к массовому составу ПКИ и с минимальными флуктуациям при развитии ядерно-электромагнитного каскада (ЯЭК) в атмосфере. Стволы ШАЛ изучены методом рентгено-эмульсионных камер (РЭК) по характеристикам семейств γ -квантов с гало (гало), что позволило проанализировать массовый состав ПКИ и сделать вывод о доле легких ядер, малозависимый от моделирования ШАЛ.

СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ

Изучение характеристик стволов ШАЛ на расстояниях несколько сантиметров от оси ШАЛ возможна с применением резистивных плоских счетчиков (РПС) (например, в эксперименте ARGO-YBJ²) и РЭК (например, в экспериментах сотрудничества ПАМИР, Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС) и Японо-Бразильской коллаборации (ЯБК)). В отличие от метода РЭК, примене-

¹ Kulikov G.V., Khristiansen G.B. On the size spectrum of extensive air showers//Soviet Physics JETP. – 1959. – Vol. 35(8). – N 3. – pp. 635-640.

² Sagge L., Di Girolamo T. Feasibility of measurements of cosmic ray composition by means of RPC digital read out in ARGONAT//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2004. – 533. – P.55-59. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2004.06.129>

ние РПС для локализации оси ШАЛ позволило достичь точности координатного разрешения, не превышающей несколько десятков сантиметров, при невозможности изучения структуры стволов ШАЛ на данных расстояниях.

Метод РЭК³ является единственным методом, позволяющим изучать структуру стволов ШАЛ с высоким координатным разрешением до 30 мкм. Методом РЭК изучены такие характеристики событий в стволах ШАЛ, как средний радиус семейств γ -квантов $\langle R \rangle$, статистики экспериментальных гало и структурных (многоцентровых) гало, чувствительные к массовому составу ПКИ. В частности, $\langle R \rangle$ использован для верификации модели MC0-FANSY (Р.А.Мухамедшин)⁴ прохождения ШАЛ через атмосферу. Моделированием показано, что более 95% событий, регистрируемых в РЭК эксперимента ПАМИР, образованы легкими ядрами ПКИ, что позволяет использовать метод РЭК как сепаратор легких ядер.

Попытки объяснить природу гало посредством перекрытия электромагнитных (ЭМ) каскадов от γ -квантов появились после того, как в ЯБК было зарегистрировано гало с большой площадью (950 мм²), названное гало «Андромеда». Впервые вопрос о природе гало был поставлен в работах Л.Т.Барадзей. В дальнейшем искусственные гало с площадями, не превышающими 500 мм², были получены в работах Т.М.Рогановой и А.К.Манагадзе (МГУ им.М.В.Ломоносова)⁵. Однако количественный вклад подпороговых относительно метода РЭК ($E_{0\gamma} < 1$ ТэВ) γ -квантов различных энергий в экспериментальный спектр площадей гало изучен не был.

Вопрос о вкладе подпороговых γ -квантов в формирование площадей гало, а также возможно ли события с гало использовать для оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ, остался нерешенным.

³ Взаимодействие адронов космических лучей сверхвысоких энергий (эксперимент «Памир»)/Под ред. Н.Г.Басова, С.И.Никольского. – М.: Наука, 1984 (Труды ФИАН; т. 154).

⁴ Мухамедшин Р.А. Феноменологические ограничения на модель неупругих взаимодействий адронов с ядрами при энергиях выше 10^{15} эВ по данным рентген-эмульсионных камер: дис...д.физ.-мат.наук: 01.04.23. – М. – 2006. – 233 с.

⁵ Ракобольская И.В., Копенкин В.В., и др. Особенности взаимодействий адронов космических лучей сверхвысоких энергий (по данным свинцовых рентгеноэмульсионных камер эксперимента «Памир»). – 2000. – М.: Изд-во МГУ. – 256 с.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Объект диссертации, – стволы ШАЛ на расстояниях до нескольких сантиметров от оси ШАЛ и семейства γ -квантов с гало. Характеристики гало зависят от типов ядер ПКИ, инициировавших ШАЛ. Регистрация данных событий в настоящее время возможна только с применением метода РЭК, применяемого для изучения изображений семейств γ -квантов и гало на рентгенографической пленке (РГП), и позволяющего измерять такие характеристики семейств γ -квантов, как θ , φ , $\langle R \rangle$, $E_{0\gamma}$, $\Sigma E_{0\gamma}$, площади гало и анализировать долю структурных (многоцентровых) гало.

Предмет диссертации, – метод РЭК и обработка получаемых методом РЭК гало на РГП. Такие характеристики семейств γ -квантов, как $\langle R \rangle$, а также структурность гало, чувствительны к массовому составу ПКИ в силу локализации высокоэнергичных γ -квантов в стволах ШАЛ.

Цель диссертации состоит в количественном исследовании вклада γ -квантов различных энергий, в т.ч. подпороговых, в формирование площадей гало, регистрируемых в стволах ШАЛ методом РЭК; в оценке по событиям с гало доли легких ядер в массовом составе ПКИ; в оценке изменения массового состава ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ.

Для достижения поставленной цели решены задачи:

1. Анализ доли легких ядер в массовом составе ПКИ, полученной в ряде экспериментов;
2. Анализ характеристик экспериментальных семейств γ -квантов и гало, регистрируемых методом РЭК;
3. Объяснение экспериментально полученного спектра площадей гало с применением моделированных для эксперимента ПАМИР функций пространственного распределения (ФПР) e^\pm и γ -квантов;
4. Количественное объяснение вклада γ -квантов различных энергий, в т.ч. подпороговых, в формирование площадей экспериментально полученных гало с

целью применения характеристик гало для оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ;

5. Оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ по статистикам экспериментально полученных одноцентровых и многоцентровых гало и модельным вероятностям образования гало;
6. Анализ изменения спектров групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Гипотеза диссертационного исследования состоит в том, что в области излома спектра по E_0 ПКИ при $E_0 = 3-5$ ПэВ массовый состав ПКИ остается смешанным с существенной долей легких ядер. Основанием гипотезы послужила статистика гало, полученная в эксперименте ПАМИР и указывающая на то, что легкие ядра присутствуют в значительном количестве в массовом составе ПКИ. Проверка гипотезы необходима по причине противоречивых данных о массовом составе ПКИ, полученных в экспериментах по изучению ШАЛ при данных энергиях E_0 .

Научная новизна диссертации состоит:

1. Получение количественного вклада γ -квантов с подпороговыми энергиями в формирование площадей гало и площадей гало более 500 мм^2 ;
2. Построение модельного спектра площадей гало, соответствующего спектрам площадей гало, полученным в различных экспериментах с РЭК;
3. Оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ методом гало, основанным на статистике гало, полученной в эксперименте ПАМИР.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Знания о массовом составе ПКИ в области излома спектра по энергии ПКИ при $E_0 = 3-5$ ПэВ позволяют делать выводы о происхождении ПКИ, механизмах ускорения КЛ в галактической среде и анализировать природу излома спектра ПКИ.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении диссертационного исследования применены методы изучения характеристик ШАЛ, такие как метод РЭК (по данным эксперимента ПАМИР) и метод оценки изменения массового состава ПКИ по возрасту ШАЛ S (по данным эксперимента KASCADE-Grande). Данные для диссертации получены из обработки результатов экспериментов ПАМИР, ЯБК и KASCADE-Grande.

