Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель кандидат физико-математических наук В.С.Пучков

Содержание

ВВЕДЕНИЕ		3
ГЛАВА 1 ЭКСП	ЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ДОЛИ ЛЕГКИХ ЯДЕР В МАССОВОМ СОСТАВЕ ПКИ	14
1.1 Доля легн	ких ядер в массовом составе ПКИ	14
1.2 Модели Ц	ИАЛ	
1.2.1 Же	есткость модели ШАЛ	24
1.2.2 Mo	одель ШАЛ для эксперимента ПАМИР	
1.3 Эксперим	енты с РЭК	
1.3.1 Эк	сперимент ПАМИР	
1.3.2 Co	бытия, изучаемые в экспериментах с РЭК	
1.3.3 Да	нные эксперимента ПАМИР	
1.3.4 Да	нные эксперимента ЯБК	43
ВЫВОДЫ ПО ГЛАЕ	3E 1	45
ГЛАВА 2 МОДИ	ЕЛИРОВАНИЕ ГАЛО ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССОВОГО СОСТАВА ПКИ	47
2.1 Модель II	ИАЛ+РЭК описания данных эксперимент а ПАМИР	47
2.1.1 Mo	одель ШАЛ+РЭК реконструкции гало	51
2.1.2 Be	рификация модели ШАЛ+РЭК	
2.2 Характер	ИСТИКИ ИСКУССТВЕННЫХ ГАЛО	62
2.3 Модели о	БРАЗОВАНИЯ ГАЛО	76
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВ	BE 2	80
ГЛАВА З ОЦЕН	КА ДОЛИ ЛЕГКИХ ЯДЕР В МАССОВОМ СОСТАВЕ ПКИ	
3.1 Метод га	ЛО ОЦЕНКИ ДОЛИ ЛЕГКИХ ЯДЕР В МАССОВОМ СОСТАВЕ ПКИ	
3.2 Модельна	АЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОЦЕНКИ ДОЛИ ЛЕГКИХ ЯДЕР В МАССОВОМ СОСТАВЕ ПКИ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ Г	ало . 84
3.3 Доля леги	ких ядер в массовом составе ПКИ по многоцентровым гало	
3.4 Изменени	те массового состава ПКИ при E_0 = 1-100 ПэВ	
3.4.1 OI	ценка изменения массового состава ПКИ по S и N _µ	
3.4.2 Me	етод возраста ШАЛ S _{min-max} оценки изменения массового состава ПКИ	92
3.4.3 Сп	ектры групп самых легких и самых тяжелых ядер	94
3.5 Особенно	ОСТИ МЕТОДА ГАЛО	100
3.6 Обсужден	НИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ	100
3.6.1 Ти	пы ядер ПКИ, образовавшие события, регистрируемые в РЭК	101
3.6.2 Mo	одель ШАЛ+РЭК и метод гало	102
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВ	BE 3	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		105
СОКРАЩЕНИЯ И С	ЪБОЗНАЧЕНИЯ	106
ПУБЛИКАЦИИ АВТ	ГОРА С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДИССЕРТАЦИИ	107
ЛИТЕРАТУРА		112
Приложение А. І	Тримеры моделированных гало	132

Введение

Массовый состав первичного космического излучения (ПКИ) при $E_0 > 0.1$ ПэВ остается предметом научных дискуссий. Доля протонов в массовом составе ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ оценивается от 5% до 20%, доля легких ядер p+He, – до 70% и выше в зависимости от эксперимента и модели реконструкции развития широкого атмосферного ливня (ШАЛ) в атмосфере [1,3,4,12].

Методы оценки массового состава ПКИ основаны на изучении отношения N_{μ}/N_{e} в ШАЛ, максимума продольного развития ШАЛ (X_{max}) в атмосфере и других характеристик ШАЛ. Оценка массового состава ПКИ по N_{μ}/N_{e} предполагает регистрацию потока заряженных частиц в ШАЛ, по X_{max} , – регистрацию черенковского и радиоизлучения ШАЛ. По экспериментально полученным данным с применением модели прохождения ШАЛ через атмосферу делаются выводы о соотношении легких *p*+He и тяжелых >He ядер в массовом составе ПКИ, – при заданной E_0 массовый состав ПКИ с ростом N_{μ} и уменьшением X_{max} становится более тяжелым. Недостатки оценки массового состава ПКИ по N_{μ} и X_{max} , – большие флуктуации параметров индивидуальных ШАЛ и модельная зависимость оценок энергий (E_0) и массовых чисел (A) ядер ПКИ. Данное приводит к заметным ошибкам в оценке массового состава ПКИ и сложности разделения доли ядер различного типа в массовом составе ПКИ.

Актуальность диссертации. Знания о массовом составе ПКИ и, в частности, доле легких ядер позволяют анализировать нерегулярности энергетического спектра ПКИ и излом в спектре при $E_0 = 3-5$ ПэВ [28], установленный в 1958 г. в МГУ [122,123]. 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 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 ү-квантов с гало (гало), что позволило проанализировать массовый состав ПКИ и сделать вывод о доле легких ядер, малозависимый от моделирования ШАЛ.

Изученность проблемы. Изучение характеристик стволов ШАЛ на расстояниях несколько сантиметров от оси ШАЛ возможна с применением резистивных плоских счетчиков (РПС) [77] (например, эксперимент ARGO-YBJ [27]) и РЭК (например, эксперименты ПАМИР [29], ТШВНС (установка «Адрон») [107], ЯБК [30]). В отличие от метода РЭК, применение 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 РЭК [29] является единственным методом, позволяющим изучать структуру стволов ШАЛ с высоким координатным разрешением до 30 мкм. Методом РЭК изучены такие характеристики стволов 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 прохождения ШАЛ через атмосферу (Р.А.Мухамедшин [24,25]). 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 ү-квантов появились после того, как в ЯБК в 1970 г. было зарегистрировано гало с большой площадью (950 мм²), названное гало «Андромеда». Впервые вопрос о природе гало был поставлен в работах Л.Т.Барадзей [87,88]. Возможные объяснения гало рассмотрены в работах A.Ohsawa [89]. В дальнейшем искусственные гало, но с площадями, не пре-500 мм², вышающими были получены В работах Т.М.Рогановой И А.К.Манагадзе (НИИЯФ МГУ им. М.В.Ломоносова) [134,137,138]. Однако количественный вклад подпороговых относительно метода РЭК ($E_{0\gamma} < 1$ ТэВ)

ү-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.

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, регистрируемые в эксперименте, как $\langle R \rangle$, а также структурность гало, чувствительны к массовому составу ПКИ в силу локализации высокоэнергичных γ -квантов в стволах ШАЛ.

Цель диссертации. Цель диссертации состоит в исследовании количественного 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.

Задачи диссертации. Для достижения поставленной цели диссертации решены задачи:

- Анализ доли легких ядер в массовом составе ПКИ, полученной в ряде экспериментов (с. 14-21);
- Анализ характеристик экспериментальных семейств γ-квантов и гало, регистрируемых методом РЭК (с. 28-45);
- 2.4. Количественное объяснение вклада γ-квантов различных энергий, в т.ч. подпороговых, в формирование площадей экспериментально получен-

5

ных гало с целью применения характеристик гало для оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ (с. 47-62);

- Объяснение экспериментально полученного спектра площадей гало с применением моделированных для эксперимента ПАМИР функций пространственного распределения (ФПР) е[±] и γ-квантов (с. 62-76);
- 3.7. Оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ по статистикам экспериментально полученных одноцентровых и многоцентровых гало и модельным вероятностям образования гало (с. 82-88);
- 3.8. Анализ изменения спектров групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ при E₀ = 1-100 ПэВ (с. 88-100).

Методологическая основа диссертации. 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 КАSCADE-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.

Научная новизна диссертации. 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:

- Получение количественного вклада γ-квантов с подпороговыми энергиями в формирование площадей гало и площадей гало более 500 мм²;
- 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 диссертации. 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.

Степень достоверности и апробация результатов диссертации. 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 диссертации автором либо в соавторстве опубликованы 24 статьи, последние из которых приведены в разделе «Публикации автора с результатами диссертации».

Вклад автора в результаты диссертации. Результаты диссертации без ссылок на раздел «Литература» (с. 112-131) получены автором. Результаты диссертации со ссылками на раздел «Публикации автора с результатами диссертации» (с. 107-112) получены в соавторстве.

- 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 е[±] и γ-квантов;
- Получен количественный вклад в формирование площадей гало подпороговых по энергии γ-квантов, в том числе в площади гало более 500 мм². Показано, что гало образованы перекрытием каскадов от подпороговых (*E*_{0γ} < 1 ТэВ), относительно метода РЭК, γ-квантов в стволах

ШАЛ, и основной вклад в образование гало больших площадей вносят γ кванты с энергиями $E_{0\gamma} = 100 \ \Gamma \Rightarrow B - 1 \ T \Rightarrow B$. Вклад γ -квантов с энергиями менее 100 $\Gamma \Rightarrow B$ в формирование площадей гало не превышает 15-20%;

- 3. 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 E₀ = 10 ПэВ составляет (39 ± 6)%. При меньшей доле легких ядер полученная в эксперименте ПАМИР статистика гало наблюдаться не будет;
- 5. Показано, что в диапазоне $E_0 = 1-100$ ПэВ массовый состав ПКИ утяжеляется. Предложенный метод возраста ШАЛ $S_{\min-max}$ 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 $E_0 = 1-100$ ПэВ.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Объяснено явление «гало» с количественной оценкой определяющего вклада подпороговых γ-квантов в стволах ШАЛ при формировании гало [2];
- Построены модельные спектры площадей гало, в том числе с площадями гало более 500 мм², соответствующие полученным спектрам площадей гало в экспериментах с РЭК [2,3];
- Получены смоделированные гало всего спектра площадей, в т.ч. гало с площадями более 500 мм², характеристики которых, такие как поток гало, спектр площадей гало, доля структурных гало и распределение гало по ΣE_{0γ}, соответствуют характеристикам экспериментально полученных гало [1,3];

4. Проведена оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ, составившая $(39 \pm 6)\%$ при $E_0 = 10$ ПэВ, с применением метода гало [1,3,4].

В первой главе диссертации выполнен сравнительный анализ данных экспериментов по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ. 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.

Показана чувствительность 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.

Во второй главе диссертации верифицирована модель ШАЛ+РЭК одноцентровых и многоцентровых гало, регистрируемых в РЭК эксперимента ПАМИР. Применены ФПР е[±] и γ-квантов, учитывающие особенности РЭК эксперимента ПАМИР. Модель ШАЛ+РЭК с применением разработанных для эксперимента ПАМИР ФПР позволила количественно согласовать характеристики искусственных и экспериментальных гало.

Проанализированы события, регистрируемые методом РЭК в стволах ШАЛ. Показано, что средний радиус семейств γ -квантов $\langle R \rangle$, статистика гало и доля структурных гало чувствительны к массовому составу ПКИ в необходимом диапазоне E_0 .

Получены искусственные гало, характеристики которых соответствуют характеристикам экспериментальных гало, включая не объясненные ранее спектры всех площадей гало. Сделан вывод, что статистика одноцентровых и многоцентровых гало является экспериментальным параметром, позволяющим оценить долю легких ядер 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 по экспериментально полученной статистике гало и модельным вероятностям образования гало ядрами ПКИ различного типа.

В третьей главе диссертации показано, что вероятности образования гало протонами, ядрами Не и ядрами >Не 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 Не, позволило оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ.

Выполнен анализ экспериментальных данных ШАЛ KASCADE-Grande методом $S_{\text{min-max}}$. Показано, 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.

В заключении приведены основные результаты диссертации. 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 мм², и на основании статистики экспериментальных гало оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ вблизи излома при $E_0 = 3-5$ ПэВ спектра ПКИ.

На защиту выносятся основные результаты диссертации:

- Объяснение явления «гало» с количественной оценкой определяющего вклада подпороговых γ-квантов в стволах ШАЛ при формировании гало. Построение модельного спектра площадей гало, в том числе с площадями гало более 500 мм², соответствующего полученным спектрам площадей гало в экспериментах с РЭК [2,3];
- Получены искусственные гало всего спектра площадей, в т.ч. гало с площадями более 500 мм², 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 [1,2,3];
- Оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ, составляющая (39 \pm 6)% при $E_0 = 10$ ПэВ, с применением метода гало [1,3,4].

Данные для диссертации получены из обработки результатов экспериментов ПАМИР [29], ТШВНС [107], ЯБК [30], KASCADE-Grande [31] и других экспериментов.

Результаты диссертации. Результаты диссертации изложены [1-23]:

В.С. Пучков, С.Е. Пятовский. Доля легких ядер *p+He* в составе первичного космического излучения при *E0* = 1-100 ПэВ и природа гало в стволах широких атмосферных ливней//ФИАН. Основные результаты научной деятельности. – 2018. – URL: https://www.lebedev.ru/data/docs/2018.pdf (дата доступа: 28.01.2021).

Материалы научных конференций:

- Borisov A., Denisova V.G., Guseva Z.M., Kanevskaya E.A., Kogan M.G., Morozov A.E., Mukhamedshin R.A., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E., Shaulov S.B., Shoziyoev G., Smirnova M.D. Gamma-ray families with halos: main characteristics and possibilities of using them to estimate the *p+He* fraction in the mass composition of cosmic rays at energies 1-100 PeV//EPJ Web of conferences. – Ser. 19th International Symposium on very high energy cosmic ray interactions, ISVHECRI 2016, Moscow. – 2017. – pp. 19008. – DOI: https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201614519008. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=31054258 (accessed: 28.01.2021).
- Puchkov V.S., Borisov A., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Kogan M.G., Maximenko V.M., Morozov A.E., Mukhamedshin R.A., Pyatovsky S.E., Smirnova M.D. The protons in primary cosmic rays in the energy range 1015-1017 eV according to data from the PAMIR experiment//Proceedings of the 32nd International cosmic ray conference, ICRC 2011. Beijing, Aug. 11-18, 2011. – 2011. – p. 182-184. – DOI: https://dx.doi.org/10.7529/ICRC2011/V01/0143. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21882513 (accessed: 28.01.2021).
- 4. Puchkov V.S., Borisov A.S., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Maximenko V.M., Pyatovsky S.E., Slavatinsky S.A. Mass composition of primary cosmic rays at energies of 1-1000 PeV according to data of experiment «PAMIR»//XIII International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 2004, Pylos. Nuclear physics B – Proceedings supplements.

11

2006. - V.151. - N1. - pp. 236-239. - DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2005.07.066. - URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13526399 (accessed: 28.01.2021).

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЕ ЖУРНАЛЫ

- 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. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35480614 (accessed: 28.01.2021).
- 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. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=34857714; https://elibrary.ru/item.asp?id=35491989 (accessed: 28.01.2021).
- 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 *E0*=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. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32322308; https://elibrary.ru/item.asp?id=35539431 (accessed: 28.01.2021).
- 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 2.

6. Puchkov V.S., Borisov A., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Kogan M.G., Maximenko V.M., Morozov A.E., Mukhamedshin R.A., Pyatovsky S.E., Smirnova M.D. Fraction of protons in primary cosmic rays according to data from the PAMIR experiment in consideration of the response of X-ray emulsion chambers//Bulletin of the Russian academy of sciences: No3. pp. 392-394. Physics. _ 2011. _ Vol.75. _ _ DOI: https://dx.doi.org/10.3103/S106287381103035X. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=16982611 (accessed: 28.01.2021).

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 139 страницах, состоит из введения, трех глав, выводов по главам, заключения, списка публикаций автора с результатами диссертации и списка литературы, включающих 178 наименований.

Благодарности. Автор благодарит коллаборацию ПАМИР [29] под рук. С.А.Славатинского, по экспериментальным данным которой выполнено диссертационное исследование; В.С.Пучкова [97] за обсуждение вопросов обработки данных эксперимента ПАМИР, научные дискуссии, нацеленные на поиск рациональных объяснений полученных экспериментальных результатов; Р.А.Мухамедшина [24,25] за предоставленный код модели МСО-FANSY, использованный в диссертации для моделирования ШАЛ.

Глава 1 Эксперименты по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ

1.1 Доля легких ядер в массовом составе ПКИ

Ранее предполагалось, что в массовом составе ПКИ в области излома спектра по энергии при $E_0 = 3.5$ ПэВ преобладают легкие ядра *p*+He [32]. В настоящее время есть указания, что массовый состав ПКИ утяжеляется начиная с $E_0 = 1$ ПэВ. Основной научный интерес представляет массовый состав ПКИ при $E_0 = 3.5$ ПэВ (излом и бамп в спектре по энергии ПКИ), $E_0 = 3$ ЭэВ (лодыжка) и $E_0 > 30$ ЭэВ (ГЗК предел). В соответствии с диффузионной моделью распространения КЛ дискутируются две точки зрения на природу первого излома в спектре по E_0 ПКИ:

- Легкие ядра выбывают из массового состава ПКИ начиная с E₀ = 1-10 ПэВ, формируя излом, что соответствует данным эксперимента KASCADE-Grande [38];
- Протоны выбывают из массового состава ПКИ значительно раньше, начиная с $E_0 = 0.3$ ПэВ, что соответствует данным экспериментов Tibet AS γ (показатель спектра протонов меняется от -2.74 до -3.06 при $E_0 =$ 0.3 ПэВ) [35,105], ATIC [104], EAS-TOP [33], и излом в спектре по энергии ПКИ при $E_0 = 3$ ПэВ связан с выбытием уже тяжелых ядер.

При $E_0 < 0.1$ ПэВ массовый состав ПКИ изучается в прямых измерениях на аэростатах и спутниках (например, баллонные эксперименты JACEE, RUNJOB и CREAM). При $E_0 > 0.1$ ПэВ, когда начинают формироваться излом и бамп в спектре по E_0 ПКИ, – по результатам моделирования данных экспериментов с ливневыми установками (например, эксперименты Tunka и KASCADE-Grande) [128,129].

В настоящее время данные для моделей ШАЛ согласованы с результатами экспериментов на LHCf до эквивалентной энергии $E_0 = 100$ ПэВ. Основная цель моделирования ШАЛ состоит в получение таких параметров ПКИ, как массовые числа (A) и энергии первичных ядер E_0 . Результаты обработки экспериментальных данных с целью оценки A и E_0 включают изучение (i) продольного развития ШАЛ с оценкой максимума развития электромагнитного (ЭМ) каскада в атмосфере X_{max} , (ii) распределения по N_e и N_{μ} на уровне наблюдения с оценкой $N_{e \text{ total}}$, $N_{e \text{ max}}$ и $N_{\mu \text{ total}}$, $N_{\mu \text{ max}}$, (iii) построение и анализ функции Нишимуры-Каматы-Грейзена (НКГ) с оценкой возраста ШАЛ *S*.

- (i) Изучение продольного развития ШАЛ предполагает использование атмосферы как калориметра, где отслеживаемые частицы изучаются посредством флюоресценции (например, эксперименты HiRes, The Pierre Auger Observatory, Telescope Array) и черенковского излучения (например, эксперименты HEGRA (MAGIC), CASA-BLANCA (CASA-MIA) [120], Tunka [50,51,52,53,54,57,58], Yakutsk EAS [116]), что требует применения моделей ШАЛ с низкими порогами по энергиям отслеживаемых частиц. Анализ экспериментальных данных, выполненных в ряде исследований (см. ф.(1.2)), показал, что функция X_{max}(E₀) для данного типа ядра ПКИ зависит от модели.
- (ii) Изучение распределений по N_e и N_µ и измерение N_{e max} и N_{µ max} в калориметре на уровне наблюдения требует модельного учета более высоких флуктуаций параметров ШАЛ. Выделившаяся в калориметре энергия определяется как E₀ ≈ εN_{e max}, где ε – критическая энергия вещества калориметра, не зависящая от массовых чисел A ядер ПКИ, инициировавших ШАЛ.

Количество мюонов N_{μ} растет со значениями массовых чисел A ядер ПКИ в соответствии с моделью Мэтьюса-Гейтлера:

$$N_{\mu A}(E_0) \approx A(E_0 / A)^{\beta} = E_0^{\beta} A^{1 - \beta}$$
$$N_{\mu A} \approx N_{\mu p \max} A^{1 - \beta} \sim A^{1 - \beta}$$
(1.1)

где $N_{\mu p} \approx (E_0 / \varepsilon_{\pi})^{\beta}$, ε_{π} – энергия π^{\pm} , β – показатель, определяющий долю π^{\pm} в $\pi^{0,\pm}$, $\beta = \ln(2/3N) / \ln N$. Моделирование ШАЛ с целью установления параметров ф.(1.1) показало, что $\beta = 0.88$ -0.92 [106], что соответствует эффективной множественности рождения $\pi^{0,\pm} N = 29$ -159.

К экспериментам, реализующим комбинации экранированных и неэкранированных сцинтилляционных детекторов на уровне наблюдения для измерения N_e/N_{μ} , относятся AGASA [115], CASA-MIA, EAS-TOP [33], GRAPES [40], KASCADE-Grande [31,32], GAMMA, Yakutsk EAS [116].

В эксперименте The Pierre Auger Observatory использованы водные черенковские детекторы глубиной 1.2 м, что позволило проводить идентификацию мюонов. Средняя энергия e^{\pm} и γ -квантов на уровне наблюдения 10 МэВ, в то время как средняя энергия мюонов 1 ГэВ. Однако $N_e \gg N_{\mu}$ и e^{\pm} и γ кванты образуют большое количество малых черенковских импульсов, в то время как мюоны, – малое количество больших черенковских импульсов. Аналогичная технология сепарации мюонов применена в эксперименте Ice-Top, где вместо воды использован лед. Порог по энергии мюонов в эксперименте IceTop 0.5 ТэВ и чувствительность экспериментальной установки к массовому составу ПКИ достигается регистрацией сочетания электроннофотонной компоненты (ЭФК) ШАЛ и высокоэнергичных мюонов, образованных в первых актах ядерных взаимодействий в атмосфере. Аналогичная комбинация наземных и подземных детекторов применена в экспериментах EAS-TOP [33] и MACRO [33,34].

(iii) Анализ ФПР НКГ. По N_e и N_{μ} возможны оценки E_0 и A ядер ПКИ. Параметрами функции НКГ являются возраст ШАЛ S и количество частиц $N_{e,\mu}$ в ШАЛ на уровне наблюдения. Значение S находится в диапазоне 0.1-1.5 и с ростом N_e для данного типа ядра значение S уменьшается. При заданном N_e возраст ШАЛ S, образованных легкими ядрами меньше, нежели возраст S от тяжелых ядер ПКИ.

Возраст ШАЛ *S* зависит от массового числа *A* ядра ПКИ и, как следствие, X_{max} . Зависимость $S(X_{\text{max}})$ рассмотрена по данным эксперимента ARGO-YBJ в [39]. По данным [39], для различных типов ядер ПКИ получена регрессия (см. ф.(3.19)), из которой следует, что глубине экспериментальной установки ПАМИР $H_{\Pi AMUP} = 594$ г/см² соответствуют ШАЛ, образованные преимущественно протонами.

Оценка N_{μ} , характеризующего массовое число A ядра ПКИ, в эксперименте KASCADE-Grande выполнена по ФПР НКГ, где показано, что начиная с $E_0 = 10$ ПэВ с ростом E_0 экспериментально полученный рост N_{μ} превышает расчетный [127]. Данное явление получило название «мюонный пазл». Доля

16

протонов в массовом составе ПКИ при $E_0 = 10$ ПэВ по данным KASCADE-Grande составила <10% (см. Рис.1.3). Также из анализа N_{μ} быстро утяжеляющийся массовый состав ПКИ в диапазоне энергий $E_0 = 1-100$ ПэВ получен в эксперименте ШАЛ МГУ (см. Табл.1.1) [124,125].

Табл.1.1 – Доля легких ядер в массовом составе ПКИ по данным эксперимента ШАЛ МГУ [124].

<i>E</i> ₀ , ПэВ	Протоны, %	He, %
1	24.5 ± 4	28.5 ± 7
10	9.9 ± 4	23.2 ± 6
100	3.3 ± 2	7.9 ± 4

Значительная доля легких ядер в массовом составе ПКИ в области излома получена А.Д.Ерлыкиным по модели локального источника [142], где показано, что при $E_0 = 3.5$ ПэВ доля протонов и ядер Не в массовом составе ПКИ составляет 48% и 40% соответственно (см. Табл.1.2), что в два раза выше минимальной доли легких ядер, полученной в эксперименте ПАМИР методом гало [4].

Табл.1.2 – Массовый состав ПКИ по модели локального источника Vela Ерлыкина-Павлюченко при $E_0 = 3-5$ ПэВ [141,142].

Протоны, %	He, %	CNO, %	M, %	Fe, %
48 ± 14	40 ± 6	8 ± 1	1.0 ± 0.3	3 ± 1

На Рис.1.1 приведен спектр по E_0 ПКИ в области излома по данным экспериментов EAS-TOP, Tibet III, IceTop, Tunka, Akeno, KASCADE-Grande, BLANCA, GAMMA, HiRes II, ARGO-YBJ, DICE, CASA-MIA и ПАМИР [14]. Результаты гибридных экспериментов EAS-TOP и MACRO [33,34], экспериментов Tibet AS γ , BASJE [35,36], CASA-MIA Collaboration [37] показали уменьшение доли легких ядер в массовом составе ПКИ в области излома спектра по энергии при $E_0 = 3$ ПэВ. Согласно данным эксперимента KASCADE-Grande [38] доля протонов в диапазоне $E_0 = 1-100$ ПэВ не превышает 10%. Результаты эксперимента ARGO-YBJ показали, что доля легких ядер начинает уменьшаться уже при $E_0 = 1$ ПэВ и массовый состав ПКИ существенно утяжеляется [39].



Рис.1.1 – Спектр по *E*₀ ПКИ [39,49].

На Рис.1.2 приведены данные экспериментов KASCADE-Grande, ARGO-YBJ, RUNJOB, Tibet III, CREAM, PAMELA, AMS-02 [143], Tunka, IceCube, The Pierre Auger Observatory [39,49], где оценены доли протонов и легких ядер в массовом составе ПКИ в диапазоне $E_0 = 0.1$ ТэВ – 0.1 ЗэВ. Сплошными линиями показаны минимальная доля протонов и максимальная доля легких ядер при различных E_0 , пунктиром, – возможные усредненные доли протонов и *p*+He. Можно предположить, что при $E_0 = 10$ ПэВ минимальная доля протонов составляет 20% [18,21,22], доля легких ядер 40%, что было подтверждено дальнейшими результатами диссертационного исследования.

Из Рис.1.2 также следует, что при $E_0 = 0.1$ -1 ПэВ:

- Доля протонов, полученная в эксперименте KASCADE-Grande, не противоречит оценке доли протонов по данным аэростатного прямого эксперимента CREAM;
- Доля легких ядер, полученная в эксперименте ARGO-YBJ с применением РПС, не противоречит оценке доли легких ядер, полученной в эксперименте CREAM.



Рис.1.2 – Доля протонов и легких ядер в массовом составе ПКИ [39,49,117].

В работах коллабораций KASCADE-Grande [47], Tunka [57,58], Tunka-Rex [51,59] и других экспериментов обсуждаются два аспекта, относящихся к оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ.

Первый аспект состоит в оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ при данной Е₀. Второй, – утяжеляется либо становится более легким массовый состав ПКИ с изменением Е0 в области первого излома спектра ПКИ. На Рис.1.3 приведено изменение доли протонов и *p*+He в массовом составе ПКИ в диапазоне $E_0 = 1-100$ ПэВ по данным экспериментов ПАМИР, KASCADE-Grande [32,47,48,49], ARGO-YBJ [39], Tunka [50,51,52,53,54], IceCube [55] и СФЕРА-2 [117]. Из Рис.1.3 следует, что результаты эксперимента ПАМИР по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ при E_0 = 10 ПэВ на основе анализа событий с гало показали хорошее согласие с результатами экспериментов Tunka и IceCube (см. Табл.1.3). Расхождения в доле протонов и p+He по данным экспериментов ПАМИР, Tunka и IceCube с данными экспериментов KASCADE-Grande и ARGO-YBJ составляет 15-20% и связаны с применяемыми при оценках массового состава моделями ШАЛ. Например, в эксперименте IceCube+IceTop [56] моделирование с применением нейронных сетей изменения $<\ln A >$ в диапазоне $E_0 = 3 \Pi \Rightarrow B - 1 \Rightarrow B$ показало утяжеление массового состава ПКИ начиная с $E_0 = 5$ ПэВ от среднего значения массового числа $\langle A \rangle = 7-10$ до $\langle A \rangle = 13-40$.