В диссертации предложены и прошли апробацию в научных публикациях метод гало, позволивший получить вывод о доле легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 10$ ПэВ, и метод возраста ШАЛ $S_{\min-\max}$, позволивший оценить показатели спектров групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ, регистрируемых в эксперименте, а также изучить нерегулярности данных спектров в диапазоне $E_0 = 1-100$ ПэВ. Энергия $E_0 = 10$ ПэВ, для которой оценена доля легких ядер в массовом составе ПКИ, получена как средневзвешенная по вероятностям образования гало.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

На защиту выносятся основные результаты диссертации:

1. Объяснено явление «гало» с количественной оценкой определяющего вклада подпороговых γ -квантов в стволах ШАЛ при формировании гало [1];
2. Построены модельные спектры площадей гало, в том числе с площадями гало более 500 мм^2 , соответствующие полученным спектрам площадей гало в экспериментах с РЭК [1,3];
3. Получены смоделированные гало всего спектра площадей, в т.ч. гало с площадями более 500 мм^2 , характеристики которых, такие как поток гало, спектр площадей гало, доля структурных гало и распределение гало по $\Sigma E_{0\gamma}$, соответствуют характеристикам экспериментально полученных гало [2,3];
4. Проведена оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ, составившая $(39 \pm 6)\%$ при $E_0 = 10$ ПэВ, с применением метода гало [2,3,4].

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

- Разработан программный комплекс (ПК) ШАЛ+РЭК поиска гало, объединяющий данные результатов моделирования ШАЛ в атмосфере посредством модели MC0-FANSY и развитию ЭМ каскадов в Г-блоке РЭК ПАМИР посредством полученных для РЭК эксперимента ПАМИР ФПР e^\pm и γ -квантов;
- Получен количественный вклад в формирование площадей гало подпороговых по энергии γ -квантов, в том числе в площади гало более 500 мм^2 . Показано, что гало образованы перекрытием каскадов от подпороговых ($E_{0\gamma} < 1 \text{ ТэВ}$), относительно метода РЭК, γ -квантов в стволах ШАЛ, и основной вклад в образование гало больших площадей вносят γ -кванты с энергиями $E_{0\gamma} = 100 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ}$. Вклад γ -квантов с энергиями менее 100 ГэВ в формирование площадей гало не превышает 15-20%;
- Показано, что статистика экспериментальных гало с существенно различающимися вероятностями образования гало ядрами различных типов массового состава ПКИ может быть использована для оценки доли легких ядер. Предложенный метод гало малозависим от модели ШАЛ по причине существенно различающихся вероятностей образования гало ядрами ПКИ различного типа;
- Методом гало показано, что доля легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 10 \text{ ПэВ}$ составляет $(39 \pm 6)\%$. При меньшей доле легких ядер полученная в эксперименте ПАМИР статистика гало наблюдаться не будет;
- Показано, что в диапазоне $E_0 = 1-100 \text{ ПэВ}$ массовый состав ПКИ утяжеляется. Предложенный метод возраста ШАЛ $S_{\text{min-max}}$ с применением данных эксперимента KASCADE-Grande позволил оценить показатели спектров групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ, а также оценить нерегулярности в данных спектрах в диапазоне $E_0 = 1-100 \text{ ПэВ}$.

СТЕПЕНЬ ДОСТОВЕРНОСТИ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты диссертации, выносимые на защиту, опубликованы в материалах конференций, а также в российских и международных индексируемых научных журналах WoS и Scopus из перечня ВАК. По результатам диссертационного исследования автором либо в соавторстве опубликованы 24 статьи, последние из которых приведены в разделе «Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация изложена на 139 страницах основного текста, состоит из введения, трех глав, выводов по главам, заключения, списка публикаций автора с результатами диссертационного исследования и списка литературы, включающих 178 наименований.

ВВЕДЕНИЕ

Во введении обоснована актуальность, изученность проблемы, объект, предмет, цель, задачи, методологическая основа, научная новизна, практическая значимость и апробация результатов диссертации, вклад автора в результаты диссертационного исследования, основные результаты диссертации по главам, положения, выносимые на защиту, публикации в изданиях из перечня ВАК, где изложены результаты диссертации.

ПЕРВАЯ ГЛАВА ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе диссертации приведены данные по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ, полученные в ряде экспериментов; обосновано применение разработанной для описания данных эксперимента ПАМИР модели ШАЛ; проанализирован состав событий, регистрируемых методом РЭК в стволах ШАЛ. Показана необходимость анализа количественного вклада подпороговых γ -

квантов в формирование площадей гало в стволах ШАЛ с целью применения характеристик гало, таких как статистика гало и вероятности образования гало ядрами ПКИ различного типа, для оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ.

На рис.1 приведено изменение доли протонов и доли легких ядер в массовом составе ПКИ в диапазоне энергий $E_0 = 1-100$ ПэВ по данным экспериментов ПАМИР, KASCADE-Grande, ARGO-YBJ, Tunka и IceCube. Из рис.1 следует, что оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 10$ ПэВ на основе анализа событий с гало по результатам эксперимента ПАМИР показала хорошее согласие с результатами экспериментов Tunka и IceCube.

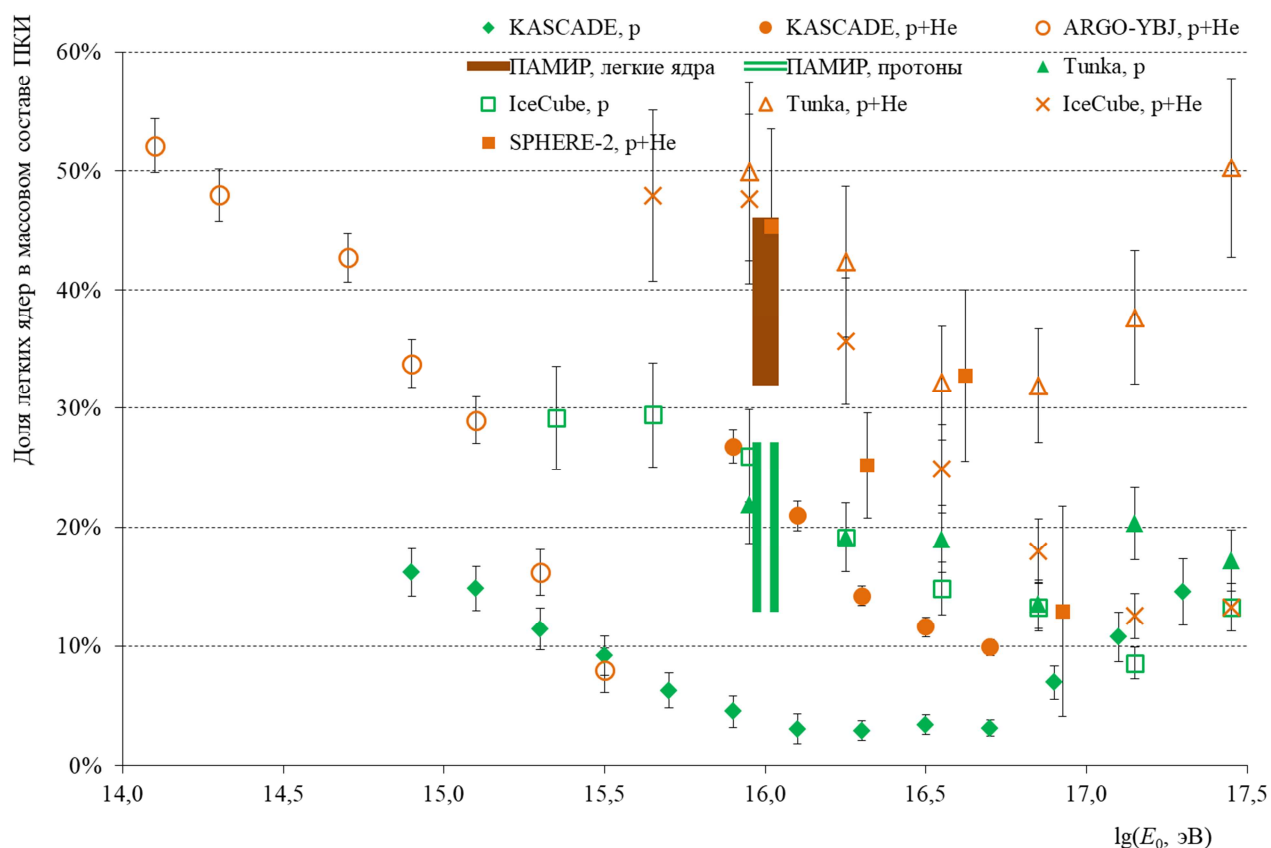


Рис.1 – Доля протонов и легких ядер в массовом составе ПКИ по данным экспериментов KASCADE-Grande, ARGO-YBJ, Tunka, IceCube и ПАМИР [4].

В целях диссертационного исследования и исходя из условий эксперимента ПАМИР входные параметры модели ШАЛ MC0-FANSY установлены следующими:

– 9 групп ядер ПКИ: протоны, He, Li, C, O, Mg, Si, V, Fe (см. табл.1);

- диапазон по энергиям ядер ПКИ $E_0 = 5 \text{ ПэВ} - 3 \text{ ЭэВ}$;
- глубина атмосферы $H_{\text{ПАМИР}} = 594 \text{ г/см}^2$;
- диапазон по зенитным углам прихода моделируемых ШАЛ $\theta = 0-50^\circ$;
- пороговая энергия отслеживаемых частиц устанавливалась исходя из задач моделирования ШАЛ;
- отслеживаемые частицы в ШАЛ включают стабильные адроны и резонансы.

Табл.1 – Массовый состав ПКИ в модели MC0-FANSY.

$E_0, \text{ ПэВ}$	1	10	100
Протоны, %	33	26	20
Ядра He, %	22	17	15

Схема эксперимента ПАМИР приведена на рис.2. Цель эксперимента ПАМИР⁶ состояла в изучении ядерных взаимодействий при $E_0 > 0.1 \text{ ПэВ}$ с набором статистики высокоэнергичных семейств γ -квантов и гало, и анализе характеристик семейств γ -квантов и гало в стволах ШАЛ. Г-блок РЭК ПАМИР состоит из чередующихся слоев Pb с суммарной глубиной 6 см (10.6 t -единиц), и РГП, и предназначен для регистрации ЭФК ШАЛ.

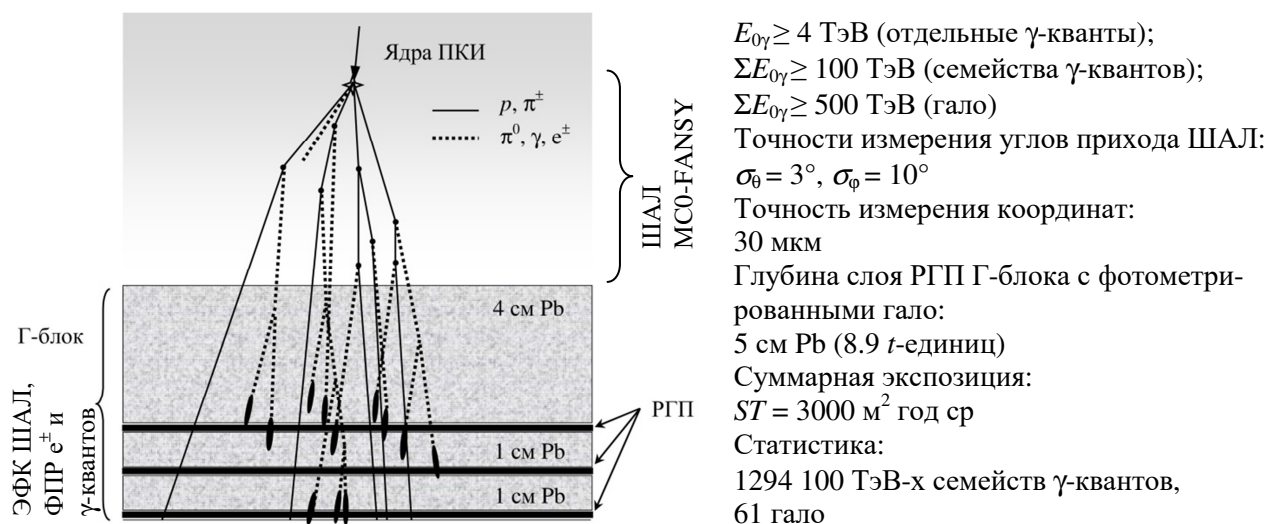


Рис.2 – Схема Г-блока РЭК эксперимента ПАМИР.

С целью оценки вклада подпороговых γ -квантов в площади гало и оценки массового состава ПКИ с применением статистики гало решены задачи:

⁶ Исследование ядерных взаимодействий при энергиях $10^{15} - 10^{16}$ электронвольт. Проект эксперимента «Памир»//Физический институт им. П.Н.Лебедева. – 1972. – Препринт №172.

1. Построение спектра площадей гало, ограниченных изоденсой $D = 0.5$, $S_{D=0.5}$ и сравнение расчетного и экспериментального спектров площадей гало.

В научных публикациях не было получено соответствие расчетного и экспериментального спектров гало по площадям $S_{\text{гало}}$. Показано, что максимальная расчетная $S_{\text{гало}}$ от одиночного γ -кванта 40 мм^2 при том, что количество гало с $S_{\text{гало}} > 40 \text{ мм}^2$ составляет 1/3 от статистики гало, полученной в эксперименте ПАМИР. Ограничение площади гало значением 40 мм^2 связано с тем, что высокоэнергичному π^0 -мезону не хватает глубины атмосферы, и ЭФК не успевает развиться;

2. Оценка массового состава ПКИ по статистике экспериментальных гало, равной 61 гало, соответствующей суммарной экспозиции $ST = 3000 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ср}$ РЭК эксперимента ПАМИР;
3. Оценка массового состава ПКИ по статистике экспериментально полученных многоцентровых гало, равной 0.23 от всех гало, зарегистрированных в эксперименте ПАМИР.

В экспериментах по оценке массового состава ПКИ при $E_0 > 0.1$ ПэВ наблюдаются существенные различия в оценках доли легких ядер в массовом составе ПКИ. Например, при $E_0 = 10$ ПэВ по данным эксперимента ARGO-YBJ доля легких ядер составляет 10%, IceCube и Tunka 50%, см. рис.1. Преимущество метода гало состоит в том, что данный метод позволяет оценить массовый состав ПКИ при $E_0 \geq 0.1$ ПэВ по характеристикам гало, таким как доля структурных гало и вероятности образования гало ядрами различных типов, в стволах ШАЛ, где максимально сохранена информация о первичном акте взаимодействия ядра ПКИ с атомами атмосферы. Расчетами показано, что наблюдаемые на РГП гало представляют собой изображения стволов ШАЛ, образованных легкими ядрами ПКИ.