Табл.1.3 – Соответствие оценок доли легких ядер в массовом составе ПКИ, полученных в ряде экспериментов, данным эксперимента ПАМИР при $E_0 = 10$ ПэВ (см. Рис.1.2 и Рис.1.3).

	KASCADE -Grande	ARGO- YBJ	ШАЛ МГУ (Табл.1.1)	Vela (Табл.1.2)	Tunka	IceCube	СФЕРА-2
Протоны	Нет	-	Нет	Нет	Да	Да	-
Легкие ядра,	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Да
%	9-27	8-23	3-25	88	31-52	24-70	23-35



Рис.1.3 – Доля протонов и *p*+He в массовом составе ПКИ по данным экспериментов KASCADE-Grande [32,47,48,49], ARGO-YBJ [39], Tunka [50,51,52,53,54], IceCube [55], СФЕРА-2 [117,118,119] и ПАМИР [4].

По данным эксперимента KASCADE-Grande, размещенным в открытом доступе [31], выполнен анализ массового состава ПКИ, результаты которого приведены в Табл.1.4. Анализ показал, что в диапазоне $E_0 = 0.1-10$ ПэВ основное количество событий соответствует группе ядер He-CNO. При $E_0 \ge 5$ ПэВ доля протонов существенно снижается и массовый состав ПКИ смещается к тяжелым ядрам.

Табл.1.4 – Зависимость $\langle A \rangle$ от E_0 , поученная из анализа первичных данных эксперимента KASCADE-Grande.

$lg(E_0, \Im B)$	14.0-14.5	14.5-15.0	15.0-15.5	15.5-16.0	16.0-16.5
<a>	3 (<i>p</i> +He)	5	7	10	13 (CNO)

Из Рис.1.2 следует, что оценки доли легких ядер и изменение доли легких ядер в массовом составе ПКИ с E_0 существенно различаются по данным различных экспериментов. Наибольшее расхождение результатов экспериментов в оценке доли легких ядер наблюдается при $E_0 = 10$ ПэВ. Согласно данным ARGO-YBJ доля легких ядер составляет 10%, IceCube, – 60%. Разница в 50% указывает на необходимость более точной и модельномалозависимой оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 =$ 10 ПэВ. Необходимо изучение стволов ШАЛ, где максимально сохранена информация о характеристиках первых актов взаимодействий ядер ПКИ с атомами атмосферы.

1.2 Модели ШАЛ

Модели ШАЛ разделены на модели для описания экспериментальных данных, полученных на ливневых установках, и модели, разработанные для описания экспериментальных данных, полученных методом РЭК.

Модели ШАЛ реализованы, например, в программном комплексе (ПК) CORSIKA [60,61]. В моделях QGSjet, EPOS, EPOS-LHC, SIBYLL изучаются ШАЛ с энергиями отслеживаемых частиц >200 ГэВ, в то время как для описания экспериментальных данных РЭК необходим учет более низких энергий отслеживаемых частиц. GEANT и FLUKA моделируют ШАЛ с энергиями отслеживаемых частиц <200 ГэВ [63], однако максимальная энергия ядер ПКИ составляет 10 ТэВ в модели FLUKA, либо 10 ПэВ в составе с DPMJET.

Для описания данных экспериментов с РЭК и, в частности, данных эксперимента ПАМИР необходим учет энергий $E_0 > 100$ ПэВ, при которых вклад в образование гало начинает вносить группа сверхтяжелых ядер в массовом составе ПКИ, а также подпороговых относительно метода РЭК γ -квантов в стволе ШАЛ с энергиями 1 ТэВ и ниже. Исследования показали, что подпороговые γ -кванты определяют характеристики семейств γ -квантов в стволе ШАЛ, регистрируемых методом РЭК на РГП.

Моделирование не отдельных γ -квантов, но диффузных пятен потемнения на РГП (гало) требует учета подпороговых γ -квантов с $E_{0\gamma} < 1$ ТэВ. В сотрудничестве ПАМИР разработана модель ШАЛ МСО-FANSY (Р.А.Мухамедшин [24,25,64]), верифицированная по данным эксперимента ПАМИР, учитывающая последние данные LHCf и с порогом по энергии отслеживаемых в ШАЛ частиц 100 ГэВ и ниже. Дополнительно к MC0-FANSY моделированием получены ФПР е[±] и γ -квантов при прохождения ШАЛ через Г-блок РЭК, учитывающие конфигурацию РЭК ПАМИР (В.В.Учайкин [26]). При выборе модели ШАЛ необходим учет того, что положение X_{max} определяется сечением неупругого взаимодействия ядер ПКИ с атомами атмосферы σ_{inel} , зависящим от x_{F} . В модели МСО-FANSY [24,25,65], применяемой для моделирования данных эксперимента ПАМИР, σ_{inel} не противоречит данным LHCf и одновременно обеспечивает измеряемое в эксперименте с РЭК значение среднего радиуса семейств γ -квантов <R> [24,25,64].

В МСО-FANSY к характеристикам сильных взаимодействий отнесены общие для моделей ШАЛ параметры K_{inel} , x_F , $\sigma^{h\text{-air}}$, распределения по множественности и поперечным импульсам p_{\perp} вторичных частиц ($\tau_0 \gtrsim 0.1 \text{ nc}$) и другие [24]. МСО-FANSY хорошо описывает данные LHCf при низких энергиях и, по мере получения новых данных на LHCf, параметры модели корректируются [65]. В частности, σ_{inel} , полученные на LHCf в различных экспериментах [79,80,81], σ_{inel} [мб](7 ТэВ) = $68 \pm 2_{syst} \pm 2_{lumi} \pm 4_{extrap}$ и применяемые в МСО-FANSY, одинаковы в пределах ошибок и не противоречат экспериментальным данным LHCf. Распределения по множественности вторичных частиц в модели МСО-FANSY соответствуют распределениям, полученным в экспериментах на LHCf, в пределах 10%-й погрешности.

Распределения по $x_{\rm F}$ в *p*-N¹⁴ взаимодействиях при $E_0 = 10$ ПэВ в соответствии с расчетами по MCO-FANSY приведены в [24], по которым получена оценка, что 50% частиц в ШАЛ имеют p_{\parallel} , соответствующие $x_{\rm F} < 0.06$, т.е. максимально высокоэнергичные γ -кванты, или максимальный поток энергии, локализованы в стволе ШАЛ. Отсюда следует, что γ -кванты, локализованные в стволе ШАЛ, образуют диффузные области потемнений на РГП, наблюдаемые как гало, что было подтверждено дальнейшими результатами диссертационного исследования.

Несущественные для решаемых в диссертации задач неточности моделирования могут быть связаны, например, с тем, что экспериментальное значение *<R>*, применяемое для верификации MC0-FANSY применительно к методу РЭК, определяется распределениями по $x_{\rm F}$ и p_{\perp} с узкими интервалами по η [75] 8.81 *<* $|\eta|$ *<* 8.99, данных LHCf по которым недостаточно.

1.2.1 Жесткость модели ШАЛ

Жесткая модель адронных взаимодействий (в научных публикациях принят термин «жесткие и мягкие спектры вторичных частиц» в моделях ШАЛ), – модель, где восстанавливаемые спектры вторичных частиц $dN/dx_F \sim d\sigma/dx_F$ более пологие относительно мягкой модели адронных взаимодействий. Более жесткие модели характеризуются более медленной диссипацией энергии в ШАЛ и более медленным ростом сечения взаимодействия частиц в ядерно-активной компоненте ШАЛ. К наиболее жесткой группе моделей относится FLUKA+DPMJET, к наиболее мягкой, – QGSjet [75]. В самых ранних расчетах по моделированию экспериментальных данных, полученных методом РЭК, выбраны модели MQ (А.М.Дунаевский [112]) и QGSjet как наиболее точно описывающие данные эксперимента ПАМИР.

С ростом E_0 количество заряженных частиц N_e в ШАЛ растет и X_{max} смещается вглубь атмосферы. По результатам моделирования, выполненным в [60,67,68,69,70,71,72], получены зависимости $X_{max}(E_0[\Pi \ni B])[r/cm^2]$ для протонов и ядер Fe в массовом составе ПКИ, следующие из моделей SIBYLL, EPOS-LHC и QGSjet:

$$X_{\text{max p}}^{\text{SIBYLL}} = (57.9 \pm 0.7) \lg E_0 + (583 \pm 2), R_a^2 = 0.99$$

$$X_{\text{max p}}^{\text{EPOS-LHC}} = (54.9 \pm 0.4) \lg E_0 + (579 \pm 1), R_a^2 = 1.00$$

$$X_{\text{max p}}^{\text{QGSjet}} = (53.3 \pm 0.2) \lg E_0 + (569 \pm 1), R_a^2 = 1.00$$

$$X_{\text{max Fe}}^{\text{SIBYLL}} = (61.9 \pm 0.7) \lg E_0 + (464 \pm 3), R_a^2 = 0.99$$

$$X_{\text{max Fe}}^{\text{EPOS-LHC}} = (59.1 \pm 0.6) \lg E_0 + (468 \pm 2), R_a^2 = 0.99$$

$$X_{\text{max Fe}}^{\text{QGSjet}} = (55.7 \pm 0.8) \lg E_0 + (467 \pm 3), R_a^2 = 0.99, \quad (1.2)$$

Из ф. (1.2) следует разница ΔX_{max} между ШАЛ, инициированных протонами и ядрами Fe в массовом составе ПКИ $X_{\text{max p}} - X_{\text{max Fe}} = (111 \pm 2)$ г/см². Из ф.(1.2) следует, что при одинаковых энергиях ядер ПКИ $X_{\text{max}}^{\text{SIBYLL}} > X_{\text{max}}^{\text{EPOS-LHC}} > X_{\text{max}}^{\text{QGSjet}}$, т.е. SIBYLL самая «жесткая» по энергиям отслеживаемых частиц модель, обеспечивающая более пологий спектр по отслеживаемым частицам и больший средний радиус семейств γ -квантов $\langle R \rangle$ на РГП. QGSjet, – самая «мягкая» модель с более крутым спектром по отслеживаемым частицам и меньшим средним радиусом семейств γ-квантов <*R*> на РГП.

Группа моделей FLUKA+DPMJET с порогом отслеживаемых частиц ниже 200 ГэВ и максимальной $E_0 = 10$ ПэВ [63] более жесткая по спектру үквантов, нежели SIBYLL, в интервале 8.81 < $|\eta|$ < 8.99 и LHCf $\sqrt{s} = 13$ ТэВ с эквивалентной энергией $E_0 = 90$ ПэВ [75]. Однако из оценок X_{max} [66] и аппроксимации ф.(1.2) следует, что жесткие и мягкие модели для данных типа ядра и E_0 дают результаты в пределах ошибок.

Анализ моделей ШАЛ показал, что модель SIBYLL хуже описывает данные эксперимента ПАМИР, нежели модель QGSjet. С другой стороны SIBYLL, – модель, где отслеживаются, например, чармированные частицы, учет которых необходим при моделировании результатов эксперимента ПАМИР с РЭК с воздушным зазором [102].

Из условия $X_{\text{max p}} \,^{\text{QGSjet}} = X_{\text{max Fe}} \,^{\text{SIBYLL}}$ (см. ф.(1.2)) следует, что эффективная регистрация ШАЛ от ядер Fe начинается через 1.5-2 порядка по E_0 относительно ШАЛ, образованных первичными протонами. Для уровня эксперимента ПАМИР $H_{\Pi AM MP} = 594 \,\text{г/cm}^2$ из ф.(1.2) следует, что максимуму продольного развития ШАЛ, инициированных протонами, соответствует $E_0 = 2$ -3 ПэВ, от Fe, $-E_0 = 100\text{-}200 \,\text{ПэB}$. С учетом степенного по E_0 спектра ПКИ события, регистрируемые в РЭК, образованы, в основном, легкими ядрами массового состава ПКИ. На основании ф.(1.2) для $X_{\text{max p}} = 594 \,\text{г/cm}^2$ (глубина атмосферы в РЭК эксперимента ПАМИР) можно предположить, что регистрация гало, образованных протонами, в эксперименте ПАМИР начинается с $E_0 = 3 \,\Pi$ эВ, что было подтверждено дальнейшими результатами диссертационного исследования.

Возможность применения модели MC0-FANSY для описания результатов, полученных в экспериментах с ШАЛ, требует отдельного изучения. Модели, хорошо описывающие данные как РЭК, так и ШАЛ, в настоящее время уточняются в части состава отслеживаемых частиц, энергий отслеживаемых частиц, теории мягких процессов ($p_{\perp} < 10 \ {\rm \Gamma}$ эB/c) и других параметров. В то же время для целей изучения природы гало достаточно, чтобы модель, основываясь на данных LHCf, хорошо описывала экспериментальные данные РЭК и не противоречила результатам обработки экспериментальных данных ШАЛ. Иначе говоря, для реконструкции ШАЛ требуются более простые модели, нежели для реконструкции событий, регистрируемых методом РЭК. Основной фактор, определяющий различие между моделями реконструкции ШАЛ в атмосфере, – изменение сечений взаимодействий отслеживаемых частиц.

Разработанная для обработки данных эксперимента ПАМИР модель MCO-FANSY обеспечивает проведение расчетов с порогом по энергиям отслеживаемых частиц $E_{0\gamma th} = 100 \ {\ F}$ эВ и ниже для ЭФК ШАЛ, вызывающей каскады в Г-блоке РЭК ПАМИР, по энергиям E_0 ядер ПКИ до 3 ЭэВ и выше, описывает <*R*> и соответствует данным LHCf для x_F < 0.06, т.е. для x_F , соответствующих стволам ШАЛ, регистрируемых в РЭК, что необходимо для описания экспериментальных данных РЭК.

1.2.2 Модель ШАЛ для эксперимента ПАМИР

Модель ШАЛ, применяемая для обработки экспериментальных данных РЭК, позволяет после пропуска событий через камеру получать визуально наблюдаемые характеристики γ -квантов и групп γ -квантов (семейств γ -квантов) на РГП, такие, как средний радиус семейств γ -квантов $\langle R \rangle$ и $\langle E_{0\gamma}R \rangle$, угловое распределение γ -квантов (ШАЛ, образовавших γ -кванты), спектры по $\Sigma E_{0\gamma}$ и $E_{0\gamma}$ одиночных γ -квантов.

Экспериментальная характеристика семейств γ -квантов, применяемая для верификации модели MC0-FANSY данных эксперимента ПАМИР, зависящая от жесткости модели, – средний радиус семейств γ -квантов $\langle R \rangle$, образованных ШАЛ с пороговой энергией ядер ПКИ $E_{0 \text{ th}} = 0.1 \text{ ПэB}$. По причине большей диссипации энергии и меньшего пробега для взаимодействия в атмосфере при заданной E_0 , семейства γ -квантов, образованные ядрами Fe массового состава ПКИ, имеют больший $\langle R \rangle$, нежели $\langle R \rangle$ семейств γ -квантов, образованных протонами. Экспериментально полученный в РЭК ПАМИР $\langle R \rangle_{ПАМИР} = (1.94 \pm 0.06)$ см не противоречит расчетному $\langle R \rangle = (2.01 \pm 0.03)$ см [6] для легких ядер ПКИ [1]. Увеличение жесткости модели реконструкции ШАЛ по спектру вторичных частиц приводит к увеличению $\langle R \rangle$ до значений >2 см для ШАЛ, образованных протонами, и до >4 см для ШАЛ, образованных ядрами Fe массового состава ПКИ [6]. Увеличение жесткости модели развития ШАЛ приводит также к росту расчетной доли структурных гало, которая составляет от 0.25 ± 0.03 для гало, образованных ШАЛ от протонов, до 0.7 ± 0.1 для гало, образованных ШАЛ от протонов, до 0.7 ± 0.1 для гало, образованных ШАЛ от ядер Fe, при полученной в эксперименте ПАМИР доле структурных гало 0.23 ± 0.07 (см. Табл.1.7) [2,3,6].

Моделированием семейств γ -квантов, наблюдаемых на РГП, показано, что наивероятная энергия E_0 ядер ПКИ, события от ШАЛ которых регистрируются в РЭК ПАМИР, составляет несколько ПэВ или $E_0 = 10\Sigma E_{0\gamma}$ с коэффициентом пересчета от $\Sigma E_{0\gamma}$ к E_0 , соответствующим легким ядрам. Показано, что с ростом E_0 разница в $\langle R \rangle$ семейств γ -квантов от протонов и ядер Fe в массовом составе ПКИ растет.

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.1.5).
- Диапазон по энергиям ядер ПКИ $E_0 = 5 \text{ ПэВ} 3 \text{ ЭэВ}.$
- $H_{\Pi A M H P} = 594$ г/см².
- Диапазон по зенитным углам прихода реконструируемых ШАЛ $\theta = 0-50^{\circ}$.
- Пороговая энергия отслеживаемых частиц в ШАЛ $E_{0\gamma th} = 100 \ \Gamma$ эВ и ниже.
- Минимальная суммарная энергия всех частиц в ШАЛ 100 ТэВ. В дальнейшем анализируется только ЭФК ШАЛ с суммарной энергией е[±] и γквантов на уровне наблюдения, равной 100 ТэВ (см. Табл.2.1).
- Нормирование спектра по E_0 ядер ПКИ (см. Табл.1.5):

$$dI/dE_0(1 \text{ T}\ni\text{B}) = 568.8 \text{ m}^{-2}\text{vac}^{-1}\text{crep}^{-1}\Gamma\ni\text{B}^{-1}$$
$$I(> 1 \text{ T}\ni\text{B}) = 400.572 \text{ m}^{-2}\text{vac}^{-1}\text{crep}^{-1}$$
(1.3)

27

В соответствии с нормированием спектра ф.(1.3) по E_0 ПКИ, оценены потоки событий с гало для суммарной экспозиции $ST = 3000 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ср}$ экспериментальной установки РЭК ПАМИР (см. Рис.2.15).

Отслеживаемые частицы в ШАЛ включают:

- (i) Стабильные адроны, барионы (протоны, нейтроны, $\Lambda^{0,-}$ и Σ^{\pm} гипероны, чармированные барионы Λ^{\pm}_{c}), мезоны ($\pi^{\pm}, \pi^{0}, K^{\pm}, K^{0}, \overline{K}^{0},$ чармированные мезоны $D^{\pm}, D^{0}, \overline{D}^{0}, D^{\pm}_{s}$).
- (ii) Резонансы (барионы N[±], N⁰, $\Delta^{++,+,0,--}$; мезоны ρ , ω , ϕ , $K^{*\pm}$, K^{*0} , \overline{K}^{*0} , $D^{*\pm}$, D^{*0} , \overline{D}^{*0} , $D^{*\pm}_{S}$; и др.).

Всего моделируются генерации более 300 адронов.

Табл.1.5 – (а) Массовый состав ПКИ в модели MC0-FANSY [1].

<i>Е</i> ₀ , ПэВ	1	10	100
Протоны, %	33	26	20
Ядра Не, %	22	17	15

(б) Массовый состав ПКИ при $E_0 = 1$ ПэВ по данным ряда экспериментов. Доля легких ядер меняется в диапазоне 15-58%.

Ядра ПКИ, %	Протоны	He	>He
ТШВНС, С.И.Никольский [73]	43	14	43
ТШВНС, С.Б.Шаулов [107]	15-20	-	-
ТШВНС, Й.Н.Стаменов [135]	39	13	48
ШАЛ МГУ [124]	20	38	42
ЯБК [30]	18	10	72
Нормальный массовый состав [1]	32	23	45

Цель моделирования ШАЛ в MC0-FANSY, – получить характеристики ШАЛ над Г-блоком РЭК ПАМИР на глубине атмосферы $H_{\Pi AMUP} = 594 \text{ г/cm}^2$. Применительно к изучаемому явлению «гало» получены характеристики ЭФК ШАЛ, – энергии и координаты е[±] и γ -квантов с целью их применения в модели ШАЛ+РЭК прохождения ЭФК ШАЛ через РЭК ПАМИР и получения гало.

1.3 Эксперименты с РЭК

Эксперименты с РЭК, проводившиеся с 1970-х гг.: ПАМИР [1,13,29] (Таджикистан, 4300 м н.у.м.), ТШВНС [83,85] (Казахстан, 3400 м н.у.м.), ЯБК (Японо-Бразильская коллаборация (Чакалтая), Канбала, Фуджи) [89] (Канбала, Тибет, 5400 м н.у.м.; Чакалтая, Боливия, 5280 м н.у.м.; Фуджи, Япония, 3700 м н.у.м.), эксперименты на аэростатах JACEE (The Japanese-American Collaborative Emulsion Experiment) и RUNJOB [90] с регистрацией гало СТРАНА [92,93,94].

Эксперименты с РЭК можно разделить на высокогорные эксперименты с установками, состоящими из Г- и адронного блоков, и стратосферные эксперименты с ядерной фотоэмульсией (ЯФЭ). РЭК размещены вблизи максимума развития ШАЛ в наземных экспериментах и на глубине 3-5 г/см² стандартной атмосферы в стратосферных экспериментах. Порог по $E_{0 \text{ th}}$ составляет 0.1 ПэВ в наземных экспериментах, где изучаются стволы ШАЛ, и $E_{0 \text{ th}} = 1$ ТэВ в стратосферных экспериментах, где изучаются характеристики первичных взаимодействий ядер ПКИ с атомами атмосферы.

Результаты экспериментов с РЭК, – экспонированная РГП и ЯФЭ, на которых после проявки регистрируются области потемнения. Фотометрирование, или измерение уровней потемнений D, областей потемнения позволяет делать выводы об энергиях ЭФК и угловом распределении ядер ПКИ, прошедших через РЭК. Например, в эксперименте JACEE [103] оптическая плотность треков ионов в ЯФЭ $D \sim Z^2$ (закон Бета-Блоха), что позволяет оценить, к какому типу ядра ПКИ относится трек. γ -адронное семейство СТРАНА с энергией ядра ПКИ $E_0 > 10$ ПэВ (см. Рис.1.6), зарегистрированное в 1975 г. в стратосферном эксперименте с применением РЭК, выполненном в ФИАН под рук. К.А.Котельникова, в дальнейшем было обработано в НИИЯФ МГУ с применением ПК ПАВИКОМ [90,91] ($p_{\perp} = 10$ ГэВ/с, см. Рис.1.6).

Статистически значимое количество событий с $\Sigma E_{0\gamma} \ge 100$ ТэВ (1294 семейства γ -квантов, в т.ч. 61 гало) получено в эксперименте ПАМИР. В эксперименте ТШВНС выполнено сопоставление баз данных (БД) РЭК и ШАЛ [84,140]. Явление «гало» с большой площадью впервые в экспериментах с РЭК зарегистрировано в РЭК ЯБК, названо «Андромеда» (t = 8 сu [89], см. Рис.1.7 (а)) и отнесено к необъясненным событиям в ядерных взаимодействиях, не описываемых стандартной моделью частиц.

Схема РЭК эксперимента ПАМИР приведена на Рис.1.4. Цель эксперимента ПАМИР, – получить статистику высокоэнергичных семейств ү-квантов (стволов ШАЛ) и проанализировать характеристики семейств γ -квантов, образованных ядрами ПКИ с $E_0 \ge 0.1$ ПэВ. Полная экспозиция РЭК ПАМИР составила $ST = 3000 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ср}$ с обработкой 160-170 м²/год РГП в течение 18 лет. Глубина атмосферы $H_{\Pi AMUP} = 594 \text{ г/см}^2$ или 16.0 *t*-единиц. Г-блок РЭК состоит из чередующихся слоев Рb с суммарной глубиной 6 см или 10.6 *t*-единиц, и РГП, и предназначен для регистрации ЭФК ШАЛ.

ЭФК ШАЛ, проходя через Pb, образуют каскады, оставляющие на РГП области потемнений, называемые «ү-квантами». ү-кванты фотометрируются, что позволяет оценить энергию $E_{0\gamma}$ частиц ЭФК ШАЛ, вызвавших ЭМ каскады в Pb. РГП представляет собой подложку толщиной 200 мкм, залитую с двух сторон фотоэмульсией толщиной 30 х 2 мкм. Смещение ү-кванта в двусторонней фотоэмульсии позволяет оценить зенитные углы θ прихода ШАЛ. С учетом толщины фотоэмульсии, θ оценивается с необходимой точностью начиная со значений $\operatorname{arctg}(30 / (200 + 30 \times 2) = 7^\circ$.

В эксперименте ТШВНС собрана статистика семейств γ -квантов и проанализированы характеристики сопоставленных событий [84], – ШАЛ, одновременно зарегистрированных в толчковой установке и РЭК. Полная экспозиция РЭК ТШВНС составила $ST = 650 \text{ m}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ср}$ с обработкой 160-170 м²/год РГП в течение 4 лет [84]. Глубина атмосферы $H_{\text{ТШВНС}} = 695 \text{ г/см}^2$ или 18.7 *t*единиц. Площадь РЭК в эксперименте ТШВНС закрыта ионизационными камерами. Сопоставление экспериментальных данных РЭК и ШАЛ в эксперименте ТШВНС позволило оценить N_e и возраст ШАЛ *S*, образовавших семейства γ -квантов. В [84] показано, что на одно семейство γ -квантов с $\Sigma E_{0\gamma} \ge$ 10 ТэВ регистрировалось в среднем 20 ШАЛ с энергией локализованного толчка >5 ТэВ. Сопоставление данных РЭК и ШАЛ в эксперименте ТШВНС позволило изучить возможные отклонения от модели кварк-глюонных струн (КГСМ) в мягких процессах.

В РЭК ЯБК (Чакалтая, Боливия) использована двухуровневая камера с воздушными зазорами 150 и 220 см. Данная конфигурация РЭК позволила проанализировать продукты ядерных взаимодействий в мишени из парафина толщиной 0.3 среднего пробега ядра для взаимодействия в вертикальном направлении [89] и мишени из углерода. Полная экспозиция РЭК ЯБК составила $ST = 443 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ср с обработкой 19 м}^2/\text{год РГП в течение 19 лет [89]}.$

Схема РЭК для стратосферной экспозиции [108] состоит из первичной камеры (ЯФЭ и CR-39), где измеряется заряд частиц, попадающих в РЭК, и калориметра, где измеряются высокоэнергичные ЭФ ливни, прошедшие экран между камерами. Стратосферные эксперименты выполнены на глубине 3-5 г/см² (35 км н.у.м.) стандартной атмосферы и позволили проанализировать взаимодействия ядер ПКИ в диапазоне $E_0 = 1$ ТэВ – 1 ПэВ. Однако полная экспозиция стратосферных экспериментов с РЭК существенно меньше экспозиции наземных экспериментов с РЭК. Например, для РЭК ЈАСЕЕ полная экспозиция составила ST = 0.16 м²·год ср за 1600 часов [103]. С учетом, что значению $E_0 = 0.1 \ \Pi$ эВ соответствует поток ПКИ 10^{-4} (м²·с·ср)⁻¹ = 3200 (м²·год·ср)⁻¹, для *ST* = 0.16 м²·год·ср статистика семейств у-квантов равна 500.

1.3.1 Эксперимент ПАМИР

Научная станция эксперимента ПАМИР размещена около Мургаба, Горный Бадахшан, Таджикистан. Локация и фото экспериментальной установки РЭК ПАМИР приведены на Рис.1.4. Цель эксперимента ПАМИР, – изучение стволов ШАЛ с высоким пространственным разрешением, недостижимым другими экспериментальными методами, в т.ч. в экспериментах с РПС, с набором статистики семейств γ -квантов с высокими значениями $\Sigma E_{0\gamma} \ge$ 100 ТэВ.

Метод РЭК является переходным между прямыми и модельнозависимыми методами изучения событий в ШАЛ, образованных ядрами ПКИ с $E_0 \ge 100$ ТэВ. С учетом, что семейства γ -квантов и гало образованы преимущественно протонами и, в меньшей степени, ядрами Не, изучение визуально наблюдаемых характеристик семейств γ -квантов на РГП тождественно изучению стволов ШАЛ, образованных легкой компонентой ПКИ.