В первой главе диссертации:

1. Выполнен сравнительный анализ данных двух групп экспериментов по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ. Первая группа экспериментов относится к прямым измерениям, соответствующих $E_0 < 0.1$ ПэВ, например

баллонные эксперименты JACEE, RUNJOB и CREAM, во второй группе экспериментов при $E_0 > 0.1$ ПэВ выводы зависят от модели ШАЛ, например эксперименты Tunka и KASCADE-Grande⁷.

Показано, что в области излома спектра по энергии ПКИ при $E_0 = 3-5$ ПэВ доли легких ядер, полученные в различных экспериментах, существенно различаются, что связано с моделированием ШАЛ. Сделан вывод о необходимости малозависимой от модели ШАЛ оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ при энергии E_0 в области излома спектра ПКИ;

2. Обосновано применение выбранной для описания результатов эксперимента ПАМИР модели ШАЛ MC0-FANSY. Например показано, что полученные в расчетах по MC0-FANSY средние радиусы семейств γ -квантов $\langle R \rangle$ соответствуют экспериментально полученным радиусам. Жесткости спектров вторичных частиц, характеризующие различия моделей, зависят от коэффициентов неупругости и диссипации энергии при ядерных взаимодействиях в атмосфере, определяющих $\langle R \rangle$ и пробеги семейств γ -квантов до поглощения в атмосфере. При переходе к более жестким моделям данные эксперимента ПАМИР перестают описываться.

Сделан вывод о чувствительности характеристик семейств γ -квантов и статистики гало к массовому составу ПКИ. Статистически значимое количество гало, полученное в эксперименте ПАМИР, и количественное объяснение спектра площадей гало с учетом подпороговых γ -квантов необходимы для надежной оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ.

ВТОРАЯ ГЛАВА ДИССЕРТАЦИИ

Во второй главе диссертации показано, что полученный вклад подпороговых γ -квантов в формирование площадей гало в стволах ШАЛ соответствует данным эксперимента ПАМИР. Объяснение площадей гало вкладом подпороговых γ -

⁷ Wochele J., Kang D., et al. KASCADE-Grande Collaboration. KCDC User Manual (KASCADE Cosmic Ray Data Centre)//Open Access Solution for the Karlsruhe Shower Core and Array Detector (KASCADE). – URL: <https://kcdc.ikp.kit.edu/datashop/fulldata>

квантов делает возможной оценку доли легких ядер в массовом составе ПКИ с применением таких характеристик экспериментальных гало, как статистика гало и доля структурных гало, с анализом полученной оценки доли легких ядер на предмет ее модельной зависимости.

К параметрам ШАЛ, моделируемым на уровне РЭК, отнесены тип первичной частицы, E_0 , $\cos\theta$, φ , энергии отслеживаемых частиц, x, y -координаты отслеживаемых частиц в плоскости РЭК и типы отслеживаемых в ШАЛ частиц. Основная цель построения модели ШАЛ+РЭК данных эксперимента ПАМИР, – моделирование гало.

Моделирование гало состоит из двух этапов: формирование БД параметров ШАЛ над РЭК для условий эксперимента ПАМИР ($H = 594 \text{ г/см}^2$, $E_0 = 5 \text{ ПэВ} - 3 \text{ ЭэВ}$, $E_{0\gamma\text{th}} = 100 \text{ ГэВ}$) посредством модели MC0-FANSY и формирование БД ШАЛ+РЭК для уровня РГП на глубине 5 см Рb в Г-блоке РЭК посредством ФПР e^\pm и γ -квантов в Г-блоке РЭК ПАМИР. Исползованные ФПР e^\pm и γ -квантов в Г-блоке РЭК рассчитаны в работах В.В.Учайкина специально для многослойной среды РЭК эксперимента ПАМИР с учетом эффекта Ландау-Померанчука-Мигдалла.

В алгоритме «Шахматная доска», реализованном в разработанном для расчета искусственных гало ПК ШАЛ+РЭК, использованы результаты моделирования по MC0-FANSY и ФПР e^\pm и γ -квантов. Алгоритм «Шахматная доска» работает аналогично сканеру РГП, применяемому при обработке данных эксперимента ПАМИР. В ПК ШАЛ+РЭК рассчитаны потоки $N_{e,\gamma}$ в ячейках сканирования с шагом 100 мкм по ФПР с анализом ячеек по критерию $D \geq 0.5$ на предмет поиска многоцентровых гало и соответствия критериям гало (гало считается потемнение на РГП с площадью более 4 мм^2 для одноцентрового гало и $\sum S_i \geq 4 \text{ мм}^2$, где $S_i \geq 1 \text{ мм}^2$ для многоцентрового гало, при условии $\sum E_{0\gamma i} \geq 500 \text{ ТэВ}$, где $E_{0\gamma i} \geq 4 \text{ ТэВ}$). Моделирование показало, что наиболее вероятное расстояние от центра тяжести гало до оси ШАЛ составляет 1.2 см, т.е. гало находится в стволе ШАЛ.

ПК ШАЛ+РЭК моделирования гало в Г-блоке РЭК ПАМИР применен с целью проверки предположения, что гало, в т.ч. с площадями более 500 мм^2 , образованы суперпозицией ФПР подпороговых относительно метода РЭК ПАМИР γ -квантов со значениями $E_{0\gamma} < 1 \text{ ТэВ}$. На рис.3 приведено изменение площади искусственного гало с $S_{\text{гало}} = 3200 \text{ мм}^2$, образованного протоном ПКИ с $E_0 = 780 \text{ ПэВ}$, в зависимости от пороговых энергий $E_{0\gamma\text{th}} = 100 \text{ ГэВ} - 4 \text{ ТэВ}$ отслеживаемых в ЭФК ШАЛ частиц. Исследования показали, что учет подпороговых по энергии относительно метода РЭК γ -квантов увеличивает площади моделируемых гало в 2-3 раза.

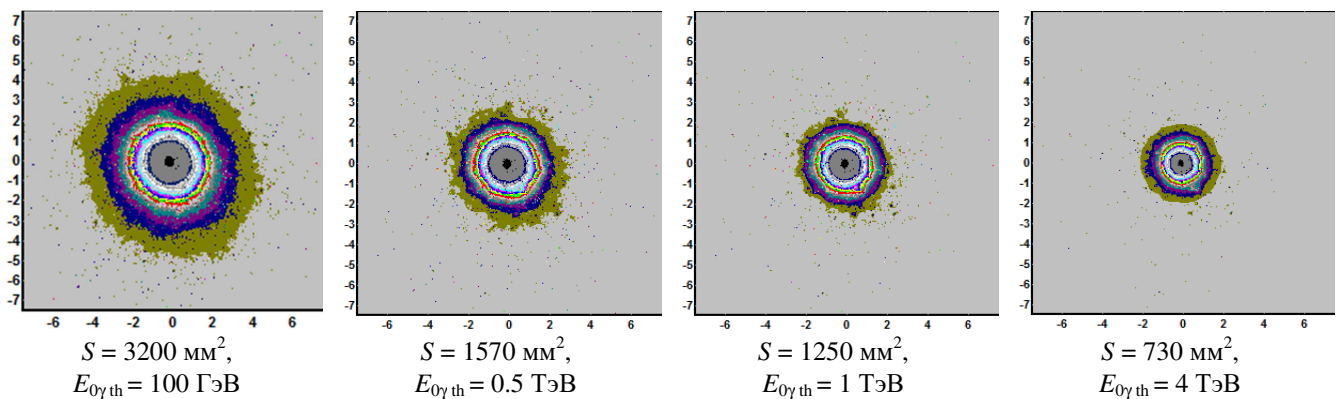


Рис.3 – Искусственное гало, рассчитанное для $E_{0\gamma\text{th}} = 100 \text{ ГэВ} - 4 \text{ ТэВ}$ отслеживаемых в ЭФК ШАЛ частиц.

В диссертации показано, что истинные площади гало можно получить только с учетом вклада подпороговых по энергии γ -квантов вплоть до $E_{0\gamma\text{th}} = 100 \text{ ГэВ}$. Дальнейшее уменьшение $E_{0\gamma\text{th}}$ до 20 ГэВ и ниже уже не приводит к существенному росту $S_{\text{гало}}$, ограниченному пределами 15-20%.

Верификация модели гало на предмет соответствия характеристик экспериментальных и расчетных гало выполнена построением спектров площадей гало. В частности, моделированием получены гало с $S_{\text{гало}} > 500 \text{ мм}^2$, а также многоцентровые гало (см. табл.2), наблюдаемые в экспериментах с РЭК и которые не удавалось получить ранее. Из табл.2 следует, что основной вклад в образование многоцентровых гало, зарегистрированных в эксперименте ПАМИР, вносят протоны и, в меньшей степени, ядра He.

Табл.2 – Доли многоцентровых гало, полученные в эксперименте ПАМИР и моделированием для различных ядер массового состава ПКИ.

Протоны	<i>He</i>	<i>C</i>	<i>Fe</i>	МС0-FANSY	ПАМИР
0.25 ± 0.03	0.45 ± 0.09	0.59 ± 0.11	0.70 ± 0.03	0.28 ± 0.03	0.23 ± 0.07

На рис.4 приведено сравнение спектров по площадям гало $S_{\text{гало}}$, рассчитанных по МС0-FANSY, и экспериментальных гало. Для сопоставления спектров площадей гало использована БД гало, полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК.

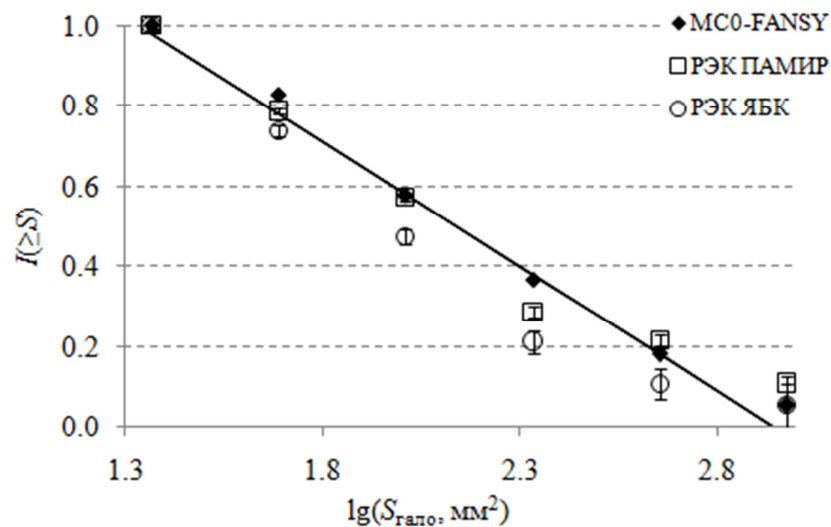


Рис.4 – Спектры площадей гало, рассчитанных по модели ШАЛ+РЭК и гало, полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК ($R_a^2 = 0.96$).

Одной из основных характеристик гало, измеренных в экспериментах ПАМИР и ЯБК и полученных в расчетах по модели ШАЛ+РЭК, является $\Sigma E_{0\gamma}$. На рис.5 приведена зависимость площади гало $S_{\text{гало}}$ от $\Sigma E_{0\gamma}$ в сравнительном анализе расчетных и экспериментально полученных данных. Из рис.5 следует хорошее согласие расчетных данных по модели ШАЛ+РЭК и данных, полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК.

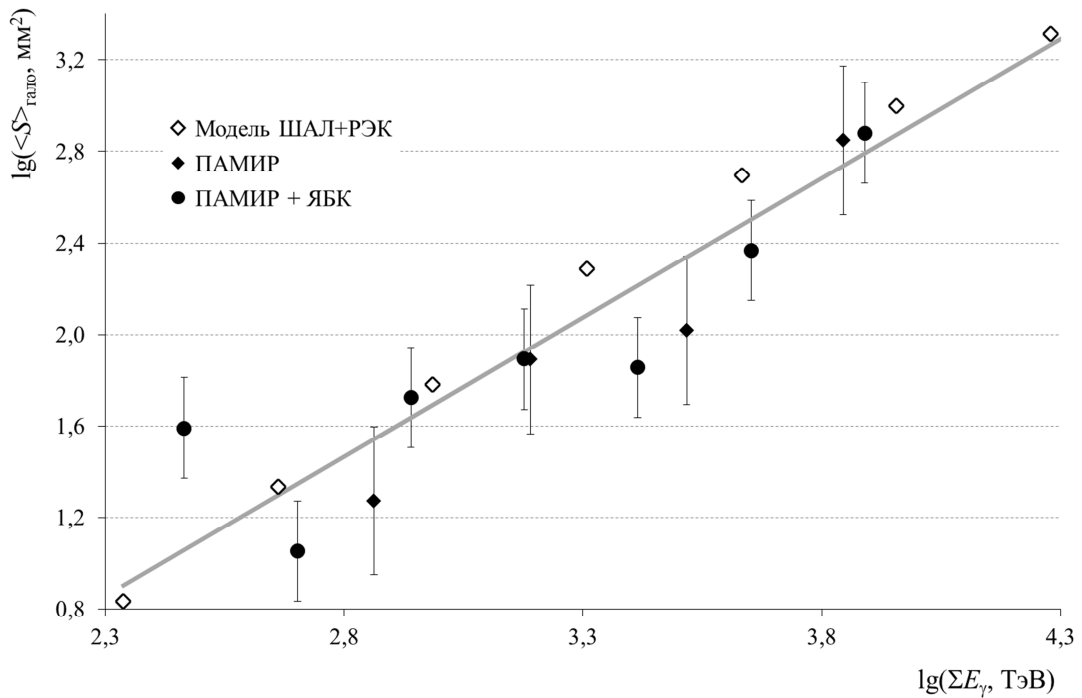


Рис.5 – Зависимость площади гало $S_{\text{гало}}$ от $\Sigma E_{0\gamma}$ в сравнении расчетных и экспериментально полученных данных ($R_a^2 = 0.89$).

На рис.6 приведены полученные моделированием потоки гало, образованных различными типами ядер ПККИ, в зависимости от E_0 . Из рис.6 следует, что гало образованы преимущественно легкими ядрами массового состава ПККИ. Средне-взвешенная по вероятностям образования гало энергия ядер ПККИ, образовавших гало, $E_0 = 10$ ПэВ. Начиная с энергий $E_0 = 100$ ПэВ в образовании гало начинают участвовать все ядра массового состава ПККИ от протонов до ядер Fe. Однако в силу степенного по E_0 спектра ПККИ поток событий, регистрируемых в РЭК при $E_0 = 100$ ПэВ относительно событий при более низких E_0 , незначителен.