Локация эксперимента ПАМИР







32

1.3.2 События, изучаемые в экспериментах с РЭК

События, изучаемые в экспериментах с РЭК, – стволы ШАЛ, наблюдаемые на РГП в виде пятен потемнений. Пятна потемнений на РГП разделены на группы:

- Отдельные γ-кванты [137]. Единичные, локально расположенные области потемнений на РГП с площадями < 1 мм².
- Семейства γ-квантов (см. Рис.1.5 (а)) [86,136]. Множественные, локально расположенные области потемнений на РГП с площадями < 1 мм².
- Одноцентровые гало (см. Рис.1.5 (б)) [23], или семейства γ-квантов с гало. Диффузные области потемнения на РГП с площадями по критерию гало (потемнение на РГП с площадью более 4 мм²). Кроме диффузной области потемнения на скане гало могут наблюдаться отдельные γ-кванты.
- Многоцентровые гало (см. Рис.1.5 (в)) [10,23,139]. Диффузные области потемнения на РГП с суммарными площадями по критерию многоцентровых гало (потемнение на РГП с площадью ΣS_i ≥ 4 мм², где S_i ≥ 1 мм²). Кроме диффузных областей потемнения на скане гало наблюдаются отдельные γ-кванты.
- Необъясненные события (см. Рис.1.6). К событиям, регистрируемым методом РЭК, природа которых в настоящее время не объяснена, относятся бинокулярные события [98,99] или генетически связанные друг с другом и находящиеся на расстоянии десятка см между энергетически выделенными центрами γ-кванты или семейства γ-квантов, а также выстроенные события или генетически связанные друг с другом γ-кванты или семейства γ-кванты или семейства γ-кванты или семейства γ-квантов, выстроенные вдоль прямой (эффект «выстроенности», открытый в эксперименте ПАМИР).

В [109] показано, что расчеты по модели MC0-FANSY не противоречат наблюдаемым характеристикам выстроенных семейств γ-квантов. Необычные события, зарегистрированные в экспериментах с РЭК, получены также при самолетных экспозициях на Конкорде, такие как семейство JF 1af1, состоящее из 150 γ -квантов с $\Sigma E_{0\gamma} = 260$ ТэВ [100], и выстроенное семейство JF 2af2, состоящее из 40 γ -квантов [101].



Рис.1.5 – Семейство γ-квантов (а), одноцентровое гало «Фианит» (см. Табл.1.7 и Табл.1.8) (б) и многоцентровое гало (в).



(a)

(б)



Рис.1.6 – Бинокулярные семейства ү-квантов, зарегистрированные в эксперименте ПАМИР под рук. С.А.Славатинского [99] (а), выстроенное семейство ү-квантов (б), гало СТРАНА, зарегистрированное под рук. К.А.Котельникова в стратосферном эксперименте [92,93,94] (в); гало, зарегистрированное при экспонировании РГП на самолете под рук. Ю.А.Смородина [95,96] (г).

При изучении ШАЛ, образованных ядрами ПКИ с $E_0 \ge 0.1$ ПэВ, в экспериментах с ливневыми установками оценки энергии E_0 и массового числа A ядер ПКИ зависят от модели ШАЛ. В то же время эксперименты с РЭК, размещенными в глубине атмосферы, регистрируют события, образованные преимущественно легкими ядрами. Чем больше глубина установки в атмосфере, тем выше E_0 и легче ядра ПКИ, образовавшие ШАЛ, стволы которых регистрируются в РЭК как семейства γ -квантов.

Эксперименты с РЭК, размещенными в глубине атмосферы, в части оценки массового состава ПКИ, – единственные эксперименты при $E_0 \ge 0.1$ ПэВ, позволяющие анализировать стволы ШАЛ, образованных легкими ядрами. Ограничение по E_0 в экспериментах с РЭК определяется критерием отбора семейств γ -квантов, например по $\Sigma E_{0\gamma} \ge 0.1$ ПэВ как в эксперименте ПАМИР.

1.3.3 Данные эксперимента ПАМИР

Экспериментальные данные Г-блока РЭК ПАМИР содержит характеристики 1294 семейств γ -квантов и 29112 γ -квантов, входящих в семейства γ квантов. Сводная БД содержит характеристики 61 гало с $S_{\text{гало}} \ge 4 \text{ мм}^2$ (см. Табл.1.7). Характеристики данных эксперимента ПАМИР по семействам γ -квантов приведены в Табл.1.6.

Распределение по количеству γ -квантов в семействах N_{γ} унимодально с наивероятным количеством γ -квантов на одно семейство 10-15. Распределение по зенитным углам прихода ШАЛ θ унимодально по θ и линейно по sec θ . Наклонные ШАЛ регистрируются в РЭК под бо́льшим телесным углом, нежели вертикальные ШАЛ, что увеличивает эффективную экспозицию установки *ST* в sec θ раз для данного θ . Максимум по зенитным углам прихода ШАЛ $\theta_{max} = 15^{\circ}$ или sec $\theta_{max} = 1.04$.

Приведенные в Табл.1.6 потемнения от радиоактивной метки и фона однослойной РГП унимодальны с наивероятными значениями 40-45 и 75-90 соответственно. Фотометрирование γ-квантов на РГП в эксперименте ПАМИР выполнено с диафрагмой фотометра R84 радиусом 84 мкм. Радиус диафраг-

Эксперименты по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ

мы подобран экспериментально из вариантов 48, 84, 140 и 290 мкм [29]. Один из критериев выбора радиуса диафрагмы состоит в правильности оценки энергий γ -квантов $E_{0\gamma}$. При максимальной плотности расположения γ квантов на РГП наиболее качественный результат будет получен по R48, при минимальной плотности расположения γ -квантов, – R140. Для сопоставимости измеренных энергий γ -квантов $E_{0\gamma}$ в семействах с различными по плотности расположения γ -квантов использована диафрагма R84.

Табл.1.6 – Данные эксперимента ПАМИР. Характеристики экспериментальных семейств ү-квантов.

	min	max
Количество γ -квантов в семействе, N_{γ}	3	282
Сумма энергий γ -квантов, $\Sigma E_{0\gamma}$, ТэВ	100	8046
θ , градус	0	49
Потемнение от радиоактивной метки, D _m , x100	14	99
Потемнение фона однослойной РГП, D _{fon} , x100	0	150
Энергия ү-кванта по диафрагме фотометра с радиусом 84 мкм, <i>Е</i> _{0у R84} , ТэВ	4	797
Глубина <i>t</i> -единиц, си	7.1	11
Год разборки РЭК	1972	1989

Полученные в эксперименте ПАМИР гало приведены в Табл.1.7, где $S_{D=0.5}$ – площадь гало, измеренная по изоденсе D = 0.5, S_i – парциальные площади многоцентровых гало, $\Sigma E_{0\gamma}$ – оценка суммы энергий γ -квантов, составляющих гало, измеренных по $E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ, t_{Pb} – глубина Pb в Г-блоке РЭК над РГП, N_c – количество центров гало, R_{ij} – радиус-векторы парциальных гало относительно центра тяжести гало. Гало отобраны из семейств γ -квантов по критерию гало с учетом 25%-го завышения измеряемой энергии γ -квантов при прохождении γ -квантов через РЭК. Значению $\Sigma E_{0\gamma} = 400$ ТэВ в расчете соответствует $\Sigma E_{0\gamma} = 500$ ТэВ в эксперименте. Рост измеряемых энергий γ -квантов в экспериментах с РЭК при прохождении γ -квантов через свинцовую камеру показан в работах А.М.Дунаевского [112] и А.К.Манагадзе [137].

		, j						
N⁰	$S_{\rm D=0.5},{\rm mm}^2$	$S_{ m i}$	$\Sigma E_{0\gamma}$, ТэВ	<i>t</i> _{Pb} , см	<i>θ</i> , градусы	N _c	<i>R</i> _{ij} , мм	№ скана в Табл.1.7
1.	4	-	2745	4	0	1	-	-
2.	4	-	503	5	3	1	-	-
3.	4.1	-	576	5	9	1	-	-
4.	4.8	-	600	5	18	1	-	1
5.	5	_	591	5	0	1	-	2

Табл.1.7 – Гало, полученные в эксперименте ПАМИР.

Эксперименты по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ
N⁰	$S_{\rm D=0.5},{\rm mm}^2$	$S_{ m i}$	$\Sigma E_{0\gamma}$, ТэВ	<i>t</i> _{Pb} , см	<i>θ</i> , градусы	N _c	$R_{ m ij}$, мм	№ скана в Табл.1.7
6.	5.1	-	500	5	35	1	-	3
7.	5.3	2.9; 2.4	882	5	31	2	7.7	4
8.	5.4	-	4534	5	13	2	7.8	-
9.	5.4	-	503	5	20	1	-	-
10.	5.5	-	1084	5	10	1	_	5
11.	6.1	-	1289	5	31	1	_	-
12.	6.5	2.5; 2.0;	712	5	11	3	2.2; 0.8; 3.1	_
13.	7.5	-	679	5	23	1	_	_
14.	7.7	-	543	5	31	1	-	6
15.	7.7	-	1219	5	14	2	3.5	7
16.	7.7	-	609	5	25	1	_	-
17.	7.7	-	_	5	43	1	_	_
18.	7.9	-	594	6	31	1	_	_
19.	8.1	-	1500	6	13	1	_	-
20.	8.7	6.4; 1.3; 1.0	1725	5	25	3	6.4; 5.7; 12.1	-
21.	8.9	_	1648	5	16	1	-	8
22.	9.9	_	_	5	13	1	_	_
23.	10.1	-	2371	5	11	1	-	-
24.	10.4	5.1; 1.5; 2.1; 1.7	944	5	28	4	2.6; 2.4; 5.4; 2.8; 2.5; 3.1	-
25.	11.2	_	532	5	6	1	-	9
26.	11.4	5.8; 4.0;	506	5	44	3	6.5; 2.9; 8.6	-
27.	11.6	4.7; 5.8;	2605	5	13	3	4.2; 5.3; 2.1	-
28.	11.7	-	644	5	18	1	-	-
29.	11.8	-	1605	5	15	1	-	-
30.	12	-	646	5	28	1	-	10
31.	13.5	-	3488	5	19	1	-	-
32.	13.8	12.8; 1.0	1800	5	38	2	12.6	-
33.	14	11.4; 1.6; 1.0	1285	5	8	3	9.0; 11.8;	11
34	18.9	-	1510	5	21	1	-	12
35.	19.7	_	1154	5	29	1	_	13
36.	23.3	17.1:6.2		5	13	2	4.1	-
37.	27.7	_	2500	6	24	1	_	_
38.	28	-	1704	5	20	1	-	-
39.	30.4	28.8; 1.6	2529	5	16	2	8.2	14
40.	34.1	_	1251	5	15	1	-	-
41.	36.2	-	3390	5	12	1	-	-
42.	43.2	-	-	5	43	1	-	-
43.	46.1	-	1688	5	6	1	-	15
44.	49.2	46; 3.2	-	5	10	2	8.1	-
45.	60	-	622	5	16	1	-	-
46.	74	-	899	5	7	1	-	-
47.	79.8	-	-	5	25	1	-	-
48.	84.4	-	-	5	16	1	-	
49.	92	88; 4.0	2890	5	18	2	6.1	_
50.	100	-	1066	5	13	1	-	-
51.	111.8	-	-	6	47	1	-	-
52.	113	_	874	5	24	1		
53.	139	-	5630	6	21	1	-	-
54.	182	-	3660	5	19	1	-	-

Эксперименты по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ

№	$S_{\rm D=0.5}, {\rm mm}^2$	$S_{ m i}$	$\Sigma E_{0\gamma}$, ТэВ	<i>t</i> _{Pb} , см	heta, градусы	N _c	<i>R</i> _{ij} , мм	№ скана в Табл.1.7
55.	215	-	7115	5	31	1	-	-
56.	387	-	4000	5	19	1	-	-
57.	452	-	3001	5	27	1	-	-
58.	572	-	-	5	16	1	-	-
59.	907	-	1186	5	26	1	-	-
60.	1017	-	10200	5	18	1	-	16
61.	1451	-	8259	5	11	1	-	17

Характеристики экспериментальных гало, приведенные в Табл.1.7, использованы для решения задач объяснения природы гало (спектр площадей гало и доля структурных гало) и оценки массового состава ПКИ (статистика гало):

- (i) Построение спектра площадей гало $S_{D=0.5}$ и сравнение расчетного и экспериментального спектров. В научных публикациях не удавалось получить соответствие экспериментального и расчетного спектров $S_{rалo}$. Максимальная расчетная $S_{rалo}$ составляла 40 мм² при том, что количество гало с $S_{rалo} > 40$ мм² составляет 1/3 от статистики гало, полученной в эксперименте ПАМИР. Одна из причин ограничения площади гало значением 40 мм² связана с тем, что высокоэнергичному π^0 -мезону не хватает глубины атмосферы и ЭФК ШАЛ не успевает развиться (см. Рис.2.20);
- (ii) Оценка массового состава ПКИ по общей статистике гало, равной 61 гало, соответствующей суммарной экспозиции ST = 3000 м²·год·ср эксперимента ПАМИР;
- (iii) Оценка массового состава ПКИ по статистике структурных (многоцентровых) гало.

Данные эксперимента ПАМИР по семействам γ -квантов, приведенные в Табл.1.6, использованы для анализа $\langle R \rangle$ и пробегов ШАЛ для поглощения Λ , образовавших семейства γ -квантов. Данные эксперимента ПАМИР по характеристикам гало, приведенные в Табл.1.7, использованы для анализа статистики гало и доли структурных гало, – параметров, чувствительных к массовому составу ПКИ.

В Табл.1.8 приведены примеры сканов гало и основные характеристики гало, полученные в эксперименте ПАМИР, такие как площадь гало по изоденсе $D = 0.5 S_{D=0.5}$ и количество центров гало N_c . С целью объяснения природы гало аналогичные сканы получены моделированием прохождения ШАЛ через Г-блок РЭК ПАМИР с применением разработанного ПК ШАЛ+РЭК.



Табл.1.8 – Сканы гало, полученные в эксперименте ПАМИР.

N⁰	Скан гало	Характеристики гало
5		$D_{m} = 42$ $D_{fon} = 77$ $\Sigma E_{0\gamma} = 1084 \text{ T} \Rightarrow B$ $N_{\gamma} = 31$ $N_{c} = 1$ $\theta = 10^{\circ}$ $S_{D=0.5} = 5.5 \text{ mm}^{2}$
6		$D_{m} = 49$ $D_{fon} = 87$ $\Sigma E_{0\gamma} = 543 \text{ T}_{3}\text{B}$ $N_{\gamma} = 50$ $N_{c} = 1$ $\theta = 31^{\circ}$ $S_{D=0.5} = 7.7 \text{ MM}^{2}$
7		$D_{m} = 42$ $D_{fon} = 91$ $\Sigma E_{0\gamma} = 1219$ ТэВ $N_{\gamma} = 110$ $N_{c} = 2$ $\theta = 14^{\circ}$ $S_{D=0.5} = 7.7 \text{ мм}^{2}$
8		$D_{m} = 59$ $D_{fon} = 101$ $\Sigma E_{0\gamma} = 1648$ ТэВ $N_{\gamma} = 28$ $N_{c} = 1$ $\theta = 16^{\circ}$ $S_{D=0.5} = 8.9 \text{ мм}^{2}$

N⁰	Скан гало	Характеристики гало
9		$D_{m} = 33$ $D_{fon} = 66$ $\Sigma E_{0\gamma} = 532 \text{ T}3B$ $N_{\gamma} = 26$ $N_{c} = 1$ $\theta = 6^{\circ}$ $S_{D=0.5} = 11.2 \text{ MM}^{2}$
10		$D_{\rm m} = 31$ $D_{\rm fon} = 78$ $\Sigma E_{0\gamma} = 646 \text{ T} \Rightarrow \text{B}$ $N_{\gamma} = 42$ $N_{\rm c} = 1$ $\theta = 28^{\circ}$ $S_{\rm D=0.5} = 12 \text{ MM}^2$
11	12. 1	$D_{m} = 46$ $D_{fon} = 79$ $\Sigma E_{0\gamma} = 1285 \text{ T}3B$ $N_{\gamma} = 91$ $N_{c} = 3$ $\theta = 8^{\circ}$ $S_{D=0.5} = (11.39 + 1.79 + 1.0) \text{ MM}^{2}$
12		$D_{m} = 32$ $D_{fon} = 62$ $\Sigma E_{0\gamma} = 1510 \text{ T}3B$ $N_{\gamma} = 84$ $N_{c} = 1$ $\theta = 21^{\circ}$ $S_{D=0.5} = 18.87 \text{ MM}^{2}$
13		$D_{m} = 44$ $D_{fon} = 79$ $\Sigma E_{0\gamma} = 1154 \text{ T}3B$ $N_{\gamma} = 51$ $N_{c} = 1$ $\theta = 29^{\circ}$ $S_{D=0.5} = 19.7 \text{ MM}^{2}$

N⁰	Скан гало	Характеристики гало
14	AD BD C	$D_{m} = 56$ $D_{fon} = 94$ $\Sigma E_{0\gamma} = 2529 \text{ T}_{3}\text{B}$ $N_{\gamma} = 158$ $N_{c} = 2$ $\theta = 16^{\circ}$ $S_{D=0.5} = (28.8 + 1.6) \text{ MM}^{2}$
15		$D_{\rm m} = 25$ $D_{\rm fon} = 84$ $\Sigma E_{0\gamma} = 1688 \text{ T} 3B$ $N_{\gamma} = 56$ $N_{\rm c} = 1$ $\theta = 6^{\circ}$ $S_{\rm D=0.5} = 46.1 \text{ MM}^2$
16		Гало «Фианит» $\Sigma E_{0\gamma} = 10200 \text{ ТэВ}$ $N_c = 1$ $\theta = 18^{\circ}$ $S_{D=0.5} = 1017 \text{ мм}^2$
17		Гало «Таджикистан» $\Sigma E_{0\gamma} = 8259 \text{ ТэВ}$ $N_c = 1$ $\theta = 11^\circ$ $S_{D=0.5} = 1451 \text{ мм}^2$

1.3.4 Данные эксперимента ЯБК

Данные эксперимента ЯБК содержит статистику по 19 гало с $S_{\text{гало}} \ge 10 \text{ мм}^2$. Площади гало $S_{\text{гало ЯБК}}$ эксперимента ЯБК, измеренные по изоденсе D = 0.7, приведенные к площадям гало эксперимента ПАМИР $S_{\text{гало ПАМИР}}$ (D = 0.5), приведены в Табл.1.9. Цель обработки данных эксперимента ЯБК состоит в проведении сравнительного анализа спектров площадей гало, – искусственных и полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК.

N⁰	Эксперимент	Гало	$S_{\rm D=0.7}, {\rm Mm}^2$	<i>t</i> , c.u.	$t_{\rm max}$, c.u.	$\Sigma E_{0\gamma}$, ТэВ	$\langle R_{\gamma} \rangle$, см	$S_{D=0.5}, MM^2$
1.	Kanbala	K0-E05	33	14	12	1137	3.74	26
2.	Kanbala	K0-E19	88	14	11	1031	0.46	69
3.	Kanbala	K1-017	45	28	13	2017	1.049	35
4.	Mt. Fuji	FC-31	450	28	14	10000	-	353
5.	Mt. Fuji	FC-104	87	28	12	2353	2.01	68
6.	Mt. Fuji	FF-45	35	28	14	696	1.81	27
7.	Mt. Fuji	FG-113	130	40	10	1626	-	102
8.	Mt. Fuji	FH-89	135	40	13	-	-	106
9.	Chacaltaya	Andromeda	950	22	10	5844	3.50	745
10.	Chacaltaya	Ursa Maior	95	two- storey	13	1867	1.30	74
11.	Chacaltaya	M.A.I	278	14	10	1144	1.40	218
12.	Chacaltaya	M.A.II	72	14	13	870	6.00	56
13.	Chacaltaya	M.A.III	201	two- storey	12	3535	3.80	158
14.	Chacaltaya	Magaleans	61	-	12	>1000	-	48
15.	Chacaltaya	C16-S093	28	12	-	2157	1.63	22
16.	Chacaltaya	C19-A32	36	14	-	1138	2.68	28
17.	Chacaltaya	C19-A127	50	14	11	222	4.40	39
18.	Chacaltaya	C18-S86	71	14	-	-	-	56
19.	Chacaltaya	C18-P06	22	two- storey	-	1277	1.54	17

Табл.1.9 – Характеристики гало эксперимента ЯБК.

В отличие от эксперимента ПАМИР, где фотометрирование выполнено по однослойной РГП и изоденсе D = 0.5 ($S_{D=0.5}$), площади гало в эксперименте ЯБК фотометрированы по двухслойной РГП и D = 0.7 ($S_{D=0.7}$) с учетом также, что в эксперименте ЯБК $\Sigma E_{0\gamma}$ оценена по $E_{0\gamma} \ge 2$ ТэВ.

Согласование данных экспериментов ПАМИР и ЯБК выполнено по ФПР гало «Фианит», полученном в эксперименте ПАМИР (см. Рис.1.5 и Табл.1.7) и гало «Андромеда», полученном в эксперименте ЯБК (см. Рис.1.7 (а)). Регрессионная зависимость $R(\rho_e)$ следует из экспериментальных данных, приведенных на Рис.1.7 (б):

$$R[cm] = (-1.42 \pm 0.04) lg(\rho_e[cm^{-2}]) + (10.7 \pm 0.3), R_a^2 = 0.98$$
 (1.4)

Плотность потемнения *D* на РГП как функция потока заряженных частиц:

$$D(\rho_{\rm e}) = 4(1 - \exp(-\rho_{\rm e}\omega)) \tag{1.5}$$

где *ω* – эффективная площадь поперечного сечения зерна фотоэмульсии.

Для РГП эксперимента ПАМИР, где фотометрирование выполнено по однослойной РГП, значение $\omega = (3.25 \pm 0.13) \text{ мкm}^2$ [29], что соответствует $\rho_e = 0.04 \text{ мкm}^{-2}$ для D = 0.5. Для РГП эксперимента ЯБК, где фотометрирование выполнено по двухслойной РГП, значение $\omega = (6.01 \pm 0.13) \text{ мкm}^2$, что соответствует $\rho_e = 0.032 \text{ мкm}^{-2}$ для D = 0.7.

Сравнивая ф.(1.4) и ф.(1.5) и принимая, что $S_{\text{гало}} \sim r^2$, соотношение площадей гало эксперимента ПАМИР $S_{\text{гало ПАМИР}}$ для однослойной РГП и D = 0.5и эксперимента ЯБК $S_{\text{гало ЯБК}}$ для двухслойной РГП и D = 0.7 равно $S_{\text{гало ПАМИР}} = 0.785S_{\text{гало ЯБК}}$.





Рис.1.7 – Скан гало «Андромеда», полученного в эксперименте ЯБК, (см. Табл.1.9) [2,86,89] (а), распределение потоков е[±] в гало «Фианит» и «Андромеда» (б).

Выводы по главе 1

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.

 Выполнен сравнительный анализ данных двух групп экспериментов по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ. Первая группа экспериментов относится к прямым измерениям, соответствующих E₀ < 0.1 ПэВ, например баллонные эксперименты JACEE, RUNJOB и СREAM; во второй группе экспериментов при E₀ > 0.1 ПэВ выводы зависят от модели ШАЛ, например эксперименты Tunka и KASCADE-Grande.

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;

 Обосновано применение выбранной для описания результатов эксперимента ПАМИР модели ШАЛ MCO-FANSY. Например показано, что полученные в расчетах по MCO-FANSY средние радиусы семейств γквантов <*R*> соответствуют экспериментально полученным радиусам. Жесткости спектров вторичных частиц, характеризующие различия моделей, зависят от коэффициентов неупругости и диссипации энергии при ядерных взаимодействиях в атмосфере, определяющих <*R*> и пробеги семейств γ-квантов для 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. Глава 2 Моделирование гало для оценки массового состава ПКИ

2.1 Модель ШАЛ+РЭК описания данных эксперимента ПАМИР

Программный комплекс (ПК), реализующий модель ШАЛ+РЭК и разработанный для моделирования гало (см. Рис.2.3), объединяет результаты расчетов по модели MC0-FANSY (Р.А.Мухамедшин [24,25,64]), адаптированной к эксперименту ПАМИР и актуализированной по последним экспериментальными данными LHCf, и результаты расчетов по моделированию ФПР е[±] и γ-квантов при прохождении ШАЛ через Г-блок РЭК эксперимента ПАМИР (В.В.Учайкин [26]).

Данные эксперимента ПАМИР использованы для оценки массового состава ПКИ при $E_0 \ge 0.1$ ПэВ. Регистрируемые на РГП события визуально наблюдаемы, а $E_{0 \text{ th}}$ устанавливается ограничением по $\Sigma E_{0\gamma}$. В частности в эксперименте ПАМИР $\Sigma E_{0\gamma} \ge 100$ ТэВ ($E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ). Однако в [112,137] расчетами с применением модели MQ (А.М.Дунаевский [112]) показано, что при прохождении через РЭК регистрируемая энергия γ -квантов $E_{0\gamma}$ растет. Природа данного явления не установлена, однако возможно, что данный эффект определен степенным характером спектра по $E_{0\gamma}$ и флуктуациями ФПР. При развитии ЭФК в Рb в бо́льшие $E_{0\gamma}$ передается больше N_{γ} , нежели обратно.

Моделированием по MCO-FANSY для эксперимента ПАМИР получена оценка E_0 как $E_0 = k\Sigma E_{0\gamma}$. В работах В.С.Пучкова показано, что для семейств γ -квантов, образованных протонами, k = 10, для семейств γ -квантов, образованных ядрами Fe, k = 70. Показано, что для событий, регистрируемых в РЭК ПАМИР ($\Sigma E_{0\gamma} \ge 100$ ТэВ, $E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ) [15,19,20], коэффициент k = 8.9 + 1.1A. Из приведенного соотношения для легких ядер *p*+He среднее значение $\langle k \rangle =$ 12, для тяжелых ядер >He $\langle k \rangle = 42$.

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, типы отслеживаемых частиц [24,25,64]. Основная цель построения модели ШАЛ+РЭК для эксперимента ПАМИР, – моделирование гало. Критерии и алгоритм моделирования ШАЛ в атмосфере и гало в РЭК приведены в Табл.2.1. Моделирование гало состоит из двух этапов:

- (i) Формирование БД ШАЛ для условий эксперимента ПАМИР ($H_{\Pi AMUP} = 594 \text{ г/cm}^2$, $E_0 = 5 \Pi$ эВ 3 ЭэВ, $E_{0\gamma \text{ th}} = 100 \Gamma$ эВ) посредством модели МСО-FANSY.
- (ii) Формирование БД ШАЛ+РЭК для уровня РГП на глубине 5 см Рb в Гблоке РЭК посредством ФПР е[±] и γ-квантов в Г-блоке РЭК ПАМИР.

Табл.2.1 – Алгоритм моделирования ШАЛ и семейств ү-квантов в Г-блоке РЭК эксперимента ПАМИР [2] (см. Рис.1.4).

	Уровень	Частицы		Расстояние	Глуби-	
	наблюде-	на уровне	Минимальная	частиц до	на РЬ в	
Этап моде-	ния в Г-	наблюде-	суммарная энер-	оси	Γ-	$S_{\text{гало}},$
лирования	блоке РЭК	ния	гия частиц, TeV	ШАЛ, см	блоке	MM ²
Моделиро- вание ШАЛ по МСО- FANSY Отбор ШАЛ	Выше Рb- поглотите- ля	Все от- слежива- емые в MC0- FANSY частицы	100	Все части- цы ШАЛ	-	-
Отбор се- мейств ү- квантов Отбор гало по S _{гало}	Уровень РГП	е [±] , ү- кванты	$\Sigma E_{0\gamma} \ge 400$ ТэВ, $E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ	≤15	5 см / cos <i>θ</i>	$\Sigma S_i \ge 4,$ $\Gamma \exists e$ $S_i \ge 1,$ $D \ge 0.5$

ФПР е[±] и γ -квантов в Рb фитированы для конфигурации эксперимента ПАМИР [26]. Характеристики ФПР приведены в Табл.2.2. ФПР получены с учетом эффекта Ландау-Померанчука-Мигдалла (ЛПМ), включая осевое приближение для малых *r* и больших энергий *E* лавинных е[±], $E \gg \epsilon$ (Pb) = 7.4 МэВ, $N_{\gamma} = f(E_0 r)$ на расстояниях порядка длины когерентности. Учет эффекта ЛПМ, который проявляется при $E_{0\gamma} > 10$ ТэВ, при которых длина когерентности составляет 10 мкм, показывает рост пробега е[±] с $E_{0\gamma}$, что меняет формы каскадных кривых, смещая максимум каскада вглубь Г-блока.