Моделирование гало (см. рис.6), образованных ядрами ПККИ с энергиями $E_0 \geq 5$ ПэВ, показало, что основная доля экспериментальных гало образована протонами (83%) и ядрами He (13%), инициировавшими ШАЛ. При замене всех ядер ПККИ протонами количество гало составит 140, ядрами He, – 35, ядрами $>He$, – 5-10 против экспериментально зарегистрированных 61 гало.

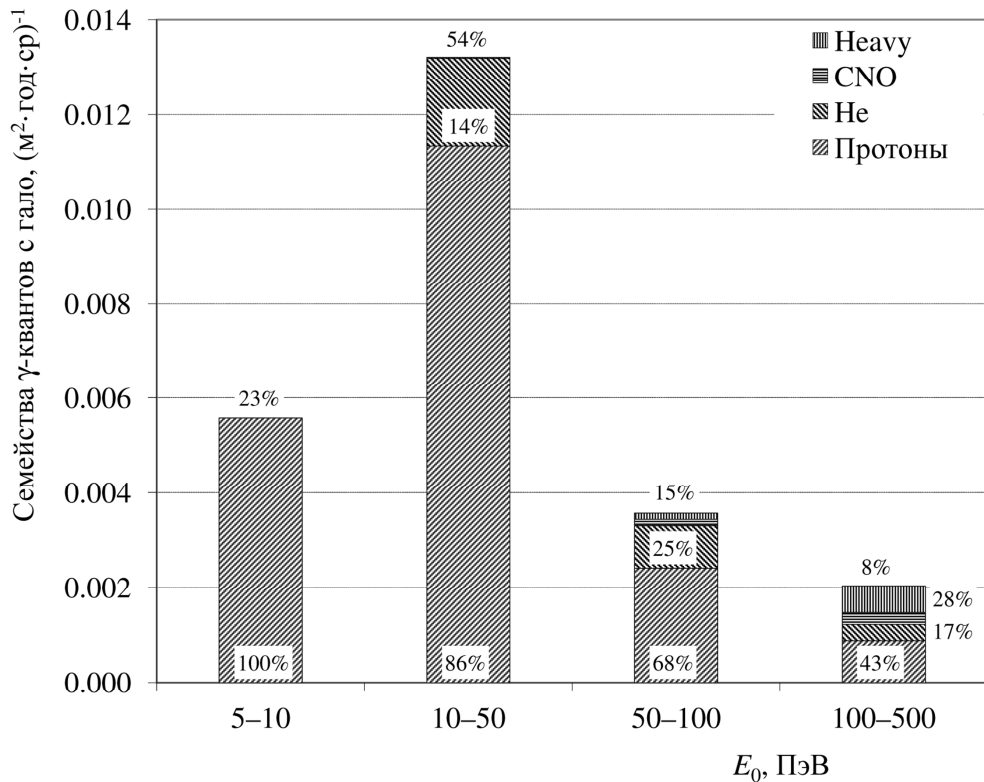


Рис.6 – Доля гало, образованных различными типами ядер массового состава ПКИ, в зависимости от E_0 .

Модель ШАЛ+РЭК образования гало показала, что данная модель описывает такие экспериментальные параметры, как средний радиус семейств γ -квантов $\langle R \rangle$, спектр всех площадей гало, долю многоцентровых гало, зависимость площадей гало $S_{\text{гало}}$ от $\Sigma E_{0\gamma}$, потоки гало для суммарной экспозиции $ST = 3000 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ср}$ эксперимента ПАМИР.

Во второй главе диссертации:

1. Верифицирована модель ШАЛ+РЭК одноцентровых и многоцентровых гало, регистрируемых в РЭК эксперимента ПАМИР. Применены ФПР e^\pm и γ -квантов, учитывающие особенности РЭК ПАМИР. Модель ШАЛ+РЭК с применением разработанных для эксперимента ПАМИР ФПР позволила количественно согласовать характеристики искусственных и экспериментальных гало;
2. Проанализированы события, регистрируемые методом РЭК в стволе ШАЛ. Показано, что средний радиус семейств γ -квантов $\langle R \rangle$, статистика гало и до-

ля структурных гало чувствительны к массовому составу ПКИ в необходимом диапазоне E_0 .

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений доли структурных гало (см. табл.2) и $\langle R \rangle$ показало, что полученная в эксперименте ПАМИР доля структурных гало 0.23 ± 0.07 не противоречит расчетной 0.25 ± 0.03 для легких ядер ПКИ; полученный в эксперименте ПАМИР $\langle R \rangle_{\text{ПАМИР}} = (1.94 \pm 0.06)$ см не противоречит расчетному $\langle R \rangle = (2.01 \pm 0.03)$ см для легких ядер ПКИ, в то время как уже для ядер группы CNO ПКИ $\langle R \rangle = (3.0 \pm 0.2)$ см. Сказанное подтверждает, что регистрируемые в РЭК ПАМИР события образованы протонами и, в меньшей степени, ядрами He в массовом составе ПКИ;

3. Получены искусственные гало, характеристики которых соответствуют характеристикам экспериментальных гало, включая не объясненные ранее спектры всех площадей гало. Показано, что снижение пороговой энергии γ -квантов от 1 ТэВ до 100 ГэВ приводит к увеличению площадей гало в 2-3 раза.

Сделан вывод, что статистика одноцентровых и многоцентровых гало является экспериментальным параметром, позволяющим оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ при условии, что вероятность образования гало первичными протонами в несколько раз выше вероятности образования гало ядрами He и много выше вероятности образования гало ядрами тяжелее He в массовом составе ПКИ.

Вывод о том, что гало не являются экзотическими событиями, но образованы ядрами массового состава ПКИ, делает возможной оценку доли легких ядер в массовом составе ПКИ с применением экспериментально полученной статистики гало и расчетной эффективности образования гало, и анализ полученных результатов на предмет их модельной зависимости.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА ДИССЕРТАЦИИ

В третьей главе диссертации приведены оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ, полученная по статистике гало, регистрируемых в стволах ШАЛ; результаты анализа модельной зависимости оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ методом гало; результаты анализа изменения массового состава ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ методом возраста ШАЛ $S_{\min-\max}$. Показано, что легкие ядра полностью не выбывают из массового состава ПКИ в области излома энергетического спектра при $E_0 = 3-5$ ПэВ и вносят существенный вклад в массовый состав ПКИ при $E_0 = 10$ ПэВ (39 ± 6)%.

Статистика гало, а также доля многоцентровых гало (см. табл.2) и вероятности образования гало протонами, ядрами He и ядрами $>He$, различающиеся в несколько раз (см. табл.3), чувствительны к массовому составу ПКИ, при том, что гало характеризуются высокой надежностью визуальной регистрации на РГП.

Метод гало основан на оценке доли легких ядер по статистике гало при условии, что вероятности образования гало протонами, ядрами He и ядрами $>He$ существенно различаются. С ростом E_0 вероятность образования гало средними, тяжелыми и сверхтяжелыми группами ядер в массовом составе ПКИ растет и для больших E_0 метод гало перестает работать, т.к. при $E_0 > 100$ ПэВ вероятности образования гало различными типами ядер выравниваются и начинают регистрироваться гало, образованные всеми типами ядер ПКИ, инициировавших ШАЛ (см. рис.6).