Табл.2.2 – Характеристики $\Phi \Pi P e^{\pm}$ и γ -квантов в Γ -блоке РЭК ПАМИР [26].

	min	max	Рисунок
Радиус-векторы e^{\pm} и γ -квантов, R , см	0.000158	6.56	-
Глубина вещества, <i>t</i> , си	1	60	Рис.2.2
Энергии первичных e^{\pm} и γ -квантов, $E_{0\gamma}$, ГэВ	0.99998	999980	-

Моделирование гало для оценки массового состава ПКИ

	min	max	Рисунок
Потоки N_{γ} от первичных e^{\pm} и γ -квантов с энерги- ями $E_{0\gamma}$ на расстояниях R и глубинах t , см ⁻²	0	$1176 \cdot 10^7$	Рис.2.1

На Рис.2.1 приведены ФПР $N_{\gamma}(R)$ на глубине $t_{\rm Pb} = 8$ си. Вертикальным пунктиром отмечены R, соответствующие площадям гало $S_{\rm rano} = 1 \text{ мм}^2$ и 4 мм^2 , см. Табл.2.1.



Рис.2.1 – ФПР ЭФК в Г-блоке РЭК ПАМИР (см. Табл.2.2) [26] для первичных γ -квантов (сплошные линии) и е[±] (пунктирные линии), $t_{\rm Pb}$ = 8 си. Моделирование ФПР выполнено для конфигурации эксперимента ПАМИР начиная с $R_{\rm min}$ = 1.58 мкм. Вертикальным пунктиром отмечены R, соответствующие $S_{\rm rano}$ = 1 мм² и 4 мм² (критерии гало).

На Рис.2.2 приведены каскадные кривые e^{\pm} и γ -квантов в зависимости от $t_{\rm Pb}$ для R = 1.58 мкм и R = 656 мкм. С ростом $E_{0\gamma}$ максимум каскада формируется при $E_{0\gamma} = 50$ ГэВ и сдвигается вглубь Г-блока РЭК.



(a)



Рис.2.2 – ФПР ЭФК в Г-блоке РЭК ПАМИР (см. Табл.2.2) [26] для первичных γ -квантов (сплошные линии) и е[±] (пунктирные линии), R = 1.58 мкм (а) и R = 656 мкм (б).

2.1.1 Модель ШАЛ+РЭК реконструкции гало

Обработка искусственных событий выполнена по двум алгоритмам. Алгоритм «Изоденса» разработан в А.М.Дунаевским [112] и предназначен для расчета площадей гало $S_{\text{гало}}$ и энергий гало $E_{\text{гало}}$. Алгоритм «Изоденса» минимизирует время счета и объем хранимой информации. В алгоритме рассчитываются только координаты изоденсы для выбранного уровня потемнения *D* на РГП.

В алгоритме «Шахматная доска», реализованном в разработанном для расчета искусственных гало ПК ШАЛ+РЭК, использованы результаты моделирования по МСО-FANSY (модель разработана Р.А.Мухамедшиным [24,25,64]) и ФПР (ФПР рассчитаны В.В.Учайкиным [26] специально для эксперимента ПАМИР). В ПК ШАЛ+РЭК рассчитываются потоки $N_{e,\gamma}$ во всех ячейках сканирования по известным ФПР с анализом ячеек, где $D \ge 0.5$, на предмет структурности (многоцентровости) гало и соответствия критериям гало. Из ф.(1.5) следует, что значению уровня потемнения D = 0.5 на РГП эксперимента ПАМИР соответствует поток $N_{\gamma} = -10^8 \ln(1 - 0.5 / 4) / 3.25 = 4 \cdot 10^6$ см⁻².

На Рис.2.3 приведено окно настроек ПК, реализующего модель гало ШАЛ+РЭК. Входными параметрами модели являются характеристики реконструированных по MC0-FANSY ШАЛ:

- Тип ядра ПКИ;
- Энергии и углы прихода ядер ПКИ E_0 , $\cos\theta$, φ ;
- Энергии отслеживаемых в ШАЛ частиц;
- *х*, *у*-координаты отслеживаемых в ШАЛ частиц;
- Типы отслеживаемых в ШАЛ частиц.

По причине падающего по E_0 спектра ПКИ, статистики моделированных ШАЛ набраны в диапазонах по $E_0 \ge 5$ ПэВ, ≥ 10 ПэВ, ≥ 50 ПэВ, ≥ 100 ПэВ, ≥ 500 ПэВ и ≥ 1000 ПэВ для всех типов ядер ПКИ. По моделированным ШАЛ с применением ПК ШАЛ+РЭК получено 686 искусственных гало.



Рис.2.3 – ПК ШАЛ+РЭК моделирования гало с основными расчетными параметрами.

Сканирование в ПК ШАЛ+РЭК моделированного ствола ШАЛ на предмет гало требует оценки координат центра тяжести гало. Предварительными расчетами показано, что центры тяжести гало расположены вблизи оси ШАЛ. В Табл.2.3 приведены доли гало в зависимости от расстояний R от центра тяжести гало до оси ШАЛ, полученные в работах Krys A. и Iwan A. [111]. Алгоритм «Шахматная доска» в [111] не применялся и R оценено по характеристикам частиц в ЭФК моделированного ШАЛ. Массовый состав ПКИ, для которого получены данные Табл.2.3, в [111] не уточнен, однако из Табл.2.3 следует, что центр тяжести гало не отклоняется от оси ШАЛ более чем на 4 см.

Табл.2.3 – Доля гало в зависимости от расстояния *R* от центра тяжести гало до оси ШАЛ [111].

<i>R</i> , мм	0-10	10-20	20-40	>40
Доля гало, %	70 ± 20	19 ± 9	11 ± 7	0

На Рис.2.4 приведена доля гало в зависимости от расстояния *R* до центра тяжести гало с учетом вероятности образования гало (см. Рис.2.15) и падаю-

щего по E_0 спектра ПКИ с массовым составом, приведенным в Табл.1.5. Расстояние *R* оценено как средневзвешенное $R = \Sigma R_i N_i / \Sigma N_i$, где $N_{e,\gamma}$, – потоки в ячейках сканирования по модели ШАЛ+РЭК, полученные по ФПР на уровне РГП и рассчитанные для условий эксперимента ПАМИР с $N_i \ge 4.10^6$ см⁻², что соответствует уровню потемнения на РГП $D \ge 0.5$.



Рис.2.4 – Расстояние от центра тяжести гало до оси ШАЛ: $P(R[cm]) = (-0.5 \pm 0.2)R^3 + (0.9 \pm 0.6)R^2 + (0.1 \pm 0.5)R + (0.0 \pm 0.1), R_a^2 = 0.96$ (2.1)

Из ф.(2.1), Рис.2.4 и Табл.2.3 следует, что наивероятное расстояние от центра тяжести гало до оси ШАЛ M(R) = 1.2 см. Изучение событий на данных расстояниях от оси ШАЛ возможно только в экспериментах с РЭК.

Алгоритм модели ШАЛ+РЭК (см. Рис.2.3) устанавливает кадр сканирования со стороной несколько см на оси ШАЛ и разбивает кадр сканирования на ячейки со стороной 100 мкм. В каждой ячейке сканирования рассчитаны потоки N_i от всех первичных e^{\pm} и γ -квантов в моделированных ШАЛ с энергиями $E_{0\gamma} \ge 100$ ГэВ в соответствии с ФПР, рассчитанными для Г-блока РЭК эксперимента ПАМИР [26] (см. Табл.2.2, Рис.2.1 и Рис.2.2). Рассчитанные значения N_i всех ячеек всех кадров сканирования сохраняются в БД ПК ШАЛ+РЭК для дальнейшего анализа.

ПК ШАЛ+РЭК, разработанный для моделирования семейств γ -квантов в РЭК ПАМИР (см. Рис.2.3), применен с целью изучения вклада в образование гало больших площадей подпороговых относительно метода РЭК ПАМИР γ -квантов (значения $E_{0\gamma} < 1$ ТэВ). На Рис.2.5 и Рис.2.6 приведен пример изменения площади искусственного гало с $S_{rалo} = 3200$ мм², образованного протоном

ПКИ с $E_0 = 778935$ ТэВ (см. Табл.А.1), в зависимости от пороговых энергий $E_{0\gamma th} \in [0.1;4]$ ТэВ отслеживаемых в ЭФК ШАЛ частиц. Из Рис.2.5 и Рис.2.6 следует, что учет подпороговых относительно метода РЭК γ -квантов увеличивает площади искусственных гало в 2-3 раза.

В диапазоне *E*_{0γth} ∈ [0.1;4] ТэВ изменение площадей искусственных гало проанализировано по регрессии:

$$\lg(S_{\text{rano}} / S_{\text{rano}}(E_{0\gamma \text{ th}} = 100 \text{ } \Gamma \mathfrak{3}B)) = -(406 \pm 7)10^{-3}(1 + \lg(E_{0\gamma \text{ th}}, \text{ } \text{T} \mathfrak{3}B)), R_{a}^{2} = 0.99$$
(2.2)

На Рис.2.7 и Рис.2.8 приведено изменение площади гало в зависимости от $E_{0\gamma th} \in [0.02;4]$ ТэВ отслеживаемых в ЭФК ШАЛ частиц. Из Рис.2.7 и ф.(2.3) следует, что темп роста площади гало снижается с уменьшением $E_{0\gamma th}$ ниже 1 ТэВ и становится незначительным при $E_{0\gamma th} = 20$ ГэВ и ниже. В частности, увеличение площади гало S_{rano} при снижении $E_{0\gamma th}$ от 100 ГэВ до 50 ГэВ составляет 15-20% (см. ф.(2.3)).

Из проведенных исследований, а также Рис.2.6 и Рис.2.7 следует:

- (i) Искусственные гало с $S_{rano} < 500 \text{ мм}^2$ можно получить суперпозицией ФПР надпороговых ү-квантов ($E_{0\gamma} > 1 \text{ ТэВ}$).
- (ii) Искусственные гало с $S_{\text{гало}} > 500 \text{ мм}^2$ можно получить только суперпозицией ФПР подпороговых γ -квантов с $E_{0\gamma \text{ th}} = 100 \text{ ГэВ.}$
- (iii) Вклад ү-квантов с $E_{0\gamma} < 100$ ГэВ в формирование $S_{\text{гало}}$ становится незначительным.





Рис.2.5 – Искусственное гало, рассчитанное для $E_{0\gamma th} \in [0.1;4]$ ТэВ отслеживаемых в ЭФК ШАЛ частиц: $S_{rало}$ для различных $E_{0\gamma th}$ (а), размеры гало для различных $E_{0\gamma th}$ (б) и искусственное гало, полученное моделированием по ШАЛ+РЭК, в виде скана на РГП с отмеченной белым изоденсой D = 0.5 (в).



Рис.2.6 – $S_{\text{гало}} > 1000 \text{ мм}^2$. Изменение $S_{\text{гало}}$ с $E_{0\gamma \text{ th}} \in [0.1; 4]$ ТэВ отслеживаемых в ЭФК ШАЛ частиц относительно $S_{\text{гало}}$ при $E_{0\gamma \text{ th}} = 100 \text{ ГэВ}$.



Рис.2.7 – $S_{\text{гало}} < 1000 \text{ мм}^2$. Изменение $S_{\text{гало}}$ с $E_{0\gamma \text{th}} \in [0.02;4]$ ТэВ отслеживаемых в ЭФК ШАЛ частиц относительно $S_{\text{гало}}$ при $E_{0\gamma \text{th}} = 100$ ГэВ. Пунктирная линия, – регрессия в диапазоне $E_{0\gamma \text{th}} \in [0.02;4]$ ТэВ:

$$lg(S_{rano}/S_{rano}(100 \ \Gamma \Rightarrow B)) = (0.17 \pm 0.03) - (0.54 \pm 0.05)(3.0 \pm 0.3)^{lg(E_{0\gamma} \text{ th}, T \Rightarrow B)},$$

$$R_{3}^{2} = 0.97 \quad (2.3)$$



Рис.2.8 – Изменение площади гало $S_{\text{гало}}$ с ростом $E_{0\gamma \text{ th}}$ отслеживаемых в ЭФК ШАЛ частиц: $S_{\text{гало}} = 147 \text{ мм}^2$ (а) и $S_{\text{гало}} = 736 \text{ мм}^2$ (б).

2.1.2 Верификация модели ШАЛ+РЭК

Один из параметров гало, по которому выполнена верификация модели ШАЛ+РЭК, – спектр площадей гало. В расчете получены гало с $S_{rалo} > 500 \text{ мм}^2$, наблюдаемые в экспериментах с РЭК и которые не удавалось получить без привлечения экзотических моделей. В расчетах также получены многоцентровые гало и диффузные гало (гало с равномерной площадью потемнения без отдельных γ -квантов), примеры которых приведены в Табл.2.5, считавшиеся необычными событиями наравне с выстроенными и бинокулярными событиями.

На Рис.2.9 приведено сравнение спектров по площадям гало S_{гало} искусственных и экспериментальных гало:

- (i) Нормированных на единицу с порогом S_{гало th} = 15 мм² спектров гало, полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК с целью верификации модели ШАЛ+РЭК (см. Рис.2.9 (а) и ф.(2.4));
- (ii) Спектр гало по $S_{\text{гало}}$ с $S_{\text{гало th}} = 4 \text{ мм}^2$ с целью оценки доли экспериментальных гало в диапазоне площадей гало [2,4) мм² (см. Рис.2.9 (б) и $\phi.(2.5)$).

Из ф.(2.4) следует соответствие спектров по площадям $S_{\text{гало}}$ экспериментальных, полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК, и искусственных гало, полученных по модели ШАЛ+РЭК, с $R_a^2 = 96\%$. Из Рис.2.9 и ф.(2.5) следует, что снижение площадей регистрируемых в эксперименте ПАМИР гало с $S_{\text{гало}} = 4 \text{ мм}^2$ до $S_{\text{гало}} = 2 \text{ мм}^2$ увеличивает статистику гало в $N(S_{\text{гало}}(\geq 2 \text{ мм}^2)) / N(S_{\text{гало}}(\geq 4 \text{ мм}^2)) = 1.1$ раза, т.е. вместо 61 экспериментального гало, измеренных по $S_{\text{гало}} \geq 4 \text{ мм}^2$, можно получить 67 экспериментальных гало, но измеренных по $S_{\text{гало}} \geq 2 \text{ мм}^2$.



Рис.2.9 – Спектры площадей гало: расчетный по модели ШАЛ+РЭК и экспериментальные по данным экспериментов ПАМИР и ЯБК, $S_{rалo} \ge 15 \text{ мm}^2$ (см. ф.(2.4)) (а) и расчетный по модели ШАЛ+РЭК для эксперимента ПАМИР, $S_{rалo} \ge 4 \text{ мm}^2$ (см. ф.(2.5)) (б). Сплошные линии, – регрессии: $I(\ge S) = (-0.62 \pm 0.03) \lg(S_{rалo}[\text{мm}^2]) + (1.83 \pm 0.05), R_a^2 = 0.96$ (2.4) $N(\ge S) / 1000 = (-41 \pm 1) \lg(S_{rалo}[\text{мm}^2]) + (125 \pm 2), R_a^2 = 0.99$ (2.5)

Характеристикой гало, оцененной в экспериментах ПАМИР и ЯБК (см. Табл.1.7 и Табл.1.9) и полученной в расчетах по модели ШАЛ+РЭК, яв-

ляется $\Sigma E_{0\gamma}$. На Рис.2.10 приведена зависимость площади гало S_{rano} от $\Sigma E_{0\gamma}$, полученная по расчетным и экспериментальным данным. Из Рис.2.10 следует хорошее согласие расчетных данных по модели ШАЛ+РЭК и данных, полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК. Из Рис.2.10 следует, что значения площадей гало для глубины экспериментальной установки в атмосфере $H_{\Pi AM UP} = 594 \text{ г/cm}^2$ ограничены значениями $S_{rano max} = 10^{3.6} = 4000 \text{ мm}^2$. Данное верхнее ограничение на экспериментально полученную площадь гало аналогично ограничению на максимальную площадь гало от одиночного γ -кванта (см. разд. 2.3), равную 40 мм².



Рис.2.10 – Площади гало $S_{\text{гало}}$ в зависимости от $\Sigma E_{0\gamma}$. Площади гало, полученные в эксперименте ЯБК, приведены к условиям эксперимента ПАМИР,

$$R_{\rm a}^{2}=0.89.$$

Показатель, верифицирующий модель ШАЛ+РЭК, – коэффициент пересчета количества e^{\pm} и γ -квантов в ЭФК в Г-блоке РЭК N_{γ} в энергию гало $E_{\text{гало}}$. На Рис.2.11 приведено расчетное распределение по $N_{\gamma \text{гало}}$ на РГП.



Рис.2.11 – Распределение по $N_{\gamma \, \text{гало}}$ (в гало на РГП) (см. ф.(2.6)).

Распределение на Рис.2.11 проанализировано по регрессии:

$$P(N_{\gamma \, \text{гало}} \text{ (в гало на РГП)}) = \exp\{10(10 \pm 1) - 10(24 \pm 3) / \lg(N_{\gamma \, \text{гало}}) - (37 \pm 5)\ln(\lg(N_{\gamma \, \text{гало}}))\}, R_a^2 = 0.89 \text{ (2.6)}$$

Из ф.(2.6) следует, что математическое ожидание $M\{\lg(N_{\gamma \, rалo} (\text{в гало на} \ P\Gamma\Pi))\} = 6.8$. Принимая переход от $N_e \ \kappa E_0$, определенный в разд. 3.4, средневзвешенная энергия образования гало $\langle E_0 \rangle_{rалo} = 2 \ \Gamma \ni B \cdot 10^{6.8} = 13 \ \Pi \ni B$, что соответствует данным Рис.2.15 и тому, что данное соотношение получено как оценка энергий E_0 ядер ПКИ для событий, образованных легкими ядрами. Отсюда следует, что гало образованы преимущественно протонами и ядрами Не в массовом составе ПКИ.

Другой показатель, верифицирующий модель ШАЛ+РЭК, – $\Sigma E_{0\gamma}$ для гало, рассчитываемая в модели и оцениваемая в эксперименте (см. Табл.1.7). На Рис.2.12 приведено распределение по $\Sigma E_{0\gamma}$ для расчетных гало, проанализированное по регрессии:

$$P(\Sigma E_{\gamma}) = \exp\{10(12 \pm 2) - 10(17 \pm 2)/\lg(\Sigma E_{0\gamma}) - (56 \pm 7)\ln(\lg(\Sigma E_{0\gamma}))\}, R_{a}^{2} = 0.92$$
(2.7)



Рис.2.12 – Распределение по $\Sigma E_{0\gamma}$ (см. ф.(2.7)) для расчетных гало.

Из Рис.2.12 и ф.(2.7) следует, что модальное значение $\Sigma E_{0\gamma}$ для расчетных гало равно 1 ПэВ. Из Табл.1.7 следует, что среднее значение $\Sigma E_{0\gamma}$ для экспериментальных гало равно 2 ПэВ. Разница между расчетным и экспериментальным значениями $\Sigma E_{0\gamma}$ определена тем, что экспериментальное значение $\Sigma E_{0\gamma}$ для гало имеет оценочный характер, а также асимметрией распределения (см. Рис.2.12).

2.2 Характеристики искусственных гало

Впервые природа гало с большими площадями (см. Рис.1.5 (б)) объяснена перекрытием ЭМ каскадов, образованных в Г-блоке РЭК подпороговыми γ -квантами ($E_{0\gamma} < 1$ ТэВ), в 2001 г. в научных исследованиях под рук. С.А.Славатинского [18,19]. Результаты моделирования, приведенные на Рис.2.13, показали, что подпороговые γ -кванты в ШАЛ с энергиями $E_{0\gamma} = 0.1$ -0.2 ТэВ несут 20-30% энергии ЭФК ШАЛ, с незначительным снижением с ростом E_0 доли энергии ЭФК, приходящейся на подпороговые γ -кванты.



Рис.2.13 – Расчетная доля энергии ЭФК, приходящаяся на различные интервалы $E_{0\gamma}$. Расчет по модели MCO-FANSY [24,25,64] для энергий ядер ПКИ $E_0 \ge 5$ ПэВ (темно-серая) и $E_0 \ge 1$ ЭэВ (светло-серая), условий эксперимента ПАМИР ($H_{\Pi AM UP} = 594$ г/см²) и нормального массового состава ПКИ (см. Табл.1.5) [1,73].

По искусственным гало, образованным ядрами ПКИ с энергиями $E_0 \ge 5$ ПэВ получено, что основная доля экспериментальных гало образована протонами (83%) и ядрами Не (13%), инициировавшими ШАЛ. Т.е. в эксперименте ПАМИР регистрируются, преимущественно, события, образованные легкими ядрами ПКИ.

В Табл.2.4 приведены распределения по потемнениям на РГП D(x), полученные для искусственных гало. Из Табл.2.4 следует, что гало с большими площадями $S_{\text{гало}}$ характеризуются $\Sigma E_{0\gamma}(E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэB}) < E_{\text{гало}}$ и отсутствием большого количества, относительно гало с малыми $S_{\text{гало}}$, отдельных пиков (или γ -квантов). Т.е. вклад в энергию гало $E_{\text{гало}}$ с большими площадями $S_{\text{гало}}$ вносят не 4 ТэВ-е γ -кванты, но подпороговые γ -кванты.



Табл.2.4 – Распределения по потемнениям на РГП D(x) для различных типов искусственных гало.



При обработке экспериментально полученных гало установлено, что одним из параметров, чувствительных к типу ядра ПКИ, образовавшего гало, может быть пологость распределения D(x). Предположено, что гало, скан которого не содержит множество отдельных пиков (γ -квантов), образовано легким ядром, в то время как гало с множеством отдельных пиков образовано тяжелым ядром ПКИ (см. Табл.2.4).

Пологость распределения D(x) оценена по коэффициенту эксцесса γ_2 , – γ_2 отрицателен при пологом, относительно нормального, пике распределения и положителен при остром пике распределения. Для оценки γ_2 искусственные гало отобраны с учетом, что при D = 4 вершина гало образует плато, в то время как при малых D в гало наблюдается большое количество отдельных γ квантов (см. Табл.2.4), что затрудняет интерпретацию γ_2 . Приведенные в Табл.2.5 оценки γ_2 получены для гало с $D_{\text{max}} \in (3.5;4.0)$. Расчеты показали, что для гало, образованных протонами, $\gamma_2 = 8 \pm 1$, для гало, образованных ядрами Fe массового состава ПКИ, $\gamma_2 = 23 \pm 7$. Сделан вывод, что по причине значительной дисперсии γ_2 применение данного показателя для оценки типа ядра ПКИ, инициировавшего ШАЛ и образовавшего гало, малоэффективно.

Табл.2.5 – Сравнение распределений по D(x) искусственных гало, образованных протонами и ядрами Fe ПКИ, с оценками γ_2 для данных типов ядер.





67



Параметром, чувствительным к массовому составу ПКИ, является структурность гало или доля гало с количеством центров, более одного. В Табл.2.6 приведена доля искусственных многоцентровых гало с различным количеством центров, относительно общего количества структурных гало. Показано, что количество центров в структурных гало носит случайный характер и для оценки массового состава ПКИ по структурным гало использован факт структурности гало, но не количество центров гало.

Табл.2.6 – Доля искусственных многоцентровых гало в общем количестве структурных гало, смоделированных для $E_0 \ge 5$ ПэВ по массовому составу MC0-FANSY.

	2-центровые	3-центровые	4-центровые
Доля, %	42	22	36

68

Моделирование гало для оценки массового состава ПКИ

Вклад подпороговых γ -квантов в площади гало $S_{\text{гало}}$ проанализирован по зависимости $\Sigma E_{0\gamma}(E_{0\gamma} \ge 4 \text{ T} \Rightarrow \text{B})/E_{\text{гало}}$ от $\lg S_{\text{гало}}$, приведенной на Рис.2.14. При $S_{\text{гало}} > 40 \text{ мм}^2$ энергия гало $E_{\text{гало}}$ превышает $\Sigma E_{0\gamma}(E_{0\gamma} \ge 4 \text{ T} \Rightarrow \text{B})$, – характеристику семейств γ -квантов, оцененную в эксперименте ПАМИР. Из Рис.2.14 следует, что в формирование гало с $S_{\text{гало}} > 40 \text{ мм}^2$ определяющий вклад вносят подпороговые γ -кванты с $E_{0\gamma} < 1$ ТэВ, но не 4-ТэВ-е и выше γ -кванты.



Рис.2.14 – Зависимость $\Sigma E_{0\gamma}(E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}) / E_{гало}$ от $S_{гало}$. Пересечение двойных пунктирных линий, – условие $\Sigma E_{0\gamma}(E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}) = E_{гало}$, которому соответствует $S_{гало} = 40 \text{ мм}^2$.

Поток событий с гало, полученных в эксперименте ПАМИР, соотнесен с энергиями E_0 ядер ПКИ по экспериментально оцененным значениям $\Sigma E_{0\gamma}$ для гало, приведенным в Табл.1.7. В разд. 2.1 приведены средние значения коэффициентов перехода $\langle k \rangle = 12$ и $\langle k \rangle = 42$ от $\Sigma E_{0\gamma}$ к E_0 для легких и тяжелых ядер массового состава ПКИ соответственно. Вероятности образования гало для различных энергий E_0 ядер ПКИ проанализированы в расчетах по модели ШАЛ+РЭК и приведены на Рис.2.15. Из Рис.2.15 следует, что легкие ядра ПКИ образуют 91% гало, тяжелые ядра 9% гало. Средневзвешенное по вероятностям образования гало значение коэффициента перехода от $\Sigma E_{0\gamma}$ к $E_0 \langle k \rangle$ = 12.91% + 42.9% = 15. Для расчетного значения $M(\Sigma E_{0\gamma}) = 1$ ПэВ (см. ф.(2.7)), наивероятная энергия ядра ПКИ, образовавшего гало, $E_0 = \langle k \rangle \Sigma E_{0\gamma} = 15 \ \Pi$ эВ.

На Рис.2.15 приведены потоки событий с гало, полученные в эксперименте ПАМИР для трех интервалов энергий ядер ПКИ: $E_0 < 10$ ПэВ, $E_0 = 10$ -50 ПэВ и $E_0 > 50$ ПэВ. Из Рис.2.15 следует хорошее согласие расчетного и экспериментально полученного потоков гало, а также то, что гало образованы преимущественно легкими ядрами массового состава ПКИ. Из Рис.2.15 также следует, что пороговая энергия образования гало $E_{0 \text{ th}}$ равна несколько единиц ПэВ. Средневзвешенная по вероятностям образования гало наивероятная энергия ядра ПКИ, образовавшего гало, $\langle E_0 \rangle_{\text{гало}} = 0.23.5$ ПэВ + 0.54.10 ПэВ + 0.15.50 + 0.08.100 ПэВ = 10-20 ПэВ.

Начиная с энергий $E_0 = 100 \text{ ПэВ}$ в образовании гало начинают участвовать все ядра ПКИ, – от протонов до ядер Fe. Однако в силу степенного по E_0 спектра ПКИ поток событий, регистрируемых в РЭК, при $E_0 = 100 \text{ ПэВ}$ относительно событий при более низких E_0 незначителен и оценка массового состава ПКИ по событиям с гало относится к $E_0 = 10 \text{ ПэB}$.



Рис.2.15 – Доля гало, образованных различными типами ядер массового состава ПКИ, в сравнении с данными эксперимента ПАМИР.

Пробег ШАЛ для поглощения в атмосфере *Л*, включая ШАЛ, образующие гало, оценен по соотношению:

$$N(H,\theta) = a(H)\exp\left(\frac{H}{\Lambda}(1 - \sec\theta)\right)$$
(2.8)

где H = 594 г/см² для эксперимента ПАМИР.

Линеаризация ф.(2.8) и расчет методом максимального правдоподобия (ММП) определяет пробег ШАЛ для поглощения в атмосфере Λ для наивероятной энергии E_0 эксперимента ПАМИР и соответствующего среднего значения массового числа $\langle A \rangle$ ядер ПКИ, инициировавших ШАЛ. Пробег ШАЛ Λ , оцененный по ф.(2.8), представляет собой дифференциальную оценку Λ посредством ММП с возможностью оценить статистические характеристики линейной регрессии, например, коэффициент множественной детерминации R^2 , в отличие от оценки Λ по разнице потоков ШАЛ на двух глубинах атмосферы. С ростом E_0 максимум развития ШАЛ X_{max} смещается вглубь атмосферы и пробег ШАЛ в атмосфере Λ увеличивается. Из модельных зависимостей $N(H,\Lambda)$ от θ , полученных по ϕ .(2.8) для оценки Λ для эксперимента ПАМИР ($H = 594 \text{ г/см}^2$, $E_{0\gamma \text{ th}} = 100 \text{ ГэВ}$), следуют $\Lambda = 85 \text{ г/см}^2$ при $E_{0 \text{ th}} = 50 \text{ ТэВ}$ и $\Lambda =$ 300 г/см² при $E_{0 \text{ th}} = 5 \text{ ПэВ}$, или lg($E_{0 \text{ th}}[\text{эВ}]$) = 0.009 Λ [г/см²] + 12.909.

На измеренные по угловому распределению пробеги Λ влияют пороговые энергии фотометрируемых на РГП γ -квантов, т.е. энергии γ -квантов, начиная с которых γ -кванты обрабатываются в эксперименте. На Рис.2.16 показано, что с уменьшением $E_{0\gamma th}$ при отборе ШАЛ по γ -квантам с $E_{0\gamma th}$, измеряемое значение Λ растет в диапазоне $E_{0\gamma th}$ от 10 ТэВ до 200 ГэВ. Для правильной оценки Λ необходимо фотометрирование γ -квантов на РГП с $E_{0\gamma th} <$ 200 ГэВ и применение моделей ШАЛ с порогом по отслеживаемым частицам в ШАЛ $E_{0\gamma th} < 200$ ГэВ.


Рис.2.16 – Зависимость пробега ШАЛ для поглощения в атмосфере Λ от $E_{0\gamma th}$ регистрируемых в РЭК γ -квантов. Моделирование выполнено для $H_{\Pi AMUP} = 594 \text{ г/см}^2$ и $E_0 \ge 5$ ПэВ по спектру ПКИ. Для каждого $E_{0\gamma th}$ из реконструированных ШАЛ отобраны те, где на уровне наблюдения были е[±] и γ -кванты с $E_{0\gamma th}$ выше заданной.

Распределение по sec θ для искусственных гало приведено на Рис.2.17 с регрессией:

$$\ln N = (4.8 \pm 0.6)(1 - \sec\theta) + (5.4 \pm 0.1), R_{\rm a}^{2} = 0.91$$
(2.9)

В соответствии с ф.(2.8) и ф.(2.9) пробег ШАЛ, в стволах которых зарегистрированы гало, $\Lambda_{\text{гало}}$, для уровня эксперимента ПАМИР $H_{\Pi AMUP} = 594 \text{ г/см}^2 \Lambda_{\text{гало}} = 10(12 \pm 1) \text{ г/см}^2 (E_{0 \text{ th}} = 5 \text{ ПэВ}, \Sigma E_{0\gamma} \ge 400 \text{ ТэВ} (E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ})$ (см. Табл.2.1)), что не противоречит пробегу Λ ШАЛ с $E_{0\gamma \text{ th}} \ge 4 \text{ ТэВ}$ (см. Рис.2.16).



Рис.2.17 – Распределение искусственных гало по sec θ .

По угловому распределению регистрируемых в РЭК семейств γ -квантов, зависимость Λ от глубины экспериментальной установки в атмосфере H оценена по искусственным ШАЛ, полученным для пороговых энергий ядер ПКИ $E_{0 \text{ th}} = 50$ ТэВ, пороговых энергий отбора γ -квантов на РГП $E_{0\gamma \text{ th}} = 1$ ТэВ и $\Sigma E_{0\gamma}$ ≥ 10 ТэВ ($E_{0\gamma} \geq 1$ ТэВ) в диапазоне глубин атмосферы H = 550-1000 г/см² и массовым составом, приведенным в Табл.1.5. Результат расчета приведен на Рис.2.18 с регрессионной зависимостью:

$$\Lambda[r/cm^{2}] = (0.02 \pm 0.01)H[r/cm^{2}] + (78 \pm 4)$$
(2.10)



Рис.2.18 – Зависимость пробега ШАЛ для поглощения Λ от глубины экспериментальной установки в атмосфере $H (E_0 \ge 50 \text{ ТэВ}, E_{0\gamma \text{ th}} = 1 \text{ ТэВ})$ в сравнении с данными эксперимента ПАМИР ($E_0 \ge 50 \text{ ТэВ}, \Sigma E_{0\gamma} \ge 100 \text{ ТэВ}$ ($E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}$) (см. Табл.1.6)).

Из ф.(2.10) следует медленный рост пробега ШАЛ для поглощения в атмосфере Л с Н. По результатам моделирования и в соответствии с ф.(2.10) значение $\Lambda > 74$ г/см², в то время как по данным эксперимента ПАМИР пробег для поглощения в атмосфере ШАЛ, образовавших семейства у-квантов, Л = (62 \pm 1) г/см² (см. Рис.2.18). Несоответствие расчетного и экспериментального Л может быть связано с недостаточной жесткостью модели МСО-FANSY. Однако с ростом жесткости модели увеличивается средний радиус семейств у-квантов, что приводит к несогласию с данными эксперимента ПАМИР. Более вероятно, что пробег ШАЛ для поглощения Л, полученный в эксперименте ПАМИР, ниже расчетного по причине отбора у-квантов по критерию пороговой энергии E_{0y th}, измеряемой фотометрированием үквантов на РГП. На Рис.2.16 показано, что уменьшение E_{0yth} до 200 ГэВ существенно увеличивает пробег ШАЛ для поглощения в атмосфере Л. Расчетные данные, приведенные на Рис.2.18 и полученные для $E_{0\gamma th} = 1$ ТэВ, скорректированные для $E_{0\gamma th}$ = 4 ТэВ и соответствующей отбору семейств γ квантов в эксперименте ПАМИР, показывают соответствие расчетных Л экспериментально полученному значению $\Lambda = (62 \pm 1) \, \text{г/cm}^2$ (см. Рис.2.16) без рассмотрения необычных событий в ШАЛ.

На Рис.2.19 приведено распределение расчетных гало по среднему потемнению <*D*>(*D*≥0.5) на РГП, проанализированному по регрессии:

 $P(\langle D \rangle) = \exp\{(10 \pm 1) - (12 \pm 1) / \langle D \rangle - (15 \pm 2)\ln(\langle D \rangle)\}, R_a^2 = 0.96(2.11)$

Из ф.(2.11) следует $M(\langle D \rangle) = 0.83$, что соответствует полученному в эксперименте ПАМИР распределению по $\langle D \rangle$ [8,9] и верифицирует модель ШАЛ+РЭК.



Рис.2.19 – Распределение искусственных гало по $\langle D \rangle (D \ge 0.5)$.

Исследование применимости модели ШАЛ+РЭК образования гало показало, что модель описания данных эксперимента ПАМИР описывает такие экспериментально полученные параметры, как $\langle R \rangle$, спектр площадей гало, долю многоцентровых гало, потоки гало для суммарной экспозиции ST = 3000 м^2 ·год·ср эксперимента ПАМИР, спектр гало по $\Sigma E_{0\gamma}$, что необходимо и достаточно для решения задачи оценки массового состава ПКИ методом гало.

2.3 Модели образования гало

(i) Гало образованы от распада π^0 -мезонов.

Распределение e^{\pm} и γ -квантов по $E_{0\gamma}$ в моделированных по MC0-FANSY ШАЛ от протонов и ядер Fe ПКИ с $E_0 \ge 5$ ПэВ:

 $lgN_{e,\gamma}^{\text{протоны}} = (-2.59 \pm 0.02)lg(E_{0\gamma}[\text{ТэB}]) + (4.51 \pm 0.02), R_a^2 = 0.99$ (2.12) $lgN_{e,\gamma}^{\text{Fe}} = (-2.56 \pm 0.01)lg(E_{0\gamma}[\text{ТэB}]) + (3.518 \pm 0.002), R_a^2 = 1.00$ (2.13) Из ф.(2.12) и ф.(2.13) следует, что максимальная энергия $E_{0\gamma}$ в ШАЛ, образованных протонами, составляет 55 ТэВ и в ШАЛ, образованных ядрами Fe, 24 ТэВ. В то же время ФПР первичных e^{\pm} и γ-квантов, обеспечивающие $S_{rano}^{\text{max}} = 40 \text{ мм}^2$ (см. Рис.2.20), соответствуют энергии $E_{0\gamma} = 1 \text{ ПэB}$.

На Рис.2.21 приведены максимальные площади гало $S_{\text{гало max}}$ от отдельных γ -квантов, полученные по ФПР (см. Табл.2.2) [26] для уровня потемнения на РГП D = 0.5. С ростом энергий γ -квантов, инициировавших ЭФК ШАЛ, максимум распределения смещается в сторону бо́льших глубин вещества и бо́льших $S_{\text{гало}}$. Однако максимальная глубина атмосферы $H = 1100 \text{ г/см}^2$ ограничивает максимальную $S_{\text{гало max}}$, образованную одиночным γ -квантом. Увеличение $E_{0\gamma}$ при максимально возможном H существенно не меняет максимальную $S_{\text{гало}}$ от одиночного γ -кванта, но увеличивает плотность потемнения D гало на РГП.



Рис.2.20 – ФПР ЭФК, рассчитанные для эксперимента ПАМИР [26] для первичных γ -квантов (сплошные линии) и е[±] (пунктирные линии). Вертикальным пунктиром отмечены *R*, соответствующие $S_{\text{гало}} = 1 \text{ мм}^2$ и $S_{\text{гало}} = 40 \text{ мм}^2$, с потоком N_{γ} , соответствующим D = 0.5.



Рис.2.21 – Максимальная площадь гало S_{гало max} от одиночных γ-квантов в зависимости от глубины вещества и энергии E_{0γ} в соответствии с ФПР, полученными для эксперимента ПАМИР [26].

 (ii) Гало образованы от распада странглетов в соответствии с моделью С.Б.Шаулова [107,114].

Странглет, – не разделенная на адроны кварковая материя, с равным количеством u-, d- и s-кварков. При взаимодействии странглета с атомами воздуха образуются потоки *Л*-гиперонов, продукты распада которых регистрируются в РЭК как гало. Относительно вклада странглетов в ПКИ научные дискуссии продолжаются.

(iii) Гало как продукт длиннопробежной компоненты ШАЛ, которая проявляется в избытке, относительно ожидаемого, количества событий в глубине атмосферы и природа которой не установлена.

Начиная с некоторой энергии E_0 в ШАЛ образуются частицы, возможно чармированные [102,113], образующие длиннопробежные вторичные каскады. Относительно типа ядерного взаимодействия, образующего длиннопробежные вторичные каскады, научные дискуссии продолжаются.

В экспериментах с РЭК избыток экспериментальных событий наблюдается: (а) в избытке семейств ү-квантов, регистрируемых на РГП, как избыток событий в глубокой свинцовой камере [131], (б) избыток событий в РЭК с воздушным зазором [102] и (в) избыток событий в эксперименте ТШВНС относительно событий, зарегистрированных в эксперименте ПАМИР.

Избыток событий в глубокой свинцовой камере назван «Тянь-Шаньским эффектом», – «при взаимодействии адронов с энергией выше 10¹³ эВ с ядрами атомов свинца появляются длиннопробежные каскады» [131,132]. Однако избыток событий в глубокой свинцовой камере и гало не имеют единую природу, т.к. гало, экспериментальная статистика которых получена в эксперименте ПАМИР, фотометрированы на глубине 5 см Рb Г-блока РЭК (см. Рис.1.4 и Табл.2.1), где длиннопробежный каскад не успевает развиться [131,132].

Избыток семейств γ -квантов с $\Sigma E_{0\gamma} \ge 100$ ТэВ, зарегистрированных в эксперименте ТШВНС относительно эксперимента ПАМИР, оценен по БД обоих экспериментов и составил 1.5 раза, избыток гало, – 2.4 раза. Избыток данных событий может быть связан с ростом пробега ШАЛ для поглощения в атмосфере Λ . Однако для вывода о росте Λ необходимо приведение к сопоставимым N_e и соответственно энергиям ядер ПКИ E_0 , соответствующим измеренным в экспериментах с РЭК значениям энергий γ -квантов $E_{0\gamma}$ и $\Sigma E_{0\gamma}$.

Положение, что в интервале глубин атмосферы между экспериментальными установками ПАМИР и ТШВНС ($\Delta H = 100 \text{ г/см}^2$) наблюдается избыток событий, проявляющийся в росте пробега ШАЛ для поглощения Λ , требует дополнительных экспериментальных данных. Однако можно обратить внимание, что в работах С.И.Никольского [73] и Г.Т.Зацепина [74] отсутствуют указания на избыток событий в эксперименте ТШВНС относительно уровня РЭК ПАМИР. Наблюдаемый избыток 100-ТэВ-х семейств γ -квантов в эксперименте ТШВНС относительно эксперимента ПАМИР в 1.5 раза и еще бо́льшая разница в 2.4 раза для гало не отрицают, что чем ближе к оси ШАЛ регистрируются события, тем с большей вероятностью наблюдается длиннопробежная компонента, вызванная неизученными событиями. Выводы по главе 2

Показано, что полученный вклад подпороговых γ -квантов в формирование площадей гало в стволах ШАЛ соответствует данным эксперимента ПАМИР. Объяснение площадей гало вкладом подпороговых γ -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.

- Верифицирована модель ШАЛ+РЭК одноцентровых и многоцентровых гало, регистрируемых в РЭК эксперимента ПАМИР. Применены ФПР е[±] 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;
- Проанализированы события, регистрируемые методом РЭК в стволе ШАЛ. Показано, что средний радиус семейств γ-квантов <*R*>, статистика гало и доля 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 $\langle R \rangle_{\Pi AM UP} = (1.94 \pm 0.06)$ 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 СNO 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 Не в массовом составе ПКИ;

 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 Не и много выше вероятности образования гало ядрами тяжелее Не 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.

Глава 3 Оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ

3.1 Метод гало оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ

К характеристикам гало, чувствительным к массовому составу ПКИ, относятся статистика гало, вероятности образования гало протонами, ядрами Не и ядрами >Не в массовом состав ПКИ, различающиеся в несколько раз (см. Табл.3.1), и доля многоцентровых гало. С массовым числом ядер ПКИ коррелирован также средний радиус $\langle R \rangle$ семейств γ -квантов, однако $\langle R \rangle$ не рассчитывается для гало.

Обозначим интенсивность ПКИ в точке генерации ШАЛ как $I_0 = I_p + I_{He}$ + $I_{>He}$, где I_p , I_{He} , $I_{>He}$, – интенсивности первичных протонов, ядер Не и ядер >Не соответственно. \tilde{N}_p , \tilde{N}_{He} , $\tilde{N}_{>He}$, – количество семейств γ -квантов, наблюдаемых на РГП, если принять, что все ядра ПКИ, – протоны, ядра Не и ядра >Не соответственно. W_p , W_{He} , $W_{>He}$, – вероятности образования семейств γ квантов протонами, ядрами Не и ядрами >Не соответственно. Тогда $I_0 = \tilde{N}_p/W_p = \tilde{N}_{He}/W_{He} = \tilde{N}_{>He}/W_{>He}$.

Количество экспериментально полученных семейств γ -квантов $N_0 = N_p + N_{\text{He}} + N_{\text{>He}}$, где N_p , N_{He} , $N_{\text{>He}}$, – количество семейств γ -квантов, образованных протонами, ядрами Не и ядрами >Не соответственно.

Обозначим P_p , P_{He} , $P_{>He}$ доли протонов, ядер He и ядер >He в массовом составе ПКИ соответственно. Тогда $N_p = I_0 P_p W_p$, $N_{He} = I_0 P_{He} W_{He}$, $N_{>He} = I_0 P_{>He} W_{>He}$.

Учитывая, что $P_{\rm p} + P_{\rm He} + P_{>\rm He} = 1$:

$$P_{\rm p} = \left\{ \frac{N_0 W_{\rm p}}{\tilde{N}_{\rm p}} - W_{\rm He} (1 - P_{>He}) - W_{>He} P_{>He} \right\} \left(W_{\rm p} - W_{\rm He} \right)^{-1}$$
(3.1)

$$P_{\rm He} = \left\{ \frac{N_0 W_{\rm p}}{\tilde{N}_{\rm p}} - W_{\rm p} (1 - P_{>He}) - W_{>He} P_{>He} \right\} \left(W_{\rm He} - W_{\rm p} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

$$P_{\rm p} = \frac{W_{\rm p}}{W_{\rm p} - W_{>He}} \frac{N_{\rm 0}}{\tilde{N}_{\rm p}} + \frac{1}{W_{\rm p} - W_{\rm He}} \left\{ W_{\rm p} \frac{W_{\rm He} - W_{>He}}{W_{\rm p} - W_{>He}} - W_{\rm He} \right\} - \frac{W_{\rm He} - W_{>He}}{W_{\rm p} - W_{>He}} P_{\rm He}$$
(3.3)

Из ф.(3.1) и ф.(3.2) следует зависимость P_p и P_{He} от W_p , W_{He} , $W_{>He}$ и N_0/\tilde{N}_p . Расчетные вероятности образования гало ядрами ПКИ приведены в Табл.3.1, где $W_{p,He,>He}^{(100)}$, $W_{p,He,>He}^{(400)}$, $W_{p,He,>He}^{f}$, – вероятности образования

100-, 400-ТэВ-х семейств γ -квантов и структурных гало, соответственно. Из Табл.3.1 следует, что вероятности образования гало W_p , W_{He} и $W_{>He}$ существенно различаются, что позволяет оценить доли протонов, ядер Не и ядер >He P_p , P_{He} и $P_{>He}$ в массовом составе ПКИ.

Табл.3.1 – Вероятности образования семейств γ -квантов ядрами ПКИ. Критерии моделирования ШАЛ соответствуют условиям эксперимента ПАМИР, $E_{0 \text{ th}} = 5 \text{ ПэВ.}$

W _p , %			W _{He} , %				W>He, %				
$W_{\mathrm{p}}^{(100)}$	$W_{p}^{(400)}$	Гало	W_{p}^{f}	$W_{\rm He}^{(100)}$	$W_{\mathrm{He}}^{(400)}$	Гало	$W_{\rm He}{}^{\rm f}$	$W_{>\rm He}^{(100)}$	W>He ⁽⁴⁰⁰⁾	Гало	W>He ^f
9.24	2.32	1.76	0.73	3.28	0.71	0.44	0.18	2.24	0.28	0.13	0.07

Из Табл.3.1 следуют расчетные отношения $W_p^{(100)}: W_{He}^{(100)}: W_{>He}^{(100)} = 3:1,$ $W_p^{(400)}: W_{He}^{(400)}: W_{>He}^{(400)} = 3:3, W_p: W_{He}: W_{>He} = 4:3, W_p^f: W_{He}^f: W_{>He}^f = 4:3$ и $W_p^{(100)}: W_{>He}^{(100)} = 4, W_p^{(400)}: W_{>He}^{(400)} = 8, W_p: W_{>He} = 14, W_p^f: W_{>He}^f = 10.$

В диапазоне энергий ядер $E_0 = 5-10$ ПэВ $W_p^{(100)} = 5.05\%$, $W_{He}^{(100)} = 0.79\%$, $W_{>He}^{(100)} = 0.05\%$ или, учитывая степенной по E_0 спектр ПКИ, более 95% всех 100-ТэВ-х семейств γ -квантов образованы протонами и ядрами Не массового состава ПКИ.

Количество экспериментальных 400-ТэВ-х семейств γ -квантов с учетом 25%-го роста измеряемой энергии при прохождении ЭМ каскадов через Гблок РЭК, или 500-ТэВ-х семейств γ -квантов, зарегистрированных в РЭК ПАМИР, составляет 185, однако погрешность оценки энергий отдельных γ квантов $E_{0\gamma}$ при фотометрировании 400-ТэВ-х семейств γ -квантов существенна. Точность оценки $E_{0\gamma}$ по зависимости $D(\rho_e)$ ф.(1.5) снижается с ростом $E_{0\gamma}$, и начиная с 300 ТэВ значения $E_{0\gamma}$ носят оценочный характер.

На Рис.3.1 показана вероятность образования гало протонами, ядрами Не и ядрами >Не в зависимости от E_0 . Из Рис.3.1 следует, что до $lgE_0 = 16.7$ все гало образованы протонами и ядрами Не. Образование гало сверхтяжелой группой ядер начинается с $E_0 > 100$ ПэВ.



Рис.3.1 – Вероятности образования гало протонами, ядрами Не и ядрами > Не.

3.2 Модельная зависимость оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ по характеристикам гало

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 P_p и P_{He} , примем $W_p = nW_{He}$, $W_{He} = mW_{>He}$, $w = N_0/\tilde{N}_p$. Тогда ф.(3.1) и ф.(3.2) перепишутся:

$$P_{\rm p} = \frac{wn-1}{n-1} + \frac{(m-1)}{(n-1)} \frac{P_{>He}}{m}$$
(3.4)

$$P_{\rm He} = \frac{n}{1-n} (w-1) - \frac{(1-mn)P_{>He}}{(1-n)m}$$
(3.5)

$$P_{\rm p} = \frac{wmn - 1 - (m-1)P_{\rm He}}{mn - 1} \tag{3.6}$$

При m = n = 1, т.е. при равных вероятностях образования регистрируемых событий как от протонов, так и от прочих ядер массового состава ПКИ, модель ШАЛ+РЭК нечувствительна к типу первичного ядра ПКИ и не применяется для описания данных эксперимента ПАМИР.

С ростом *m* и *n*, или разницы в вероятностях образования гало ядрами ПКИ различного типа, характеристики гало, например, статистика гало, образованных различными ядрами, начинают существенно отличаться друг от друга. Расчеты показали, что при замене всех ядер ПКИ протонами количество гало составит 140, ядрами He, – 35, ядрами >He, – 5-10 гало. Граничные

84

значения, определяющие коридор ошибок на уровне сигма, $N_0 \pm \sqrt{N_0} = 53-69$, $\widetilde{N}_p \pm \sqrt{\widetilde{N}_p} = 128-152$ определяют предельно возможные доли легких ядер P_{p+He} и тяжелых ядер $P_{>He}$, не противоречащие экспериментальным данным. Существенная разница между вероятностями образования гало ядрами различного типа полагает, что модель ШАЛ+РЭК чувствительна к типу первичного ядра и данные эксперимента описываются моделью.

Особенность РЭК эксперимента ПАМИР состоит в преимущественной регистрации семейств γ -квантов, образованных протонами и, в меньшей степени, ядрами He (>95%). При $m,n \gg 1$ из $\phi.(3.4)$ и $\phi.(3.5)$ 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 $m = n \ge 4$ соотношения $P_{p,He}(n) / P_{p,He}(n + 1)$ и $P_{p,He}(m + 1)$ и $P_{p,He}(m + 1)$ находятся в интервале $\pm 10\%$, что соответствует критериям по вариациям потемнений от радиоактивной метки D_m и фона и D_{fon} и технологии отбора экспериментального материала РЭК ПАМИР. Т.е. модельно определяемые вероятности образования семейств γ -квантов W (см. Табл.3.1) перестают влиять на выводы о доле легких ядер в массовом составе ПКИ. В пределе при m и $n \rightarrow \infty P_p = w$ и $P_{He} = 1 - w - P_{>He}$. При обратной ситуации, когда семейство γ -квантов регистрируется установкой эксперимента независимо от типа первичного ядра, выводы о доле лег-

Зависимости ϕ .(3.1) и ϕ .(3.2) с учетом значений Табл.3.1 для количества зарегистрированных гало $N_0 = 61$:

$$P_{\rm p} = 0.24 P_{\rm >He} + 0.25 \tag{3.7}$$

$$P_{\rm He} = -1.24 P_{\rm >He} + 0.75 \tag{3.8}$$

$$P_{\rm p} = 0.39 - 0.19 P_{\rm He} \tag{3.9}$$

 $N_0 - \sqrt{N_0} = 53$:

$$P_{\rm p} = 0.24 P_{\rm >He} + 0.17 \tag{3.10}$$

$$P_{\rm He} = -1.24 P_{\rm >He} + 0.83 \tag{3.11}$$

$$P_{\rm p} = 0.33 - 0.19 P_{\rm He} \tag{3.12}$$

 $N_0 + \sqrt{N_0} = 69$:

$$P_{\rm p} = 0.24 P_{\rm >He} + 0.32 \tag{3.13}$$

$$P_{\rm He} = -1.24 P_{\rm >He} + 0.68 \tag{3.14}$$

$$P_{\rm p} = 0.45 - 0.19 P_{\rm He} \tag{3.15}$$

Из ф.(3.8) следует, что доля тяжелых ядер в массовом составе ПКИ $P_{>\text{He}} \le 0.61$ или не может быть больше 61%. При доле тяжелых ядер $P_{>\text{He}} > 61\%$ в эксперименте ПАМИР не будет наблюдаемой статистики гало. С учетом ошибки в статистике гало $N_0 \pm \sqrt{N_0}$, наблюдаемая статистика гало, составляющая 61 гало при полной экспозиции экспериментальной установки РЭК ПАМИР $ST = 3000 \text{ м}^2$ год ср, требует минимум (39 ± 6)% доли легких ядер и максимум (61 ± 6)% доли тяжелых ядер >Не в массовом составе ПКИ. Из 39% легких ядер минимальная доля протонов составляет 20% и минимальная доля ядер Не 19%, см. ф.(3.9). Бо́льшая доля ядер Не не обеспечит экспериментальную статистику гало. Из ф.(3.8) также следует, что каждое зарегистрированное в эксперименте гало увеличивает минимальную долю легких ядер на 1%.

На Рис.3.2 сплошными и пунктирными линиями показаны возможные значения P_p , P_{He} и $P_{>He}$, полученные по ф.(3.1) и ф.(3.2). Условию $P_p = P_{He}$ соответствует $P_p = P_{He} = (1 - P_{>He}) / 2$, $(P_p + P_{He} + P_{>He} = 1)$. Соотношения долей легких и тяжелых ядер в массовом составе ПКИ, следующие из Рис.3.2, приведены в Табл.3.2.

Табл.3.2 – Доли легких ядер *p*+He и тяжелых ядер >He в массовом составе ПКИ, полученные для количества гало $N_0 = 61 \pm \sqrt{61}$ эксперимента ПАМИР.

<i>Е</i> ₀ , ПэВ	$P_{\rm p+He}, \%$	$P_{>\mathrm{He}}, \%$
$\lesssim 3$	67-100	0-33
3-5	58-78	22-42
5-10	45-67	33-55



Рис.3.2 – Графическое представление соотношений ф.(3.1) (сплошная линия, протоны) и ф.(3.2) (пунктирная линия, ядра Не) для модельных вероятностей $W_{\rm p}$, $W_{\rm He}$ и $W_{\rm >He}$ (условия эксперимента ПАМИР). Серая линия соответствует $P_{\rm p} = P_{\rm He} = (1 - P_{\rm >He}) / 2$. По данным эксперимента ПАМИР $N_0 = 61$ гало.

3.3 Доля легких ядер в массовом составе ПКИ по многоцентровым гало

Обозначим N_s – количество многоцентровых гало, S_0 – долю многоцентровых гало, $N_s = N_0S_0$, где $N_0 = 61 \pm \sqrt{61}$, $N_s = 14 \pm \sqrt{14}$ (см. Табл.1.7). В Табл.3.3 приведены значения S_0 для протонов, ядер Не и ядер >Не и экспериментальная доля многоцентровых гало S_0 , полученная в эксперименте ПАМИР.

Табл.3.3 – Доля многоцентровых гало, образованных протонами, ядрами Не, C, Fe и доля многоцентровых гало, полученная в эксперименте ПАМИР.

$$S_{0 p}$$
 $S_{0 He}$
 $S_{0 C}$
 $S_{0 Fe}$
 $S_{0 \Pi AM UP}$

 0.25
 0.45
 0.59
 0.70
 0.23 \pm 0.07

Из Табл.3.3 следует, что многоцентровые гало в эксперименте ПАМИР образованы скорее протонами, нежели более тяжелыми ядрами. Вместе с тем многоцентровые гало характерны для более тяжелых ядер ПКИ.

Метод гало ф.(3.1) и ф.(3.2) применительно к многоцентровым гало:

$$P_{\rm p} = \left\{ \frac{N_0 W_{\rm p}}{\tilde{N}_{\rm p}} S_0 - W_{\rm He} S_{\rm He} (1 - P_{>He}) - W_{>He} P_{>He} S_{>He} \right\} \left(W_{\rm p} S_{\rm p} - W_{\rm He} S_{\rm He} \right)^{-1}$$
(3.16)

$$P_{\rm He} = \left\{ \frac{N_0 W_p}{\tilde{N}_p} S_0 - W_p S_p (1 - P_{>He}) - W_{>He} P_{>He} S_{>He} \right\} \left(W_{\rm He} S_{\rm He} - W_p S_p \right)^{-1} (3.17)$$

Зависимости ф.(3.16) и ф.(3.17) с учетом значений Табл.3.3 для многоцентровых гало $S_{0 \Pi AMUP} = 0.16$ -0.3 определяют доли легких и тяжелых ядер в массовом составе ПКИ как $P_{>He} \leq 57\%$, $P_p \geq 8\%$, $P_{He} \geq 35\%$, p+He $\geq 43\%$. Оценка P_p и P_{He} по многоцентровым гало снижает нижнюю границу оценки доли протонов P_p и увеличивает оценку доли ядер He P_{He} в массовом составе ПКИ относительно оценок P_p и P_{He} , полученных по всем гало.