Обозначим N_0 – статистику экспериментальных гало; \tilde{N}_p , – количество гало, наблюдаемых на РГП, если принять, что все ядра ПКИ, – протоны; W_p , W_{He} , $W_{>He}$, – вероятности образования гало протонами, ядрами He и ядрами $>He$. Тогда доли протонов и ядер He в массовом составе ПКИ:

$$P_p = \left\{ \frac{N_0 W_p}{\tilde{N}_p} - W_{He}(1 - P_{>He}) - W_{>He} P_{>He} \right\} (W_p - W_{He})^{-1} \quad (1)$$

$$P_{He} = \left\{ \frac{N_0 W_p}{\tilde{N}_p} - W_p(1 - P_{>He}) - W_{>He} P_{>He} \right\} (W_{He} - W_p)^{-1} \quad (2)$$

Зависимости (1) и (2) с учетом значений табл.3 для количества зарегистрированных в эксперименте ПАМИР гало $N_0 = 61$:

$$P_p = 0.24P_{>He} + 0.25 \quad (3)$$

$$P_{He} = -1.24P_{>He} + 0.75 \quad (4)$$

Табл.3 – Вероятности образования гало ядрами ПКИ. Моделирование ШАЛ выполнено для условий эксперимента ПАМИР, $E_0 > 5$ ПэВ.

$W_p, \%$	$W_{He}, \%$	$W_{>He}, \%$
1.76	0.44	0.13

Из (3) и (4) следует, что доля тяжелых ядер в массовом составе ПКИ $P_{>He}$ не может быть больше 61%, в противном случае в эксперименте ПАМИР не будет наблюдаемой статистики гало. С учетом ошибки $N_0 \pm \sqrt{N_0}$ наблюдаемая статистика гало $N_0 = 61$ гало при полной экспозиции экспериментальной установки РЭК ПАМИР $ST = 3000 \text{ м}^2 \text{ год ср}$ требует $(39 \pm 6)\%$ доли легких ядер в массовом составе ПКИ.

Зависимости (1) и (2) также проанализированы по статистике многоцентровых гало (см. табл.2), полученных в расчетах и эксперименте ПАМИР. Показано, что доля легких ядер в массовом составе ПКИ, оцененная по многоцентровым гало, составляет 43%.

Для оценки зависимости метода гало от модельных переменных W_p , W_{He} , $W_{>He}$ и \tilde{N}_p в части оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ примем $W_p = nW_{He}$, $W_{He} = mW_{>He}$ и $w = N_0/\tilde{N}_p$. Тогда из (1) и (2) получим:

$$P_p = \frac{wn-1}{n-1} + \frac{(m-1)P_{>He}}{(n-1)m} \quad (3)$$

$$P_{He} = \frac{n}{1-n}(w-1) - \frac{(1-mn)P_{>He}}{(1-n)m} \quad (4)$$

При m и $n \gg 1$ из (3) и (4) следует, что $P_{p,He}(n) / P_{p,He}(n+1) \rightarrow 1$ и $P_{p,He}(m) / P_{p,He}(m+1) \rightarrow 1$. В частности, при $m = n \geq 4$ соотношения $P_{p,He}(n)/P_{p,He}(n+1)$ и $P_{p,He}(m) / P_{p,He}(m+1)$ находятся в диапазоне $\pm 10\%$, т.е. с ошибкой 10% не зависят от модели ШАЛ, описывающей экспериментальные данные РЭК ПАМИР.

Изменение массового состава ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ по данным эксперимента
KASCADE-Grande

Для оценки изменения массового состава ПКИ применен метод возраста ШАЛ $S_{\min-\max}$, основанный на значительной статистике экспериментальных ШАЛ. Методом $S_{\min-\max}$ формируется статистика параметров ШАЛ, зарегистрированных в эксперименте, образованных самыми легкими и самыми тяжелыми группами ядер в массовом составе ПКИ.

В анализе использована БД KASCADE-Grande, содержащая параметры более чем 150 млн ШАЛ, в т.ч. возраст ШАЛ S . Применение метода $S_{\min-\max}$ к экспериментальным данным KASCADE-Grande позволило получить статистики параметров ШАЛ, с максимальной вероятностью относящиеся к ШАЛ, инициированным самыми легкими (самыми тяжелыми) группами ядер в массовом составе ПКИ. Метод $S_{\min-\max}$ позволил оценить показатели спектров и нерегулярности в спектрах групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ, регистрируемых в эксперименте.

Основу метода $S_{\min-\max}$ [5] составляет предположение, подтвержденное моделированием ШАЛ, что при данном N_e возраст ШАЛ S растет с ростом массового числа ядра ПКИ. С целью оценки характера изменения спектров по E_0 групп самых легких (самых тяжелых) ядер ПКИ, ШАЛ от которых регистрируются в эксперименте, полученная в эксперименте статистика параметров ШАЛ (>150 млн ШАЛ в эксперименте KASCADE-Grande) отсортирована в порядке возрастания S . Проанализированы характеристики первых 1 млн событий с минимальными значениями S , соответствующие группе самых легких ядер в массовом составе ПКИ, и последних 1 млн событий с максимальными значениями S , соответствующие группе самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ, ШАЛ от которых регистрируются в эксперименте.

На рис.7 спектры групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ приведены с показателями γ в диапазоне по $E_0 = 1-100$ ПэВ [5].