3.4 Изменение массового состава ПКИ при $E_0 = 1-100$ ПэВ

К измеряемым ливневой установкой параметры ШАЛ, по которым возможна оценка изменения массового состава ПКИ с изменением E_0 , относятся количество мюонов N_{μ} , поперечный возраст ШАЛ *S* как параметр функции НКГ, максимум развития ШАЛ X_{max} и другие. Для оценки энергий ядер ПКИ E_0 по N_e при анализе зависимостей $N_{\mu}(E_0)$ и $S(E_0)$ необходим учет массовых чисел ядер ПКИ [78].

Для эксперимента ПАМИР, где регистрируются ШАЛ, образованные преимущественно протонами, $E_0[\Gamma \ni B] = \phi N_e$, где $\phi = 2 \Gamma \ni B [107,110]$ для глубины экспериментальной установки в атмосфере H = 600-700 г/см², что соответствует исследованиям С.Б.Шаулова [107]:

$$E_0 = 15.1 \cdot 0.9 \cdot N_e^{0.84} \Gamma \mathfrak{B}$$
(3.18)

Исследования, выполненные в МГУ, показали, что коэффициент ϕ растет до 10 ГэВ см⁻²с⁻¹ для H = 1000 г/см² [122,123].

3.4.1 Оценка изменения массового состава ПКИ по S и N_µ

Массовый состав ПКИ изучается как по характеристикам стволов ШАЛ методом гало с пространственным разрешением 30 мкм, так и по характеристикам индивидуальных ШАЛ, таким как S, N_e , N_μ , X_{max} и др. Оценка массового состава ПКИ по характеристикам ШАЛ существенно зависит от модели ШАЛ. Для оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ методом гало применена статистика гало, несущих информацию о первичных актах взаимодействия ядер ПКИ с атомами атмосферы по причине локализации гало в стволах ШАЛ и что делает метод гало модельно-малозависимым. Однако метод гало имеет ограничение, состоящее в том, что оценка доли легких ядер соответствует не диапазону по E_0 , но средневзвешенной по вероятностям образования гало энергии ядер.

Полученные методом гало доли легких и тяжелых ядер в массовом составе ПКИ приведены в Табл.3.2, где показано, что доля легких ядер в диапазоне E_0 до 10 ПэВ снижается, что определено модельными вероятностями образования гало. С ростом E_0 до 100 ПэВ 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. сигнатура гало становится нечувствительной к типам ядер, инициировавших ШАЛ, стволы которых регистрируются в РЭК как гало.

Статистка событий в экспериментах с ШАЛ существенно выше, нежели статистика событий, полученных в экспериментах с РЭК. Однако по причине значительных флуктуаций и модельной зависимости характеристик ШАЛ, оценки долей ядер в массовом составе ПКИ в диапазоне $E_0 = 1-100$ ПэВ сильно различаются. Например, доли протонов и ядер Не в массовом составе ПКИ, оцененные в различных экспериментах, различаются в данном диапазоне по E_0 от 5% до 50% [4]. В то же время, оценка изменения содержания групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ возможна по статистке ШАЛ. Количество ШАЛ, зарегистрированных в эксперименте, должно быть достаточно для того, чтобы характеристики ШАЛ, характеризующие типы ядер ПКИ, например возраст *S* ШАЛ, могли проявить себя в общей статистике.

89

К одному из экспериментов, где собрана значительная статистика ШАЛ с такими характеристиками, как N_e , N_μ , E_0 и др., относится эксперимент KASCADE-Grande, Германия, Карлсруэ, предоставивший свои экспериментальные данные в открытом доступе [31] и анализ данных которого продолжается. Экспериментальная установка размещена на глубине 1000 г/см² стандартной атмосферы и предназначена для изучения ШАЛ в диапазоне энергий ядер ПКИ $E_0 = 0.1$ ПэВ – 1 ЭэВ. Оценка доли легких ядер, полученная в эксперименте KASCADE-Grande, в диапазоне $E_0 = 3$ ПэВ – 0.3 ЭэВ составила от 10% до 30% с наблюдаемым изломом в спектре легких ядер ПКИ при $E_0 =$ 3 ПэВ и преобладанием ядер Не [167].

В [1,2,4,5] возраст ШАЛ *S* проанализирован по 100 млн событий эксперимента KASCADE-Grande [31]. Для оценки $\langle A \rangle$ в [1,2,4] изучено изменение ΔS , $\Delta \lg N_e$ и $\Delta \lg \langle A \rangle$. По результатам исследований [1,2,4] показано, что в диапазоне $\lg N_e = 6.0-6.5$ изменение $\Delta \langle S \rangle = 0$ и снижение $\langle S \rangle$ с ростом N_e уравновешено ростом $\langle S \rangle$ с ростом *A*, что говорит об утяжелении массового состава ПКИ. Изменение среднего значения массового числа ядер ПКИ приведено в Табл.3.4.

Табл.3.4 – Изменение среднего значения массового числа <A> ядер ПКИ [4].

lgN _e	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	4.5-7.5
$\Delta lg < A >$	-0.02	0.16	0.20	0.14	0.03	0.17	0.67

Показано [3], что ШАЛ с минимальными значениями *S* инициированы более легкими ядрами, в то время как ШАЛ с максимальными *S*, – более тяжелыми ядрами ПКИ. Чувствительность *S* к массовому составу ПКИ проанализирована, например, по результатам обработки экспериментальных данных НАWC (глубина установки 630 г/см² стандартной атмосферы) [165], где показано снижение *S* с ростом E_0 . По данным эксперимента ARGO-YBJ (610 г/см²) [39] получено соотношение *S*(X_{max}), из которого следует, что минимальным *S* с большей вероятностью соответствуют более легкие ядра ПКИ, в то время как более тяжелые ядра ПКИ соответствуют меньшим значениям X_{max} и бо́льшим значениям *S*:

$$S_{\text{протоны}} = S_{\text{He}} = S_{\text{Fe}} = -(313 \pm 5)10^{-5} X_{\text{max}} [\Gamma/\text{cm}^2] + (2.94 \pm 0.02), R_a^2 = 0.99$$
 (3.19)

Количество мюонов N_{μ} в ШАЛ растет с ростом N_e и A как $N_{\mu} \sim A^{\alpha}$. Зависимость N_{μ} от E_0 получена моделированием по MC0-FANSY для эксперимента с РЭК для протонов и ядер Fe в массовом составе ПКИ [4]:

$$lg N_{\mu}^{\Pi \text{potohis}} = (0.86 \pm 0.01) lg (E_0[\Pi \Rightarrow \text{B}]) + (3.61 \pm 0.01), R_a^2 = 0.99$$
$$lg N_{\mu}^{\text{Fe}} = (0.85 \pm 0.01) lg (E_0[\Pi \Rightarrow \text{B}]) + (3.86 \pm 0.01), R_a^2 = 0.99 \quad (3.20)$$

Из ф.(3.20) следует значение $\alpha = 0.14$, что соответствует эффективной множественности рождения $\pi^{0,\pm} N = 19$, определенное моделью MC0-FANSY, что несколько меньше, чем в других моделях ШАЛ.

Из ф.(3.20) следует зависимость массового числа A от множественности рождения π -мезонов N, а также N_{μ} и E_0 :

$$lgA = 5.68 lgN(lgN_{\mu} - 0.86 lgE_0 - 3.61)$$
(3.21)

Средние значения массовых чисел для нескольких значений E_0 приведены в Табл.3.5 [4]. Данные Табл.3.5 не противоречат, например, результатам эксперимента IceCube [163]. Анализ данных по распределению N_{μ}/E_0 показывает, что массовый состав ПКИ при энергии образования гало $E_0 = 10$ ПэВ остается смешанным со средними ядрами не тяжелее группы СNO массового состава ПКИ.

Табл.3.5 – Среднее значение массового числа <A> ядер ПКИ.

<i>E</i> ₀ , ПэВ	2	4	9	18	35
<a>	10 ± 2	17 ± 4	9 ± 2	5 ± 1	7 ± 1

По данным экспериментов с ШАЛ и РЭК, позволяющих выделить события, образованные протонами, получены экспериментальные зависимости [4]:

$$lgN_{\mu}^{\Pi \text{ротоны}} = (0.71 \pm 0.02) lgN_{\text{e}} - (0.5 \pm 0.1), R_{\text{a}}^{2} = 0.98$$
$$lgN_{\mu}^{\Pi \text{IIA}\Pi} = (0.74 \pm 0.01) lgN_{\text{e}} - (0.48 \pm 0.06), R_{\text{a}}^{2} = 0.99$$
(3.22)

Из ф.(3.22) следует, что $N_{\mu}^{\text{ШАЛ}}$ растет с N_{e} быстрее, нежели N_{μ}^{p} , что, учитывая ошибки, указывает на утяжеление массового состава ПКИ в диапазоне $E_{0} = 1-100$ ПэВ. Сравнивая ф.(3.20) и ф.(3.22) для протонов, получаем $E_{0}[\Gamma$ эВ] = $17N_{e}^{0.83}$, что соответствует соотношению ф.(3.18).

Исследования показали утяжеление массового состава ПКИ при $E_0 = 1$ -100 ПэВ со средними значениями <*A*> ядер ПКИ не тяжелее группы СNО и минимальной долей легких ядер 39% в массовом составе ПКИ при $E_0 = 10$ ПэВ. Среднее значение массового числа ядер ПКИ, оцененное по соотношению N_{μ}/E_0 и соответствующее $E_0 = 2.35$ ПэВ, составляет $\langle A \rangle = 5.17$ (см. Табл.3.5), что не противоречит результатам анализа данных других экспериментов, например, Pierre Auger Observatory TALE, где $\langle \ln A \rangle = 2$ при $E_0 = 2$ ПэВ [175].

3.4.2 Метод возраста ШАЛ S_{min-max} оценки изменения массового состава ПКИ

Метод возраста ШАЛ $S_{\min-max}$ основан на использовании статистики характеристик ШАЛ, чувствительных к массовому составу ПКИ. Методом $S_{\min-max}$ формируется статистика характеристик групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ, инициированные которыми ШАЛ зарегистрированы в эксперименте. В расчетах использована база данных (БД) KASCADE-Grande [31], содержащая информацию по характеристикам более чем 100 млн ШАЛ. БД KASCADE-Grande включает возраст ШАЛ *S*, регистрируемый в эксперименте в диапазоне 0.10-1.48, энергии E_0 ядер, инициировавших ШАЛ, определяемые в диапазоне $lg(E_0[эВ]) = 14.00-18.00$, количество электронов N_e , регистрируемых в диапазоне $lgN_e = 1.00-8.70$, и мюонов N_{μ} , регистрируемых в диапазоне $lgN_{\mu} = 1.00-7.70$. Анализу по БД KASCADE-Grande доступны такие характеристики ШАЛ, как зенитный (0-60°) и азимутальный углы прихода ШАЛ, время регистрации ШАЛ, атмосферное давление и температура в момент регистрации ШАЛ, координаты оси ШАЛ и другие.

Количество заряженных частиц в ШАЛ на уровне наблюдения эксперимента KASCADE-Grande определено по ФПР НКГ [31,82]:

$$\rho_{\rm e,\mu}(r) = \frac{\Gamma(\beta-S)}{2\pi r_{0\,\rm e,\mu}^2 \Gamma(S-\alpha+2)\Gamma(\alpha+\beta-2S)} N_{\rm e,\mu} \left(\frac{r}{r_{0\,\rm e,\mu}}\right)^{S-\alpha} \left(1+\frac{r}{r_{0\,\rm e,\mu}}\right)^{S-\beta} = C(S) N_{\rm e,\mu} \left(\frac{r}{r_{0\,\rm e,\mu}}\right)^{S-2} \left(1+\frac{r}{r_{0\,\rm e,\mu}}\right)^{S-4.5} (3.23)$$

Параметры ф.(3.23), – *r*₀ и *S*. Радиус Мольера *r*₀ характеризует ШАЛ на глубине экспериментальной установки в атмосфере. Для стандартной атмо-

сферы r_0 для эксперимента ПАМИР ($H = 594 \text{ г/см}^2$) $r_{0,e} = 122 \text{ м}$, $r_{0,\mu} = 644 \text{ м}$, и для эксперимента KASCADE-Grande ($H = 1000 \text{ г/см}^2$) $r_{0,e} = 85 \text{ м}$, $r_{0,\mu} = 420 \text{ м}$.

Из результатов анализа чувствительности возраста ШАЛ к типу первичного ядра следует, что БД характеристик ШАЛ, отсортированная по возрастанию *S*, содержит в своем начале записи параметров ШАЛ, образованных группой самых легких ядер в массовом составе ПКИ, в конце, – записи параметров ШАЛ, образованных группой самых тяжелых ядер. По мере набора статистики ШАЛ (в эксперименте KASCADE-Grande более 100 млн), первые (либо последние) по возрасту ШАЛ с растущей вероятностью будут инициированы самыми легкими (самыми тяжелыми) ядрами.

Метод возраста ШАЛ $S_{min-max}$ оценки изменения массового состава ПКИ с изменением E_0 имеет ограничения в изучении полученных спектров групп ядер. При отборе ШАЛ методом $S_{min-max}$ невозможно сделать вывод, каким типом ядра инициирован данный ШАЛ. Однако можно утверждать, что в отобранную группу входят ШАЛ, образованные самыми легкими либо самыми тяжелыми ядрами в массовом составе ПКИ при данной энергии ядер E_0 . Также неизвестна абсолютная нормировка потоков различных типов ядер, т.к для анализа отбирается равное количество самых легких, самых тяжелых ядер и ядер смешанного состава ПКИ. Т.е. нельзя делать выводы о процентном соотношении самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ. Однако метод $S_{min-max}$ позволяет оценить показатели спектров и нерегулярности в спектрах групп самых легких и самых тяжелых групп ядер в массовом составе ПКИ, регистрируемых в эксперименте.

Алгоритм формирования статистик характеристик ШАЛ, инициированных самыми легкими и самыми тяжелыми ядрами в массовом составе ПКИ:

- Набранная в эксперименте KASCADE-Grande и использованная в исследованиях статистика характеристик ШАЛ состоит из 100 млн событий.
 С ростом количества экспериментально зарегистрированных событий точность метода S_{min-max} сепарации самых легких и самых тяжелых групп ядер повышается.
- Полученная в эксперименте статистика характеристик ШАЛ сортируется по параметру ШАЛ, чувствительному к типу ядра ПКИ, иницииро-

вавшему ШАЛ. В методе S_{min-max} к параметру, чувствительному к типу ядра ПКИ, отнесен возраст ШАЛ.

Отбор фиксированного количества событий как 1% событий от общей статистики характеристик ШАЛ. Проанализировано 1 млн событий с характеристиками ШАЛ, инициированных группой самых легких ядер в массовом составе ПКИ при сортировке по возрастанию возраста ШАЛ *S*, и 1 млн событий с характеристиками ШАЛ, инициированных группой самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ при сортировке по убыванию *S*.

Полученные таким образом выборки из БД КАSCADE-Grande содержат энергии ядер E_0 и другие характеристики ШАЛ, относящиеся к группам самых легких и самых тяжелых ядер массового состава ПКИ, что позволило оценить показатели спектров групп ядер и нерегулярности в их спектрах. Результаты применения метода $S_{\min-max}$ к обработке экспериментальных данных КАSCADE-Grande приведены на Рис.3.3 как спектры групп самых легких, самых тяжелых и всех ядер в массовом составе ПКИ в диапазоне $E_0 = 1$ -100 ПэВ, и Рис.3.4 как спектры групп ядер с нерегулярностями и показателями спектров.

3.4.3 Спектры групп самых легких и самых тяжелых ядер

Спектры групп самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ в диапазоне $E_0 = 1-100$ ПэВ, полученные по статистике эксперимента KASCADE-Grande характеристик ШАЛ, приведены на Рис.3.3 и Рис.3.4. Спектры построены методом $S_{\min-max}$ с целью оценить нерегулярности и показатели спектров [5].



Рис.3.3 – Интегральные спектры по E_0 самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ в диапазоне по $E_0 = 1-100$ ПэВ.

На Рис.3.3 показатели наклонов спектров γ приведены для самой легкой, самой тяжелой и смешанной групп ядер интегральных спектров по E_0 ПКИ при статистке 1 млн событий для каждой группы ядер. Соответствующие регрессии для оценок γ проведены ММП по диапазонам данных, отмеченных на Рис.3.3 серым. Изломы в спектрах групп ядер определены как точки пересечения регрессионных прямых до и после предполагаемой локализации излома по E_0 (см. Табл.3.6).

В Табл.3.6 показано, что изменения наклонов спектров $\Delta \gamma$ для самой легкой и самой тяжелой групп ядер близки и составили $\Delta \gamma = 0.6$, в то время как $\Delta \gamma$ для смешанной группы в отмеченном на Рис.3.3 диапазоне по E_0 меньше и составляет $\Delta \gamma = 0.2$ -0.3, что указывает на дополнительный источник ядер группы Не-СNO в области излома спектра по E_0 ПКИ. Как показано далее на Рис.3.4, спектры самых легких и самых тяжелых ядер, приведенные на Рис.3.3, идут не с постепенным укручением и не с постепенным ростом показателя γ спектра по E_0 , но со сформированными изломами (нерегулярностями) в спектрах по E_0 .

95

На Рис.3.4 спектры самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ показаны с детализацией изменения показателей γ в диапазоне по $E_0 = 1-100$ ПэВ [5]. На Рис.3.4 показан характер спектров самых легких и самых тяжелых ядер в области излома спектра по E_0 ПКИ, в области образования гало в стволах ШАЛ при $E_0 = 10$ ПэВ и при E_0 около 100 ПэВ. Методом гало показано [4], что при $E_0 = 10$ ПэВ минимальная доля легких ядер *p*+Не в массовом составе ПКИ составляет 39% с приблизительно одинаковым соотношением доли протонов и ядер Не.



Рис.3.4 – Интегральные спектры самых легких и самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ. Усредненный по всей статистке эксперимента KASCADE-Grande характеристик экспериментальных данных ШАЛ спектр по *E*₀ обозначен двойной серой линией.

Показатели спектров самой легкой и самой тяжелой групп ядер ПКИ, приведенные на Рис.3.4, сведены в Табл.3.6. Из Рис.3.4 и Табл.3.6 следует, что излом в спектре по E_0 группы самых легких ядер в массовом составе ПКИ расположен при $E_0 = 10^{0.55} = 3.5$ ПэВ, что соответствует излому в общем спектре ПКИ, построенному по всей экспериментальной статистике ШАЛ эксперимента KASCADE-Grande. Отсюда следует, что массовый состав ПКИ до излома при $E_0 = 3.5$ ПэВ состоит в основном из легких ядер, положение

излома в спектре которых определяет излом в спектре всех ядер. Излом в спектре самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ, регистрируемых в эксперименте KASCADE-Grande, расположен при $E_0 = 10^{1.26} = 18$ ПэВ. Изломы ядер, относящихся к прочим группам, расположены в диапазоне по $E_0 = 4$ -18 ПэВ.

Из Рис.3.4 и Табл.3.6 следует, что в диапазоне по $E_0 = 1-100$ ПэВ показатель наклона спектра самых легких ядер $\gamma = 2.1-2.7$ существенно больше показателя спектра самых тяжелых ядер $\gamma = 1.5-2.1$, что указывает на утяжеление массового состава ПКИ [5].

Табл.3.6 – Энергии, при которых наблюдаются нерегулярности в спектрах по *E*₀ групп ядер в массовом составе ПКИ.

Группа ядер					
ПКИ, реги-	Статистика 1 млн со-		Наклон инте-	Изло	омы в
стрируемых в	бытий из БД	Диапазон	грального спек-	спектрах по	
эксперименте	KASCADE-Grande	<i>Е</i> ₀ , ПэВ	тра по $E_0~\gamma$	$E_0 \Pi K$	И, ПэВ
Самые легкие	S = 0.10, 0.51	1.2-2.3	2.100 ± 0.004	2.5	
ядра	S = 0.10 - 0.31	4.7-27.0	2.68 ± 0.06	5.5	
Все ядра		1.2-2.3	1.68 ± 0.01	33	-
		4.7-19.1	1.94 ± 0.01	5.5	27.8
	S = 0.10 - 1.48	27.0-54.5	1.764 ± 0.007	- 27.0	
		0.1-3	1.62 ± 0.02	3.6	
		5-1000	2.09 ± 0.01		
Самые	S = 1.26 + 1.49	1.2-13.4	1.482 ± 0.005	- 18.1	
тяжелые ядра	S = 1.30 - 1.48	27.0-109.6	2.075 ± 0.004		

Из Рис.3.4 следует, что изломы в спектрах по E_0 ядер ПКИ наблюдаются как для самых легких, так и для самых тяжелых ядер массового состава ПКИ, т.е. механизм формирования изломов в спектре по E_0 ПКИ одинаков для всех групп ядер. Вместе с тем, в спектре всех ядер наблюдаются нерегулярности, определяющие изменения показателя наклона спектра ± 0.1 в узких интервалах по E_0 . В частности, при $E_0 < 3$ ПэВ показатель спектра всех ядер $\gamma = 1.7$, при $E_0 = 3-27$ ПэВ $\gamma = 1.9$ и при $E_0 > 27$ ПэВ $\gamma = 1.8$. Такие нерегулярности в спектре по E_0 ПКИ могут быть связаны как с методикой эксперимента, так и указывать на локальные источники ядер различных групп ПКИ.

К механизмам изменения массового состава ПКИ в области первого излома спектра по *E*₀ ПКИ можно отнести, например, модель локального источника Vela Ерлыкина-Павлюченко [141,142], объясняющую формирование

бампа в спектре по E_0 ПКИ дополнительным источником легких ядер, определяющим долю легких ядер как 48 + 40 = 88% при $E_0 = 3-5$ ПэВ (см. Табл.1.2). На Рис.3.5 показано, что после излома в спектре по E₀ самых тяжелых ядер ПКИ в спектре всех ядер наблюдается бамп, начинающийся от $E_0 = 10^{1.44} = 28 \text{ ПэВ}$ и до $E_0 = 100 \text{ ПэВ}$. Данной нерегулярности в спектре по E_0 массового состава ПКИ при $E_0 > 28$ ПэВ соответствует наивероятная энергия $E_0 = 10^{1.74} = 55$ ПэВ. Аналогичная нерегулярность в спектре по E_0 с наивероятной $E_0 = 10^{1.86} = 72 \text{ ПэВ}$ получена в эксперименте GAMMA по результатам обработки БД GAMMA-07 (Армения, Арагац, 700 г/см² стандартной атмосферы) [178]. Бамп в спектре по E_0 начинается после излома в спектре самых тяжелых ядер, т.е. природа бампа не может быть связана с изломами в спектрах ядер ПКИ от протонов до ядер Fe. Скорее всего бамп сформирован дополнительным источником ядер группы He-CNO, т.к. природа бампа не связана с самыми легкими и самыми тяжелыми ядрами в массовом составе ПКИ, – при данных энергиях E_0 доля самых легких ядер в массовом составе ПКИ мала, в то время как показатель спектра у самых тяжелых ядер в диапазоне $E_0 = 28-100$ ПэВ не меняется.



Рис.3.5 – Интегральные спектры по E_0 , полученные в экспериментах KASCADE-Grande («Все ядра») [31] и GAMMA («GAMMA-07») [178]. Максимумы бампов в спектрах экспериментов KASCADE-Grande и GAMMA соответствуют $E_0 = 50-75$ ПэВ, что выше энергии излома самых тяжелых ядер в массовом составе ПКИ.

Метод возраста ШАЛ $S_{\min-max}$ применен к анализу данных с большой статистикой характеристик ШАЛ, полученных в эксперименте KASCADE-Grande. Получены изломы в спектрах по E_0 самой легкой и самой тяжелой групп ядер ПКИ, регистрируемых в эксперименте KASCADE-Grande, и проанализированы нерегулярности в спектрах данных групп ядер. Из полученных спектров следует:

- (i) Излом в спектре по E_0 группы самых легких ядер массового состава ПКИ наблюдается при $E_0 = 3-4$ ПэВ, и первый излом в спектре по E_0 смешанного массового состава ПКИ связан с выбытием самых легких ядер, регистрируемых в эксперименте;
- (ii) В диапазоне по E₀ = 28-100 ПэВ наблюдается бамп в спектре по E₀ смешанного массового состава ПКИ с максимумом при E₀ = 50-75 ПэВ, образованный дополнительным источником ядер ПКИ группы He-CNO;
- (iii) В диапазоне по $E_0 = 1-100$ ПэВ массовый состав ПКИ утяжеляется [5].

3.5 Особенности метода гало

Применение метода гало к данным эксперимента ПАМИР показало, что минимальная доля легких ядер в массовом составе ПКИ, обеспечивающая наблюдаемую статистику гало, составляет (39 ± 6)% при $E_0 = 10$ ПэВ. На Рис.1.3 доля легких ядер, полученная в эксперименте ПАМИР, приведена в сравнении с данными KASCADE-Grande, ARGO-YBJ, Tunka и IceCube.

Особенности применения метода гало для оценки доли легких ядер по данным эксперимента ПАМИР:

- Полученная оценка доли легких ядер в массовом составе ПКИ минимально возможная. Учет дополнительных условий, например, изменения соотношения доли легких и тяжелых ядер с E₀, увеличивает долю легких ядер;
- В методе гало использованы события, регистрируемые в стволе ШАЛ, и несущие информацию о первичном акте взаимодействия ядер ПКИ с атомами атмосферы;
- Вероятности образования гало протонами, ядрами Не и ядрами >Не в массовом составе ПКИ различаются в несколько раз, что делает метод гало модельно-малозависимым. РЭК эксперимента ПАМИР рассматривается как сепаратор протонов и, в меньшей степени, ядер Не;
- Порог образования гало существенно выше E₀ = 0.1 ПэВ, что относит метод гало к энергиям E₀ ядер ПКИ, где большинство методов оценки массового состава ПКИ непрямые и модельно зависимые.

3.6 Обсуждение результатов диссертации

Анализ данных, полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК, показал необходимость объяснения природы гало больших площадей с целью применения характеристик гало для оценки доли легких ядер в массовом составе ПКИ. Энергии ядер ПКИ, события от которых регистрируются методом РЭК, относятся к диапазону по $E_0 = 100$ ТэВ – 100 ПэВ, где объективные данные о массовом составе ПКИ практически отсутствуют.

Впервые получены спектры площадей гало во всем диапазоне площадей, от минимальных $S_{rano} = 4 \text{ мм}^2$ до площадей гало, существенно выше 1000 мм², полученных как в эксперименте, так и в расчете. Показано, что максимальные площади гало, регистрируемые методом РЭК, не могут превышать $S_{rano max} = 4000 \text{ мм}^2$ по причине ограниченности глубины воздушной мишени над экспериментальной установкой. Сравнительный анализ полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК спектров площадей гало и спектра искусственных гало показали хорошее согласие на уровне $R_a^2 > 95\%$ (см. Рис.2.9).

Впервые показан существенный (2-3-х кратный) вклад подпороговых, относительно метода РЭК, е[±] и γ-квантов ЭФ компоненты ШАЛ с энергиями диапазоне E_{γ} = 100 ГэВ – 1 ТэВ в формирование площадей гало (см. Рис.2.5 и Рис.2.8).

Впервые показано, что для реконструкции гало больших площадей необходим учет не одиночных γ-квантов, но пучков γ-квантов в стволе ШАЛ. Учет в расчетах пучков высокоэнергичных γ-квантов, локализованных в стволе ШАЛ, стал возможным с применением специально разработанного ПК ШАЛ+РЭК, где использованы ФПР е[±] и γ-квантов в Г-блоке РЭК ПАМИР (см. разд. 2.1).

Впервые получены искусственные многоцентровые гало (см. Табл.А.1), аналогичные экспериментальным многоцентровым гало (см. Табл.1.7 и Табл.1.9). По доле многоцентровых гало, полученных в расчете и в эксперименте, оценена доля легких ядер в массовом составе ПКИ (см. разд. 3.3), подтвердившая оценку доли легких ядер, полученную по всей статистике гало.

3.6.1 Типы ядер ПКИ, образовавшие события, регистрируемые в РЭК

Исследованиями показано, что события, регистрируемые методом РЭК, образованы протонами и, в меньшей степени, ядрами Не массового состава ПКИ. Данный вывод основан на следующем:

(i) Энергии ядер ПКИ, события от которых регистрируются в эксперименте ПАМИР, находятся в диапазоне $E_0 = 100$ ТэВ – 100 ПэВ. Из ф.(1.2) следует, что для протонов при $E_0 = 100$ ТэВ $X_{\text{max p}} = (560-580)$ г/см², при $E_0 = 100$ ПэВ $X_{\text{max p}} = (670-700)$ г/см². Для ядер Fe при $E_0 = 100$ ТэВ $X_{\text{max Fe}} =$

(455-465) г/см², при $E_0 = 100 \text{ ПэВ } X_{\text{max Fe}} = (580-590) г/см^2$. Учитывая степенной по E_0 спектр ядер ПКИ, на уровне $H_{\Pi AM UP} = 594 \text{ г/см}^2$ регистрируются ШАЛ, образованные в основном легкими ядрами ПКИ;

- (ii) Средний радиус семейств γ-квантов, использованный также для верификации модели MC0-FANSY описания данных эксперимента ПАМИР. Экспериментально полученный средний радиус семейств γ-квантов соответствует расчетному среднему радиусу семейств γ-квантов для легких ядер, при том, что расчетные средние радиусы семейств γ-квантов, образованных тяжелыми ядрами, существенно выше (см. разд. 1.2.2);
- (iii) Моделирование гало показало, что для оценки наивероятной энергии гало применимо соотношение (см. разд. 3.4), полученное для глубины экспериментальной установки в атмосфере, соответствующее глубине *Н*_{ПАМИР} для событий, образованных легкими ядрами (см. разд. 2.1.2);
- (iv) Моделирование гало показало хорошее согласие расчетного и экспериментально полученного потоков гало, образованных ядрами ПКИ с различными энергиями E_0 (см. Рис.2.15). Значения $\Sigma E_{0\gamma}$ гало, приведенные в Табл.1.7 и полученные в эксперименте ПАМИР, соответствуют энергиям легких ядер массового состава ПКИ, образовавших гало (см. разд. 2.1);
- (v) Доля структурных гало, полученных в эксперименте ПАМИР, соответствует доле структурных искусственных гало, образованных легкими ядрами ПКИ. Показано, что доля структурных искусственных гало, образованных ядрами Fe, существенно выше доли структурных гало, образованных легкими ядрами, и существенно выше полученной в эксперименте ПАМИР (см. Табл.3.3).

3.6.2 Модель ШАЛ+РЭК и метод гало

Модель ШАЛ+РЭК реконструкции гало использует результаты моделирования ШАЛ по MC0-FANSY (P.A.Мухамедшин [24,25,64]), верифицированной по экспериментально полученному среднему радиусу семейств үквантов, зависящему от жесткости модели, а также результаты моделирования ФПР е[±] и γ-квантов в РЭК ПАМИР (В.В.Учайкин [26]) (см. разд. 1.2.2, 2.1).

Верификация модели ШАЛ+РЭК получена (см. разд. 2.1.2):

- (i) Соответствием полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК и расчетного спектров площадей гало (см. Рис.2.9);
- (ii) Соответствием зависимости площадей гало S_{гало} от ΣE_{0γ} для искусственных гало и гало, полученных в экспериментах ПАМИР и ЯБК (см. Рис.2.10);
- (iii) Расчетный коэффициент перехода от N_e ЭФК в РЭК ПАМИР к энергии гало соответствует событиям, образованных легкими ядрами ПКИ (см. разд. 2.1);
- (iv) Расчетный поток гало соответствует в пределах ошибок экспериментально полученной статистике $N_0 = 61$ гало (см. ф.(2.6), Рис.2.15);
- (v) Доля экспериментально полученных многоцентровых гало в статистике гало соответствует расчетной доле многоцентровых гало, образованных легкими ядрами ПКИ (см. Табл.3.3).

Метод гало впервые позволил оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ при $E_0 = 10$ ПэВ с применением модельно-малозависимого подхода. Метод гало основан на положении, что характеристики событий, регистрируемых методом РЭК в стволе ШАЛ, существенно различаются для различных типов ядер ПКИ. Например вероятности образования гало протонами, ядрами Не и ядрами >Не в массовом составе ПКИ различаются в несколько раз. Данный фактор определяет статистику визуально наблюдаемых гало. При большей либо меньшей статистике экспериментальных гало доля легких ядер в массовом составе ПКИ должна быть существенно выше либо ниже соответственно. Показано, что при вероятностях образования гало, различающихся в четыре и более раз для ядер ПКИ различных типов, модели ШАЛ, описывающие данные эксперимента ПАМИР, но различающиеся например по жесткости и энергиям отслеживаемых в ШАЛ частиц, дают одинаковые в пределах ошибок результаты по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ. Выводы по Главе 3

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)%.

- Показано, что вероятности образования гало протонами, ядрами Не и ядрами >Не 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 Не, позволило оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ;
- Анализ событий с гало, полученных в эксперименте ПАМИР, показал, что доля легких ядер при E₀ = 10 ПэВ составляет (39 ± 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 КАSCADE-Grande методом S_{min-max} показал, что в диапазоне E₀ = 1-100 ПэВ массовый состав ПКИ утяжеляется, однако доля легких ядер остается существенной при E₀ = 10 ПэВ, что не противоречит оценке доли легких ядер, выполненной методом гало по экспериментальным данным ПАМИР.

Заключение

В диссертации проанализирована доля легких ядер в массовом составе ПКИ при *E*₀ = 10 ПэВ методом гало:

- Проанализированы результаты экспериментов по оценке доли легких ядер в массовом составе ПКИ при E₀ = 1-100 ПэВ. Показано, что в области излома энергетического спектра ПКИ при E₀ = 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 МСО-FANSY, описывающей такие экспериментальные параметры, как средний радиус и пробеги семейств ү-квантов в атмосфере, и ФПР е[±] и үквантов, 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 >Не (метод гало). Экспериментальная статистика гало соответствует доле легких ядер в массовом составе ПКИ (39 ± 6)% при E₀ = 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 мм², и на основании статистики экспериментальных гало оценить долю легких ядер в массовом составе ПКИ вблизи излома при $E_0 = 3-5$ ПэВ спектра ПКИ.

КЛ	– космические лучи
ПКИ	– первичное космическое излучение
ШАЛ	– широкий атмосферный ливень
РЭК	– рентгено-эмульсионная камера
ЭФК	– электронно-фотонная компонента ШАЛ
ΦΠΡ	– функция пространственного распределения
БД	– база данных
E_0	– энергия ядра ПКИ
$E_{0\gamma}$	– энергия e^{\pm} и γ -квантов в ЭФК ШАЛ
РГП	– рентгенографическая пленка
ЄΦR	– ядерная фотографическая эмульсия
ЯЭК	– ядерно-электромагнитный каскад
ЭМ	– электромагнитный каскад
РПС	– резистивный плоский счетчик
ТШВНС	– Тянь-Шанская высокогорная научная станция
ЯБК	– Японо-Бразильская коллаборация
X_{\max}	– максимум продольного развития ШАЛ от границы атмосферы
$R_{\rm a}^{2}$	– несмещенный коэффициент множественной детерминации
S	– поперечный возраст ШАЛ (каскадная характеристика ШАЛ).
	определяемый как параметр НКГ-функции
η	– псевдобыстрота
<i>x</i> _F	– скейлинговая переменная Фейнмана
Η	– глубина установки в атмосфере от границы атмосферы
Λ	– пробег ШАЛ для поглощения в атмосфере
НКГ	– функция Нишимуры-Каматы-Грейзена
θ, φ	– зенитный и азимутальный углы прихода ШАЛ
D	– потемнение на РГП
ЛПМ	– эффект Ландау-Померанчука-Мигдалла
ПК	– программный комплекс

Сокращения и обозначения

Публикации автора с результатами диссертации

- 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. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35480614 (accessed: 28.01.2021).
- 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. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=34857714; https://elibrary.ru/item.asp?id=35491989 (accessed: 28.01.2021).
- 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. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32322308; https://elibrary.ru/item.asp?id=35539431 (accessed: 28.01.2021).
- 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 2.

- 6. Puchkov V.S., Borisov A., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Kogan M.G., Maximenko V.M., Morozov A.E., Mukhamedshin R.A., Pyatovsky S.E., Smirnova M.D. Fraction of protons in primary cosmic rays according to data from the PAMIR experiment in consideration of the response of X-ray emulsion chambers//Bulletin of the Russian academy of sciences: _ pp. 392-394. Physics. 2011. Vol.75. – No3. DOI: _ _ https://dx.doi.org/10.3103/S106287381103035X. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=16982611 (accessed: 28.01.2021).
- 7. В.С. Пучков, С.Е. Пятовский. Доля легких ядер *p*+Не в составе первичного космического излучения при *E*₀ = 1-100 ПэВ и природа гало в стволах широких атмосферных ливней//ФИАН. Основные результаты научной деятельности. 2018. URL: https://www.lebedev.ru/data/docs/2018.pdf (дата доступа: 28.01.2021).
- Борисов А.С., Варгасов А.В., Гусева З.М., Денисова В.Г., Каневская Е.А., Максименко В.М., Пучков В.С., Пятовский С.Е., Славатинский С.А. Эффективность образования гамма-семейств с гало и доля протонов при энергии 10¹⁶ эВ//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2007. Т.71. №4. с. 533-535. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=9517452 (дата доступа: 28.01.2021).
- Puchkov V.S., Borisov A.S., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kempa J., Kanevskaya E.A., Maximenko V.M., Mukhamedshin R.A., Pyatovsky S.E., Slavatinsky S.A., Amineva T.P. Intense bundles of particles in cores of nuclear-electromagnetic cascades in the atmosphere with energies around 100 PeV (gamma-families with halo)//Nuclear physics B Proceedings supplements. 2003. V.122. pp. 263-266. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/S0920-5632(03)80394-8. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13423624 (accessed: 28.01.2021).
- Borisov A., Maximenko V.M., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E., Slavatinsky S.A., Vargasov A.V., Mukhamedshin R.A. Some interesting phenomena observed in cosmic-ray experiments by means of an X-ray emulsion technique at super accelerator energies//Physics of particles and nuclei. – 2005. – V.36. – N.5. – pp. 643-652. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13491113 (accessed: 28.01.2021).
- Puchkov V.S., Borisov A.S., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Maximenko V.M., Pyatovsky S.E., Slavatinsky S.A. Mass composition of primary cosmic rays at energies of 1-1000 PeV according to data of experiment «PAMIR»//XIII International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 2004, Pylos. Nuclear physics B – Proceedings supplements. – 2006. – V.151. – N1. – pp. 236-239. – DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2005.07.066. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13526399 (accessed: 28.01.2021).
- Borisov A.S., Vargasov A.V., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Maksimenko V.M., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E., Slavatinskii S.A. Efficiency of the production of γ-families with halos and the fraction of protons at an energy of 10¹⁶ eV//Bulletin of the Russian academy of sciences: Physics. 2007. V.71. N4. pp. 516-518. DOI: https://dx.doi.org/10.3103/S1062873807040235. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13538164 (accessed: 28.01.2021).
- Borisov A.S., Denisova V.G., Guseva Z.M., Kempa J., Kanevskaya E.A., Maximenko V.M., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E., Slavatinsky S.A. Recent results and modern status of the PAMIR experiment//Nuclear physics B -Proceedings supplements. – 2008. – V.175-176. – N Suppl.: Complete. – pp. 143-148. – DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2007.10.023. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13592218 (accessed: 28.01.2021).

- 14. Puchkov V.S., Borisov A.S., Denisova V.G., Guseva Z.M., Kanevskaya E.A., Kogan M.G., Maximenko V.M., Morozov A.E., Mukhamedshin R.A., Pyatovsky S.E. Emulsion chamber response and PCR mass composition according to the PAMIR data//Nuclear physics B Proceedings supplements. 2009. V.196. N C. pp. 110-113. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2009.09.019. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15296107 (accessed: 28.01.2021).
- 15. Пучков В.С., Борисов А.С., Гусева З.М., Денисова В.Г., Каневская Е.А., Коган М.Г., Максименко В.М., Морозов А.Е., Мухамедшин Р.А., Пятовский С.Е., Смирнова М.Д. Доля протонов в первичном космическом излучении по данным эксперимента ПАМИР с учетом отклика рентгеноэмульсионных камер//Известия Российской академии наук. Серия Физическая. – 2011. – Т.75. - №3. – с. 421-423. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=16311634 (дата доступа: 28.01.2021).
- Borisov A.S., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Kogan M.G., Maximenko V.M., Morozov A.E., Mukhamedshin R.A., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E., Smirnova M.D. Revised data on γ-families observed in X-ray emulsion chambers of the experiment PAMIR//EPJ web of conferences. Ser. «ISVHECRI 2012 17th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions». Berlin, Aug. 10-15, 2012. 2013. pp. 04007. DOI: https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20125204007. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=20437750 (accessed: 28.01.2021).
- 17. Puchkov V.S., Borisov A., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Kogan M.G., Maximenko V.M., Morozov A.E., Mukhamedshin R.A., Pyatovsky S.E., Smirnova M.D. The protons in primary cosmic rays in the energy 10^{15} - 10^{17} eV range according to data from the PAMIR experiment//Proceedings of the 32nd International cosmic ray conference, ICRC 2011. Beijing, Aug. 11-18, 2011. - 2011. - p. 182-184. _ DOI: https://dx.doi.org/10.7529/ICRC2011/V01/0143. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21882513 (accessed: 28.01.2021).

- Borisov A.S., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaja E.A., Karpova S.A., Maximenko V.M., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E., Slavatinsky S.A. High energy gamma-families with halo and mass composition of primary cosmic rays in energy region above 10 PeV//Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2001. – V.65. – N11. – pp. 1618-1620. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=14997076 (accessed: 28.01.2021).
- Борисов А.С., Гусева З.М., Денисова В.Г., Каневская Е.А., Максименко В.М., Пучков В.С., Пятовский С.Е., Славатинский С.А. Экспериментальные и расчетные гамма-семейства с гало (эксперимент «Памир»)//Известия Российской академии наук. Серия Физическая. – 2002. – Т.66. – №11. – с. 1547-1548.
- Slavatinsky S.A., Borisov A., Guseva Z.M., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Kempa J., Maximenko V.M., Mukhamedshin R.A., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E. Proton fraction in PCR mass composition at energies of 10¹⁵-10¹⁷ eV (experiment «Pamir»)//Proc. 28th International Cosmic Ray Conference, Tsukuba. 2003. pp .111-114.
- 21. Puchkov V.S., Guseva Z.M., Borisov A., Denisova V.G., Kanevskaya E.A., Maximenko V.M., Mukhamedshin R.A., Pyatovsky S.E., Slavatinsky S.A. Mass composition of primary cosmic rays with energy above 10 PeV derived from observation of halo events in X-ray emulsion chambers//Proc. 28th International Cosmic Ray Conference 2001: 37. – Copernicus Gesellschaft 2001.
- Puchkov V.S., Borisov A.S., Denisova V.G., Guseva Z.M., Kanevskaya E.A., Maximenko V.M., Morozov A.E., Pyatovsky S.E. Mass composition of primary cosmic rays at energies of 10¹⁵-10¹⁷eV according to data of the PAMIR experiment//Proc. of International Cosmic Ray Workshop «Aragats 2007», 8 -13 September. – 2007. – Nor-Amberd, Armenia. Yerevan Physics Institute.

23. Borisov A., Denisova V.G., Guseva Z.M., Kanevskaya E.A., Kogan M.G., Morozov A.E., Mukhamedshin R.A., Puchkov V.S., Pyatovsky S.E., Shaulov S.B., Shoziyoev G., Smirnova M.D. Gamma-ray families with halos: main characteristics and possibilities of using them to estimate the *p*+He fraction in the mass composition of cosmic rays at energies 1-100 PeV//EPJ Web of conferences. – Ser. 19th International Symposium on very high energy cosmic ray interactions, ISVHECRI 2016, Moscow. – 2017. – pp. 19008. – DOI: https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201614519008. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=31054258 (accessed: 28.01.2021).

Литература

- 24. Мухамедшин Р.А. Феноменологические ограничения на модель неупругих взаимодействий адронов с ядрами при энергиях выше 10¹⁵ эВ по данным рентген-эмульсионных камер: дис....д.физ.-мат.наук: 01.04.23. – М. – 2006. – 233 с.
- 25. Mukhamedshin R.A. FANSY 2.0: A Monte Carlo tool for study of superhighenergy cosmic-ray interactions. Proton-proton interactions//The Europen Physical Journal Plus. – 2019. – 134:584. – DOI: https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12933-2
- Учайкин В.В. Концепция стохастической ценности в прикладных задачах теории переноса: дис...д.физ.-мат.наук: 01.04.12, 01.04.16. Барнаул. 1988. 313 с.
- Saggese L., Di Girolamo T. Feasibility of measurements of cosmic ray composition by means of RPC digital read out in ARGO-YBJ//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
- 28. Zhang S.S., Cao Z. Observation of a knee in the p+He energy spectrum below 1PeV by using an hybrid measurement with ARGO-YBJ and a LHAASO Cherenkov Telescope//34th International Cosmic Ray Conference. – 30 July -6 August. – 2015. – Hague, Netherlands. PoS (ICRC 2015) 261.

- Взаимодействие адронов космических лучей сверхвысоких энергий (эксперимент «Памир»)//Под ред. Н.Г.Басова, С.И.Никольского. – М.: Наука, 1984 (Труды ФИАН; т. 154).
- 30. Shibuya E.H. Emulsion chamber results//Rapporteur talks of 20th International Cosmic Ray Conference. HE (High Energy Phenomena) Session. – 1987. – Tokyo.
- 31. Antoni T., Apel W.D., et al. The cosmic-ray experiment KASCADE//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2003. – 513. – pp. 490-510. – DOI: 10.1016/S0168-9002(03)02076-X//KASCADE-Grande Collaboration. – URL: https://kcdc.ikp.kit.edu/datashop/fulldata, https://web.ikp.kit.edu/KASCADE (accessed: 28.01.2021).
- 32. Apel W.D., Arteaga J.C., et al. Energy spectra of elemental groups of cosmic rays: Update on the KASCADE unfolding analysis//Astropart. Phys. 31 (2009), 2, pp. 86-91. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.11.008
- Aglietta M., Alessandro B., et al. The cosmic ray proton, helium and CNO fluxes in the 100 TeV energy region from TeV muons and EAS atmospheric Cherenkov light observations of MACRO and EAS-TOP//EAS-TOP Collaboration, Astropart. Phys. 2004. 21 (3). pp. 223-240. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2004.01.005
- 34. Ambrosio M., et al. High energy cosmic ray physics with underground muons in MACRO. II. Primary spectra and composition//MACRO Collaboration, Phys. Rev. D 56 (1997), 1418. – DOI: https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.56.1418
- Amenomori M., Ayabe S., et al. Are protons still dominant at the knee of the cosmic-ray energy spectrum?//Tibet ASγ Collaboration, Phys. Lett. B 632 (1) (2006), pp. 58-64. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2005.10.048
- 36. Tokuno H., Kakimoto F., et al. The cosmic ray primary composition at the knee region from lateral distributions of atmospheric Cherenkov photons in extensive air showers Astropart. Phys. 29 (6) (2008), pp. 453-460. – DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.05.001

- 37. Glasmacher M.A.K., Catanese M.A., et al. The cosmic ray composition between 10¹⁴ and 10¹⁶ eV//Astropart. Phys. 12 (1–2) (1999), pp. 1-17. – DOI: https://dx.doi.org/10.1016/S0927-6505(99)00076-6
- 38. Apel W., Arteaga J.C., et al. The KASCADE-Grande experiment//KASCADE-Grande Collaborations, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 620 (2–3) (2010), pp. 202-216. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.147
- 39. De Mitri I. on behalf of the ARGO-YBJ Collaboration. Measurement of the cosmic ray all-particle and light-component energy spectra with the ARGO-YBJ experiment//ISVHECRI 2014. -18th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, EPJ Web of Conferences. 2015. 99. p. 08003. DOI: https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159908003
- Hayashi Y., Gupta S.K., et al. The average mass number of primary cosmic rays around the knee region derived from Grapes III array at Ooty//Proceedings of 27th ICRC. – 2001. – 128. – pp. 128-131.
- 41. Amenomori M., Ayabe S., et al. Primary proton flux around the «knee» region deduced from the observation of air showers accompanied by gamma families The Tibet ASγ Collaboration//Proceedings of 27th ICRC. 2001: 18. pp. 18-21.
- 42. Amenomori M., Ayabe S., et al. Heavy component of primary particles around the knee observed with the Tibet burst detector and air shower array The Tibet ASγ Collaboration//Proceedings of 27th ICRC. 2001: 148. pp. 148-151.
- Amenomori M., Ayabe S., et al. The energy spectrum of the light components (P+He) at the knee obtained by the Tibet air shower core detector//29th International Cosmic Ray Conference. – Pune. – 2005. – pp. 101-105.
- 44. Amenomori M., Bi X.J., et al. Measurement of the lateral distributions of electromagnetic component to study the chemical composition of the cosmic rays in the knee energy region//30th International Cosmic Ray Conference. – Mexico. – 2007.

- 45. Amenomori M., Bi X.J., et al. Chemical composition of cosmic rays at the knee measured by the Tibet air-shower-core detector//30th International Cosmic Ray Conference. – Mexico. – 2007.
- 46. Amenomori M., Bi X.J., et al. Analysis of primary cosmic ray proton and helium components at the knee energy region with the Tibet hybrid experiment//30th International Cosmic Ray Conference. – Mexico. – 2007.
- 47. Schoo S., Kang D., et al. KASCADE-Grande Collaboration. A new analysis of the combined data from both KASCADE and KASCADE-Grande//Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. 2017. PoS(ICRC2017). 339.
- Kampert K.-H., Unger M. Measurements of the cosmic ray composition with air shower experiments//Astropart. Phys. – 2012. – 35. – pp.660-678. – DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.02.004
- 49. Apel W.D., Arteaga-Velazquez J.C., et al. KASCADE-Grande measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays//Astropart. Phys. 2013. 47. pp.54-66. DOI: https://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.06.004
- 50. Budnev N., Astapov I., et al. The TAIGA experiment a hybrid detector for very high energy gamma-ray astronomy and cosmic ray physics in the Tunka valley//Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. 2017. PoS(ICRC2017). 768.
- 51. Fedorov O., Bezyazeekov P.A., et al. Tunka-Rex Collaboration. Detector efficiency and exposure of Tunka-Rex for cosmic-ray air showers//Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. – 2017. – PoS(ICRC2017). – 387.
- 52. Sveshnikova L., Astapov I., et al. Search for gamma-ray emission above 50 TeV from Crab Nebula with the TAIGA detector//Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. – 2017. – PoS(ICRC2017). – 677.
- 53. Porelli A., Wischnewski R., et al. TAIGA-HiSCORE detection of the CATS-LIDAR on the ISS as fast moving point source//Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. – 2017. – PoS(ICRC2017). – 754.

- 54. Postnikov E., Astapov I., et al. Commissioning the joint operation of the wide angle timing HiSCORE Cherenkov array with the first IACT of the TAIGA experiment//Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. – 2017. – PoS(ICRC2017). – 756.
- Kopper C. IceCube Collaboration. Observation of Astrophysical Neutrinos in Six Years of IceCube Data//Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. – 2017. – PoS(ICRC2017). – 981.
- 56. The IceCube Collaboration. Recent Results of Cosmic Ray Measurements from IceCube and IceTop//36th International Cosmic Ray Conference. 2019.
 ICRC2019. July 24th August 1st. Madison, WI, U.S.A. arXiv:1909.04423v1 [astro-ph.HE] 10 Sep 2019 (accessed: 28.01.2021).
- 57. Kuzmichev L., Astapov I., et al. Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy (TAIGA): Status, results and perspectives//Proceedings of the 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions ISVHECRI 2016. – EPJ Web Conf. – 2017. – 145, 01001. – DOI: https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201614501001
- Ptuskin V. Origin of Cosmic Rays: Modern status//Proceedings of the 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions ISVHECRI 2016. – EPJ Web Conf. – 2017. – 145, 03001. – DOI: https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201614503001
- 59. Kostunin D., Bezyazeekov P.A., et al. Tunka-Rex Collaboration. Latest results of the Tunka Radio Extension//Proceedings of the 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions ISVHECRI 2016.
 EPJ Web Conf. 2017. 145, 11001. DOI: https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201614511001
- 60. Heck D., Antoni T., et al. Hadronic interaction models and the air shower simulation program CORSIKA//Proceedings of ICRC. 2001. pp. 233-236.
- 61. KASCADE-GrandeCollaboration.–URL:https://kcdc.ikp.kit.edu/simul/simgeneral/#corsika (accessed: 28.01.2021).
- 62. KASCADE-Grande Collaboration. URL: https://www.ikp.kit.edu/corsika (accessed: 28.01.2021).

- FLUKA//Italian National Institute for Nuclear Physics (INFN) and European Organization for Nuclear Research (CERN). – URL: http://www.fluka.org (accessed: 28.01.2021).
- 64. Mukhamedshin R.A. Eur. Phys. J. C (2009) 60: 345-358. DOI: https://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-009-0945-y
- Mukhamedshin R., Sadykov T. Do LHC data contradict superhigh-energy cosmic-ray coplanarity of most energetic particles?//26th Extended European Cosmic Ray Symposium. 2019. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 1181. 012089. DOI: https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012089
- Fedorova G.F., Mukhamedshin R.A. Bull. Soc. Sci. Lett. Lodz, Ser. Rech. Def., XVI. – 1994. – 137.
- 67. Pierog T. Open issues in hadronic interactions for air showers//ISVHECRI 2016. EPJ Web of Conferences. 145. 18002. 2017. DOI: https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201714518002
- Todero Peixoto C.J. For the Pierre Auger Collaborations. Estimating the Depth of Shower Maximum using the Surface Detectors of the Pierre Auger Observatory//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- Castellina A. On behalf of the Pierre Auger Collaboration. Highlights of the Pierre Auger Observatory//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- Hanlon W. Telescope Array 10 Year Composition//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 71. Yushkov A. For the Pierre Auger Observatory. Mass Composition of Cosmic Rays with Energies above 10^{17.2} eV from the Hybrid Data of the Pierre Auger Observatory//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).

- Kostunin D., Lenok V. For the Tunka-Rex Collaboration Seven years of Tunka-Rex operation//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- Никольский С.И. Широкие атмосферные ливни космического излучения и взаимодействие частиц сверхвысоких энергий: дис....д.физ.-мат.наук: М. – 1967. – 188 с.
- Зацепин Г.Т. Широкие атмосферные ливни и ядерно-каскадный процесс: дис...д.физ.-мат.наук: М. – 1954. – 200 с.
- 75. Sako T. for the LHCf collaboration. Results of the LHCf experiment and the forward measurements at LHC//ISCHECRI 2016. LPI, Moscow.
- Itow Y. for the LHCf collaboration. The Results from the LHCf experiment and future prospects//ISCHECRI 2012. – Aug. 10-15. – Berlin.//Eur. Phys. J. – 2013. – 52. – 01007.
- Котенко Л.П., Трубкин Ю.А. Резистивный плоскопараллельный счетчик как детектор одиночных заряженных частиц//Краткие сообщения по физике ФИАН. – 1996. - №3-4. – с. 78-84.
- Aglietta M., Alessandro B., et. al. EAS-TOP Collaboration. Study of the primary cosmic ray composition around the knee of the energy spectrum//Physics Letters B. – 1994. – 337. – pp. 376-382.
- Bindi M. on behalf of ATLAS and CMS Collaborations. Inelastic cross section measurements at LHC//14th Workshop on Elastic and Diffractive Scattering. 2011. Dec. 15-21. Qui Nhon, Vietnam.
- Valentinetti S. on behalf of ATLAS and CMS. Total Inelastic Cross Section at LHC//LC13 Workshop. – European Centre for Theoretical studies in Nuclear Physics and Related Areas. – 2013. – Sep. 16-20. – Trento, Italy.
- Baur S., Ulrich R. For the CMS collaboration. Measurements of the veryforward energy in pp collisions at the LHC and constraints for cosmic ray air showers//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).