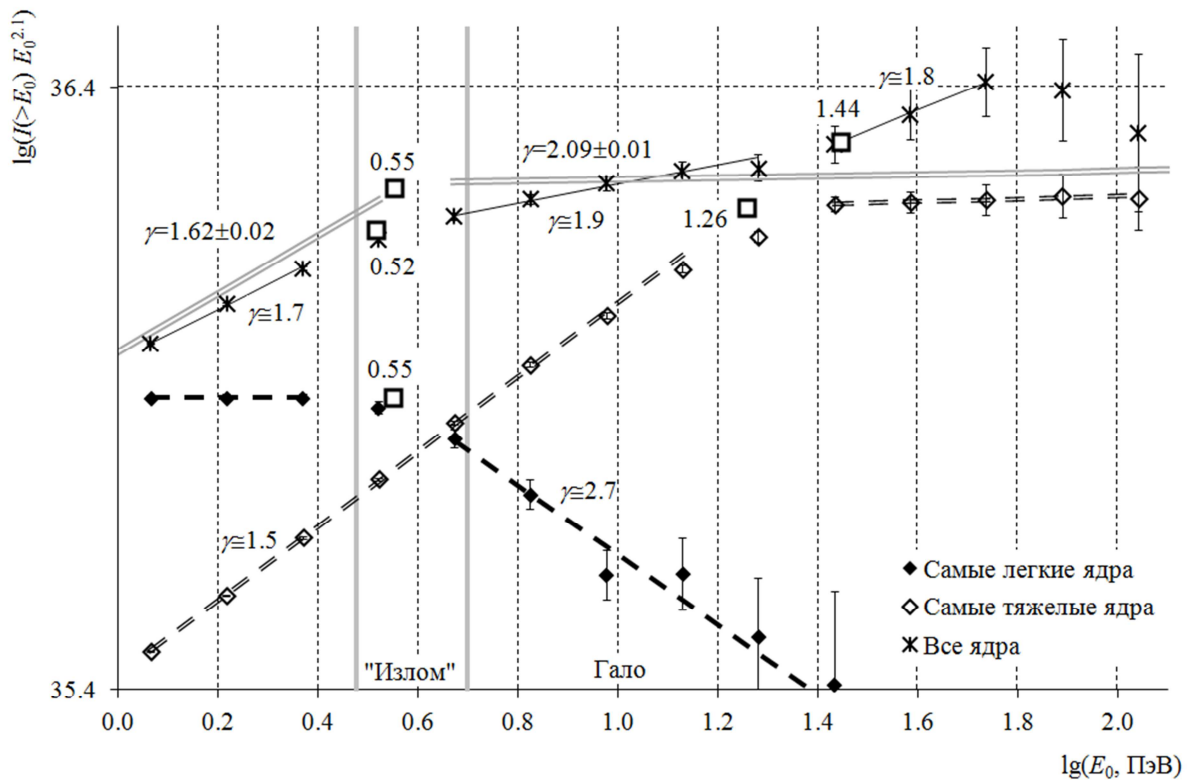


Рис.7 – Спектры групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ в зависимости от E_0 . Усредненный по статистике характеристик экспериментальных данных ШАЛ KASCADE-Grande спектр по E_0 обозначен двойной серой линией; регрессии групп ядер (пунктирные и сплошные линии) приведены с точками пересечения (пустые квадраты), определяющими изломы в спектрах групп ядер.

Показатели спектров групп самых легких и самых тяжелых ядер ПКИ, приведенные на рис.7, суммированы в табл.4. Из рис.7 и табл.4 получено, что излом в спектре по E_0 группы самых легких ядер в массовом составе ПКИ расположен при $E_0 = 3-5$ ПэВ, что соответствует излому в общем спектре ПКИ, построенному по всей статистике ШАЛ эксперимента KASCADE-Grande. Отсюда следует, что положение излома в спектре группы самых легких ядер определяет излом в спектре всех ядер. Излом в спектре группы самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ, регистрируемой в эксперименте KASCADE-Grande, расположен при $E_0 = 18$ ПэВ, что в сравнении с расположением излома в спектре по E_0 группы самых легких ядер указывает на утяжеление массового состава ПКИ в диапазоне $E_0 = 1-100$ ПэВ.

Табл.4 – Энергии, при которых наблюдаются нерегулярности в спектрах по E_0 групп ядер в массовом составе ПКИ.

Группы ядер ПКИ, регистрируемые в эксперименте	Диапазон по E_0 , ПэВ	Показатель спектра по E_0	Изломы в спектрах по E_0 , ПэВ
Группа самых легких ядер	1.2-2.3	2.100 ± 0.004	3-4
	5-27	2.68 ± 0.06	
Группа самых тяжелых ядер	1.2-13.4	1.482 ± 0.005	18
	27-110	2.075 ± 0.004	

В третьей главе диссертации:

1. Показано, что вероятности образования гало протонами, ядрами He и ядрами $>He$ различаются в несколько раз. Данный результат, а также то, что РЭК эксперимента ПАМИР регистрирует в основном события, образованные первичными протонами и, в меньшей степени, ядрами He, позволило оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ;
2. Анализ событий с гало, полученных в эксперименте ПАМИР, показал, что доля легких ядер при $E_0 = 10$ ПэВ составляет $(39 \pm 6)\%$. Уменьшение либо увеличение доли легких ядер в массовом составе ПКИ существенно снизит либо увеличит наблюдаемую в эксперименте ПАМИР статистику гало;
3. Анализ экспериментальных данных ШАЛ KASCADE-Grande методом $S_{\min-\max}$ показал, что в диапазоне $E_0 = 1-100$ ПэВ массовый состав ПКИ утяжеляется, однако доля легких ядер остается существенной при $E_0 = 10$ ПэВ, что не противоречит оценке доли легких ядер, выполненной методом гало по экспериментальным данным ПАМИР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации

В диссертации проанализирована доля легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 10$ ПэВ методом гало:

1. Проанализированы результаты экспериментов по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ. Показано, что в области излома

энергетического спектра ПКИ при $E_0 = 3-5$ ПэВ доли легких ядер, полученные в различных экспериментах, существенно различаются;

2. Для анализа данных эксперимента ПАМИР применена разработанная для метода РЭК модель ШАЛ+РЭК прохождения ШАЛ через РЭК ПАМИР. Модель ШАЛ+РЭК основана на данных моделирования по MC0-FANSY, описывающей такие экспериментальные параметры, как средний радиус и пробеги семейств γ -квантов в атмосфере, и ФПР e^\pm и γ -квантов, разработанных для эксперимента ПАМИР и учитывающих конфигурацию Г-блока РЭК ПАМИР.

Моделированием ШАЛ+РЭК показан количественный вклад подпороговых по энергии ($E_{0\gamma} < 1$ ТэВ) относительно метода РЭК γ -квантов в формирование площадей гало, а также получены гало с характеристиками, соответствующими экспериментальным, включая долю структурных гало и спектр площадей гало;

3. Статистика гало, доля структурных гало и вероятности образования гало сопоставлены с типами ядер ПКИ, инициировавшими ШАЛ. Показано, что статистика экспериментальных гало, – параметр, позволяющий оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ при условии, что вероятность образования гало легкими ядрами в несколько раз выше вероятности образования гало ядрами $>He$ (метод гало). Экспериментальная статистика гало соответствует доле легких ядер в массовом составе ПКИ $(39 \pm 6)\%$ при $E_0 = 10$ ПэВ.

Представленные в диссертации результаты подтверждают достижение поставленной цели, а именно получить количественный вклад γ -квантов с подпороговыми энергиями в формирование площадей гало с построением спектра всех площадей гало, в том числе площадей гало более 500 мм^2 , и на основании статистики экспериментальных гало оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ вблизи излома при $E_0 = 3-5$ ПэВ спектра ПКИ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ
ДИССЕРТАЦИИ

1. Puchkov V.S., Pyatovsky S.E. Origin of Gamma-Ray Families Accompanied by Halos and Detected in Experiments with X-Ray Emulsion Chambers//Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – Vol. 81. – No. 2. – pp. 222-230. – DOI: <https://dx.doi.org/10.1134/S1063778818020151>
2. Mukhamedshin R.A., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E., Shaulov S.B. Analysis of gamma-ray families with halos and estimation of mass composition of primary cosmic radiation at energies 1-100 PeV//Astroparticle Physics. – 2018. – 102. – pp. 32-38. – DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.05.005>
3. Mukhamedshin R.A., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E., Shaulov S.B. γ -families with halos observed by X-ray emulsion chamber in EAS and the estimate of the p +He fraction in primary cosmic rays at $E_0 = 1-100$ PeV//Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2017. – Vol. 44. – No. 12. – pp. 380-384. – DOI: <https://dx.doi.org/10.3103/S1068335617120090>
4. Puchkov V.S., Pyatovsky S.E. Estimation of the p +He fraction in the mass composition of primary cosmic radiation the energy range of $E_0 = 1-100$ PeV according to gamma-ray families featuring halo//Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – Vol. 83. – No 2. – pp. 237-246. – DOI: <https://dx.doi.org/10.1134/S1063778820010111>
5. Erlykin A.D., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E. The change of the primary cosmic radiation mass composition at energies $E_0=1-100$ PeV according to the KASCADE-Grande experiment data//Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – Vol. 84. – No 3.