- 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 (accessed: 28.01.2021).
- Асейкин В.С., Вильданов Н.Г., и др. Исследование электронной и мюонной компонент ШАЛ с энергией больше 10¹³ эВ//Физический институт им. П.Н.Лебедева. 1981. Препринт №178. URL: http://preprints.lebedev.ru (дата доступа: 28.01.2021).
- 84. Арабкин В.В. Энергетические характеристики гамма-семейств в широких атмосферных ливнях на высоте 3340 м: дис....канд.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 1991. – 126 с.
- 85. Нестерова Н.М., Павлюченко В.П., и др. 50 лет Тянь-Шаньской комплексной установке ФИАН по исследованию широких атмосферных ливней космических лучей. История. Результаты. Проекты//Физический институт им. П.Н.Лебедева. – 2014. – Препринт №10. – URL: http://preprints.lebedev.ru (дата доступа: 28.01.2021).
- 86. Maximenko V.M., Denisova V.G., et al. Single hadrons and gamma-families at the level of the Pamirs lateral structure, spectra, flux attenuation//Proc. 28th International Cosmic Ray Conference 2001: 37. – Copernicus Gesellschaft 2001.
- Барадзей Л.Т., Каневская Е.А., и др. Уточненный метод фотометрического определения энергии электронно-фотонных каскадов в эмульсионных камерах с рентгеновскими пленками//Физический институт им. П.Н.Лебедева. – 1971. – Препринт №65. – URL: http://preprints.lebedev.ru (дата доступа: 28.01.2021).
- Baradzei L.T., Borisov A.S., et al. Chacaltaya and Pamir Collaboration. Observation of very high energy cosmic-ray families in emulsion chambers at high mountain altitudes//Nuclear Physics B. 1992. 370. pp. 365-431.
- Semba H., Ohsawa A., et al. Contribution from Chacaltaya emulsion chamber experiment of Brasil-Japan Collaboration//Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokio. – 1983. – Aug. 5. – Tanashi, Tokyo 188, Japan.

- 90. Полухина Н.Г. Исследования актуальных проблем ядерной физики на основе методики полностью автоматизированной обработки трековых детекторов на многофункциональной установке ПАВИКОМ: дис....д.физ.-мат.наук: М. – 2006. – 101 с.
- 91. Ракобольская И.В., Роганова Т.М. Результаты экспериментов в космических лучах с использованием эмульсионных детекторов//Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2010. 4. с. 47-55. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15209759 (дата доступа: 28.01.2021).
- 92. Osedlo V.I., Managadze A.K., et al. The halo and the high energy jet in stratospheric STRANA superfamily with $E_0 > 10^{16} \text{ eV}//30^{\text{th}}$ International Cosmic Ray Conference. – Merida, Mexico. – 2007.
- 93. Osedlo V.I., Managadze A.K., et al. Anisotropic and alignment effects in STRANA superfamily with $E_0 > 10^{16} \text{ eV}//30^{\text{th}}$ International Cosmic Ray Conference. Merida, Mexico. 2007.
- 94. Оседло В.И. Пространственно-энергетические характеристики ядерного взаимодействия при энергиях ~10¹³ эВ и ~10¹⁶ эВ, полученные в страто-сферных экспериментах: дис....канд.физ.-мат.наук: 01.04.23. М. 2007. 123 с.
- 95. Смородин Ю.А. Рентгеноэмульсионные камеры в исследованиях взаимодействий при сверхвысоких энергиях: дис...д.физ.-мат.наук: М. – 1986. – 221 с.
- 96. Каневская Е.А. Метод рентгеноэмульсионных камер и его применение к исследованию образования нейтральных и заряженных пионов с энергией 2-20 ТэВ в атмосфере: дис....канд.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 1976. – 230 с.
- 97. Пучков В.С. Прецизионное измерение ионизации в области релятивистского роста и определение отношения интенсивностей пионов и протонов в космических лучах на высоте гор: дис....канд.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 1973. – 157 с.

- 98. Пашков С.В. Расчеты каскадов в атмосфере: нарушение скейлинга и струи с большими р_т при энергиях 10¹⁴-10¹⁶ эВ: дис....канд.физ.-мат.наук: 01.04.16. М. 1984. 205 с.
- 99. Rayons cosmiques de tres haute energie//Courrier CERN. 1981. V.21. –
 N2.
- 100. Recherche... a haut niveau//Courrier CERN. 1981. V.21. N8.
- 101. Capdevielle J.N.//Journal Physics G. 1988. 14. 503.
- 102. Пучков В.С., Пятовский С.Е., и др. Длиннопробежная компонента космических лучей по данным экспериментов с рентгеноэмульсионными камерами на Памире и Тянь-Шане//ХХІІ Международная конференция Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования). Electromagnetic field and materials (fundamental physical research). – 2014. – Москва, НИУ «МЭИ», 21-22 ноября. – 582 с.
- 103. Nuclear interaction study using emulsions. JACEE experiment//Department of cosmic ray research and neutrino studies. – URL: https://auger.ifj.edu.pl/nowa_en/JACEE (accessed: 28.01.2021).
- 104. ATIC Advanced Thin Ionization Calorimetr//Cosmic Ray Physics Group. -Institute for Physical Science and Technology from the Department of Physics and Astronomy at Louisiana State University. – URL: https://cosmicray.umd.edu/atic-home (accessed: 28.01.2021).
- 105. Measurement of the energy spectrum of primary cosmic rays in the «knee» region (3x10¹⁴ eV-2x10¹⁶ eV)//Tibet AS-gamma Experiment. URL: http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em (accessed: 28.01.2021).
- 106. Alvarez-Muniz J., Engel R., et al. Hybrid simulations of extensive air showers//Physical Review D. – 2002. – 66. – 033011.
- 107. Шаулов С.Б. Исследование состава космических лучей в области энергий 0.1-10 ПэВ комбинированным методом регистрации ШАЛ и гаммасемейств: дис....д.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 1999. – 244 с.
- 108. Квочкина Т.Н. Изучение ядерных взаимодействий, вызванных первичными частицами космических лучей в стратосфере: дис....канд.физ.мат.наук: 01.04.16. – Алма-Ата. – 1982. – 147 с.

- 109. Mukhamedshin R.A. Does superhigh-energy cosmic-ray coplanarity contradict LHC data? The Europen Physical Journal C. – 2019. – 79:441. – DOI: https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6931-0
- 110. Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: Учебное пособие для вузов. М.: Университетская книга. 2007. 488с.
- 111. Krys A., Iwan A., et al. Simulated properties of HALO events observed at the pamir experiment//27th International Cosmic Ray Conference. 2001. Hamburg, Germany.– pp. 364-370.
- 112. Дунаевский А.М. Свойства неупругих взаимодействий адронов с ядрами атомов воздуха при энергиях до 100 ПэВ по данным космических лучей: дис...д.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 1993. – 133 с.
- 113. Дунаевский А.М., Свешникова Л.Г., и др. Моделирование ядерноэлектромагнитных каскадов, инициированных адронами сверхвысоких энергий в свинце и атмосфере Земли с учетом рождения чармированных частиц//Физический институт им. П.Н.Лебедева. – 1995. – Препринт №18. – URL: http://preprints.lebedev.ru (дата доступа: 28.01.2021).
- 114. Шаулов С.Б. Гипотеза странной кварковой материи в космических лучах//Физический институт им. П.Н.Лебедева. – 2012. – Препринт №19. – URL: http://preprints.lebedev.ru (дата доступа: 28.01.2021).
- 115. Fujii T. Energy spectrum of UHECRs measured by newly constructed fluorescence detectors in Telescope Array experiment//EPJ Web of Conferences.
 52. 06003. 2013. DOI: https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20135206003
- 116. Дьяконов М.Н., Егоров Т.А., и др. Космическое излучение предельно высокой энергии//Новосибирск: Наука. 1991. 252 с.
- 117. Chernov D.V., Antonov R.A., et al. Detection of reflected Cherenkov light from extensive air showers on the SPHERE experiment as a method of studying superlight energy cosmic rays//Physics of particles and Nuclei. – 2015. – 46. – 1. – pp. 60-93.
- 118. Chernov D.V., Antonov R.A., et al. Detector for the ultrahigh energy cosmic rays composition study in Antarctica//Journal of Physics. Conference Series. - 2017. - 798. - 1. - pp. 1-5.

- 119. Podgrudkov D.A., Antonov R.A., et al. Cosmic ray study by means of reflected EAS Cherenkov light method with the SPHERE-2 detector//PoS(ICRC). – 2017. – 537.
- 120. Cassidy M., Fortson L.F., et al. CASA-BLANCA: a large non-imaging cerenkov detector at CASA-MIA//arXiv:astro-ph/9707038v1 2 Jul 1997 (accessed: 28.01.2021).
- 121. Aaij R., Adeva B., et al. The LHCb collaboration. Measurement of the inelastic pp cross-section at a centre-of-mass energy of 13 TeV//Journal of High Energy Physics. 2018. 2018:100. DOI: https://doi.org/10.1007/JHEP06(2018)100
- 122. Куликов Г.В., Христиансен Г.Б. О спектре широких атмосферных ливней по числу частиц//ЖЭТФ. – 1958. – т. 35. – вып. 3(9). – с. 635-640.
- 123. 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.
- 124. Калмыков В.Н. Массовый состав первичного космического излучения в районе излома по данным установки ШАЛ МГУ: дис....канд.физ.мат.наук: 01.04.23. – М. – 2007. – 120 с.
- 125. Карпиков И.С. Моделирование и анализ данных мюонного детектора эксперимента по исследованию космических лучей ШАЛ МГУ: дис....канд.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 2017. – 103 с.
- 126. Saavedra O., Barbashina N.S., et al. Observation of high-energy cosmic rays by very inclined muon bundles in the NEVOD-DECOR experiment//EPJ Web of Conferences. ISVHECRI 2016. – 2017. – 145. – 16001. – DOI: https://doi.org/10.1051/epjconf/201714516001
- 127. Dembinski H.P., Arteaga-Velázquez J.C., et al. EAS-MSU, IceCube, KASCADE-Grande, NEVOD-DECOR, Pierre Auger, SUGAR, Telescope Array, Yakutsk EAS Array. Report on Tests and Measurements of Hadronic Interaction Properties with Air Showers//EPJ Web of Conferences. – 2019. – 210. – 02004. – DOI: https://doi.org/10.1051/epjconf/201921002004
- 128. Gupta Sunil K. EAS Studies of Cosmic Rays with Energy below 10¹⁶ eV//32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing 2011. – 2011. – V.12. – pp. 241-251. – DOI: https://doi.org/10.7529/ICRC2011/V12/R05

- 129. Unger M. Studies of Cosmic Rays above 10¹⁶ eV//32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing 2011. 2011. V.12. pp. 253-265. DOI: https://doi.org/10.7529/ICRC2011/V12/R06
- 130. Ерлыкин А.Д. Многомерный анализ адронных каскадов в атмосфере для ядерных и астрофизических исследований космических лучей: дис....д.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 1986. – 330 с.
- 131. Яковлев В.И. Исследование особенностей взаимодействия адронов в области энергии 4-400 ТэВ: дис...д.физ.-мат.наук: 01.04.16. М. 1990. 269 с.
- 132. Яковлев В.И. Многокомпонентные исследования широких атмосферных ливней на Тянь-Шане//ФИАН им. П.Н.Лебедева. – Физика высоких энергий и космических лучей. – 2012. – Препринт №16. – URL: http://preprints.lebedev.ru (дата доступа: 28.01.2021).
- 133. Генина Л.Э. Экспериментальное исследование гало γ-семейств космического излучения в области энергий ΣЕ_γ≥250ТэВ: дис....канд.физ.мат.наук: 01.04.16. – Ереван. – 1988. – 133 с.
- 134. Роганова Т.М. Многомерные характеристики электронно-фотонных и адронных каскадов в космических лучах при сверхвысоких энергиях: дис....д.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 1998. – 223 с.
- 135. Стаменов Й.Н. Исследование состава первичного космического излучения с помощью широких атмосферных ливней: дис....д.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 1981. – 323 с.
- 136. Гулов Ю.А. Исследование характеристик семейств гамма-квантов с энергией ΣE_γ>500 ТэВ в ядерно-электромагнитном каскадном процессе: дис....канд.физ.-мат.наук: 01.04.16. – Душанбе. – 1983. – 153 с.
- 137. Манагадзе А.К. Высокоэнергичные частицы гамма-адронных семейств сверхвысоких энергий, регистрируемых рентгено-эмульсионными камерами: дис....канд.физ.-мат.наук: 01.04.16. – М. – 1983. – 152 с.
- 138. 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.

- 139. Лептух Г.Г. Структурные события в углеродно-свинцовых рентгенэмульсионных камерах: дис....канд.физ.-мат.наук: 01.04.16. – Тбилиси. – 1985. – 152 с.
- 140. Besshapov S.P., Cherdintseva K.V., et al. Hybrid experiments with air-shower array and emulsion chamber at high mountains//Nuclear Physics B-Proceedings Supplements. – 2009. – V.196. – Dec. 2009. – pp. 118-121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2009.09.021
- 141. Pavlyuchenko V.P., Martirosov R.M., et al. Difference method to search for the anisotropy of primary cosmic radiation//J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. – 2018. – 45. – 015202. – 16pp. – DOI: https://doi.org/10.1088/1361-6471/aa904d
- 142. Erlykin A.D., Wolfendale A.W. Fine structure in the cosmic ray energy spectrum as an approach to the problem of cosmic ray origin. I: status of the single source model of the knee at PeV energies//Proceedings of the 2nd International Cosmic Ray Workshop «Aragats 2011». – 2011. – 12-16 Sep. – Nor-Amberd, Armenia. – pp.34-39.

Результаты групп коллабораций по оценке массового состава ПКИ

- 143. Yan Q., Choutko V. On behalf of the AMS Collaboration. Properties of Primary Cosmic Ray Proton, Helium, Carbon and Oxygen Measured with AMS//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 144. Derome L. On behalf of the AMS02 Collaboration. Cosmic-Ray Lithium Isotopes with AMS02//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 145. Delgado C. On behalf of the AMS-02 Collaboration. Cosmic-Ray Helium Isotopes with the Alpha Magnetic Spectrometer//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 146. Zhang C. On behalf of the AMS Collaboration. Antiproton Flux and Properties of Elementary Particles Fluxesin Primary Cosmic Rays Measured with Alpha Magnetic Spectrometer on the ISS//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 147. Gebauer I. On behalf of the AMS Collaboration. Anisotropy of particle fluxes in primary cosmic rays measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the ISS//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 148. Weng Z. On behalf of the AMS Collaboration. Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Positrons//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).

- 149. Asaoka Y. For the CALET collaboration. The CALorimetricElectron Telescope (CALET) on the International Space Station (ISS)//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 150. Akaike Y. For the CALET collaboration. Measurements of heavy cosmic ray nuclei fluxes with CALET//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 151. Maestro P. On behalf of the AMS Collaboration. Measurement of the energy spectra of carbon and oxygen nuclei in cosmic rays with CALET//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 152. Motz H., Asaoka Y., et al. Interpretation of the CALET Electron+Positron Spectrum concerning Dark Matter Signatures//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 153. Marrocchesi P.S. For the CALET Collaboration. Measurement of the Proton Spectrum with CALET on the ISS//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 154. Rauch B.F., Binns B. For the CALET Collaboration. CALET Ultra Heavy Cosmic Ray Observations on the ISS//The Astroparticle Physics Conference.
 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 155. Seo E.-S. For the ISS-CREAM Collaboration. Cosmic Ray Energetic And Mass CREAM for the ISS (ISS-CREAM)//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).

- 157. Yue C., Benedittis A., et al. On behalf of the DAMPE Collaboration. Measurement of cosmic-ray proton spectrum with the Dark Matter Particle Explorer//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 158. Zhang Ya-P., Cui M.-Y., et al. On behalf of the DAMPE Collaboration. Elemental analysis of Cosmic-Ray Flux with DAMPE//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 159. Santo M., Gallo V., et al. On behalfof the DAMPE Collaboration. Helium spectrum in the Cosmic Rays measured by the DAMPE detector//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 160. Varsi F. On behalf of GRAPES-3 Collaboration. Energy spectrum and composition measurements of cosmic rays from GRAPES-3 experiment//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 161. Dong Y.-W. On behalf of the HERD Collaboration. The High Energy cosmic-Radiation Detection (HERD) Facility onboard China's Space Station//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 162. Andeen K., Plum M. On behalf of the IceCube Collaboration. Latest Cosmic Ray Composition Results from IceTop and IceCube//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).

- 163. Soldin D. For the IceCube Collaboration. Recent Results of Cosmic Ray Measurements from IceCube and IceTop//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 164. Carraminana A., Rosa D. For the HAWC Collaboration. A follow-up survey of Active Galactic Nuclei with the HAWC γ-ray observatory//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 165. Arteaga-Velazquez J.C., Alvarez J.D. For the HAWC Collaboration. The spectrum of the light component of TeV cosmic rays measured with HAWC//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org. arXiv:1908.11519v1 [astro-ph.HE] 30 Aug 2019 (accessed: 28.01.2021).
- 166. Takeishi R. For the ISS-CREAM Collaboration. Cosmic-ray Elemental Spectra Measured with ISS-CREAM//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 167. Kang D., Haungs A. For the KASCADE-Grande Collaboration. Latest results from the KASCADE-Grande data analysis//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org. – arXiv:1912.09069v1 [astro-ph.HE] 19 Dec 2019 (accessed: 28.01.2021).
- 168. You Z. For LHAASO collaboration. The Cosmic Ray Spectrum of Light Componentabove 10 TeV Measured by LHAASO Experiment//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019.
 Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org
 - (accessed: 28.01.2021).
- 169. He H. For the LHAASO Collaboration. Status and First Results of the LHAASO Experiment//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).

- 170. Xin G.G. For LHAASO Collaboration. Study on the Muon Lateral Distribution on the First Stage of LHAASO-KM2A//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 171. Munini R. Isotope solar modulation with the PAMELA experiment//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 172. JiHee K. For the Telescope Array Collaboration. The Cosmic Ray Energy Spectrum above 2 PeV measured by the TALE Fluorescence Telescopes//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 173. Ogio S. For the Telescope Array Collaboration. TALE hybrid//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019.
 Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 174. AbuZayyad T., Deligny O., et al. For the Pierre Auger and Telescope Array Collaborations. The energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays measured at the Pierre Auger Observatory and at the Telescope Array//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 175. AbuZayyad T. For the Telescope Array Collaboration. TALE Cosmic Rays Composition//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cos-– 2019. – Madison, WI, USA. mic Ray Conference. – URL: https://www.icrc2019.org//The Cosmic-Ray Energy Spectrum between 2 PeV with the TALE and 2 EeV Observed detector in monocular 2018 mode//arXiv:1803.01288v1 [astro-ph.HE] 4 Mar (accessed: 28.01.2021).

- 176. Huang J. For the Tibet ASγ Collaboration. Primary cosmic-ray spectra and composition in theenergy range from 50 TeV to 10¹⁶ eV observed withthe new Tibet hybrid experiment//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. – 2019. – Madison, WI, USA. – URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 177. Cazon L. For the EAS-MSU, IceCube, KASCADE-Grande, NEVOD-DECOR, Pierre Auger, SUGAR, Telescope Array, and Yakutsk EAS Array Collaborations. Working Group Report on the Combined Analysis of Muon Density Measurements from Eight Air Shower Experiments//The Astroparticle Physics Conference. 36th International Cosmic Ray Conference. 2019. Madison, WI, USA. URL: https://www.icrc2019.org (accessed: 28.01.2021).
- 178. Garyaka A.P., Martirosov R.M., et al. All-particle primary energy spectrum in the 3-200 PeV energy range//J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35 (2008) 115201 (18pp) (Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics). – DOI: https://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/35/11/115201//arXiv:0808.1421v1 [astro-ph] 10 Aug 2008.

Приложение А. Примеры моделированных гало

Примеры моделированных гало приведены в Табл.А.1. Гало оценены по изоденсе *D* = 0.5, что аналогично фотометрированию гало в эксперименте ПАМИР (см. Табл.1.7).

Табл.А.1 – Примеры моделированных гало с *S*_{гало} > 1500 мм², образованных протонами, ядрами Не и ядрами Fe ПКИ, полученных с применением ПК ШАЛ+РЭК ПАМИР. Сортировка по *S*_{гало} в порядке убывания.

Расчетный скан гало	Цветовая изограмма			
(изоденса <i>D</i> = 0.5)	$D(\Delta D = 0.2)$	D(x)	3D-изограмма	Характеристики гало
	Γ	ало, образованные перви	чными протонами	
7 6 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 4 -5 -6 -7 -6 -4 -2 0 2 4 6				Тип ядра ПКИ: протон $E_0 = 778935 \text{ ТэВ}$ $\cos \theta = 0.92$ $t_{Pb} = 9.63 \text{ сu}$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, \text{ выше Pb}) = 469276$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}, \text{ выше Pb}) = 14837$ $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэB}) = 258749 \text{ ТэB}$ $N_{\gamma \text{ гало}} = 2651583377$ $E_{\text{гало}} = 377400 \text{ ТэB}$ $S_{\text{гало}} = 10(320 \pm 6) + (2.00 \pm 0.04) + (1.75 \pm 0.03) + (1 \pm 0.02) \text{ мм}^2$ $(D \ge 0.5) = 1.71$

Расчетный скан гало	Цветовая изограмма			
(изоденса $D = 0.5$)	$D(\Delta D = 0.2)$	D(x)	3D-изограмма	Характеристики гало
				Тип ядра ПКИ: протон $E_0 = 557747$ ТэВ $\cos \theta = 0.86$ $t_{Pb} = 10.30$ си $N_{\gamma}(R \le 15$ см, выше Pb) = 334968 $N_{\gamma}(R \le 15$ см, $E_{\gamma} \ge 4$ ТэВ, выше Pb) = 5054 $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15$ см, $E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ) = 68118 ТэВ $N_{\gamma \text{ гало}} = 1122834155$ $E_{\text{гало}} = 150354$ ТэВ $S_{\text{гало}} = 10(292 \pm 5) + (2.25 \pm 0.04) + (1.5.0 \pm 0.03) + (1.25 \pm 0.02)$ мм ² $\langle D > (D \ge 0.5) = 1.57$
5 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 4 -5 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5		france and the second s		Тип ядра ПКИ: протон $E_0 = 1048369$ ТэВ $\cos \theta = 0.98$ $t_{Pb} = 9.04$ си $N_{\gamma}(R \le 15$ см, выше Pb) = 293033 $N_{\gamma}(R \le 15$ см, $E_{\gamma} \ge 4$ ТэВ, выше Pb) = 3342 $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15$ см, $E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ) = 36885 ТэВ $N_{\gamma \text{ гало}} = 728500198$ $E_{\text{гало}} = 99969$ ТэВ $S_{\text{гало}} = 10(261 \pm 6) + (3.75 \pm 0.08) + (3.75 \pm 0.08) + (2.25 \pm 0.05)$ мм ² $(D \ge 0.5) = 1.48$

Расчетный скан гало	Цветовая изограмма			
(изоденса $D = 0.5$)	$D(\Delta D = 0.2)$	D(x)	3D-изограмма	Характеристики гало
5 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 4 -5 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5		I and the second		Тип ядра ПКИ: протон $E_0 = 2751811$ ТэВ $\cos \theta = 0.92$ $t_{Pb} = 9.63$ си $N_{\gamma}(R \le 15$ см, выше Pb) = 281659 $N_{\gamma}(R \le 15$ см, $E_{\gamma} \ge 4$ ТэВ, выше Pb) = 2201 $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15$ см, $E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ) = 23244 ТэВ $N_{\gamma \text{ гало}} = 616196140$ $E_{\text{гало}} = 76263$ ТэВ $S_{\text{гало}} = 10(260 \pm 6) + (6.0 \pm 0.1) + (4.00 \pm 0.09) + (2.50 \pm 0.05) \text{ мм}^2$ $\le D > (D \ge 0.5) = 1.42$
-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6				Тип ядра ПКИ: протон $E_0 = 517747$ ТэВ $\cos \theta = 0.97$ $t_{Pb} = 9.13$ си $N_{\gamma}(R \le 15$ см, выше Pb) = 305570 $N_{\gamma}(R \le 15$ см, $E_{\gamma} \ge 4$ ТэВ, выше Pb) = 5145 $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15$ см, $E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ) = 72945 ТэВ $N_{\gamma \ rano} = 1004286785$ $E_{rano} = 153363$ ТэВ $S_{rano} = 10(249 \pm 5) + (2.75 \pm 0.06) + (2.50 \pm 0.05) + (2.25 \pm 0.05)$ мм ² $(D \ge 0.5) = 1.59$



Расчетный скан гало	Цветовая изограмма			
(изоденса $D = 0.5$)	$D (\Delta D = 0.2)$	D(x)	3D-изограмма	Характеристики гало
	Γ	ало, образованные перви	ичными ядрами Не	
		I de la constante de la consta		Тип ядра ПКИ: Не $E_0 = 1002831$ ТэВ $\cos \theta = 1.00$ $t_{Pb} = 8.86$ си $N_{\gamma}(R \le 15$ см, выше Pb) = 272557 $N_{\gamma}(R \le 15$ см, $E_{\gamma} \ge 4$ ТэВ, выше Pb) = 3543 $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15$ см, $E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ) = 50551 ТэВ $N_{\gamma \text{ гало}} = 731926775$ $E_{\text{гало}} = 110092$ ТэВ $S_{\text{гало}} = 10(236 \pm 5) + (3.25 \pm 0.08) + (3.00 \pm 0.07) + (2.00 \pm 0.05)$ мм ² $(D \ge 0.5) = 1.47$
		A A A A A A A A A A A A A A A A A A A		Тип ядра ПКИ: Не $E_0 = 923893 \text{ ТэВ}$ $\cos \theta = 0.83$ $t_{Pb} = 10.67 \text{ сu}$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, \text{ выше Pb}) = 165643$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}, \text{ выше Pb}) = 1230$ $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэB}) = 11524 \text{ ТэB}$ $N_{\gamma \text{ гало}} = 305084888$ $E_{\text{гало}} = 38425 \text{ ТэB}$ $S_{\text{гало}} = 10(171 \pm 4) + (1.50 \pm 0.03) + (1.25 \pm 0.03) + (1.25 \pm 0.03) \text{ мм}^2$ $(D \ge 0.5) = 1.33$

Цветовая изограмма Расчетный скан гало (изоденса D = 0.5) $D (\Delta D = 0.2)$ D(x)3D-изограмма Характеристики гало Тип ядра ПКИ: Не $E_0 = 445252 \text{ T}_{2}B$ $\cos\theta = 0.92$ $t_{\rm Pb} = 9.63 \, {\rm cu}$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, \text{ выше Pb}) = 163013$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}, \text{выше Pb}) = 1739$ $\Sigma E_{0y}(R \le 15 \text{ см}, E_{0y} \ge 4 \text{ ТэВ}) = 20088 \text{ ТэВ}$ *N*_{ү гало} = 360787979 $E_{\text{гало}} = 51015 \text{ ТэВ}$ $S_{\text{гало}} = 10(162 \pm 3) + (1.00 \pm 0.02) \text{ MM}^2$ -2 -1 0 $(D \ge 0.5) = 1.43$ Гало, образованные первичными ядрами Fe Тип ядра ПКИ: Fe $E_0 = 2530618 \text{ T}$ T₂B $\cos\theta = 0.89$ $t_{\rm Pb} = 9.95 \, \rm cu$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, \text{ выше Pb}) = 393208$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}, \text{ выше Pb}) = 2454$ $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}) = 24140 \text{ ТэВ}$ $N_{\gamma \, \text{гало}} = 792096289$ $E_{\text{гало}} = 95616 \text{ ТэВ}$ $S_{\text{гало}} = 10(418 \pm 8) + (3.00 \pm 0.06) + (2.75 \pm 100)$ 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 2 $(0.05) + (2.25 \pm 0.04) \text{ mm}^2$ $<D>(D \ge 0.5) = 1.34$

Расчетный скан гало	Цветовая изограмма			
(изоденса $D = 0.5$)	$D\left(\Delta D=0.2\right)$	D(x)	3D-изограмма	Характеристики гало
		the second secon		Тип ядра ПКИ: Fe $E_0 = 1632027 \text{ ТэВ}$ $\cos \theta = 0.94$ $t_{Pb} = 9.42 \text{ сu}$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, \text{ выше Pb}) = 395830$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}, \text{ выше Pb}) = 4072$ $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэB}) = 50755 \text{ ТэB}$ $N_{\gamma \text{ гало}} = 934284996$ $E_{\text{гало}} = 131154 \text{ ТэB}$ $S_{\text{гало}} = 10(377 \pm 8) + (11.3 \pm 0.2) + (3.00 \pm 0.06) + (2.25 \pm 0.05) \text{ мм}^2$ $(D \ge 0.5) = 1.42$
6 5 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -5 -6 -6 -4 -2 0 2 4 6				Тип ядра ПКИ: Fe $E_0 = 1326306 \text{ ТэВ}$ $\cos \theta = 0.98$ $t_{Pb} = 9.04 \text{ cu}$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, \text{ выше Pb}) = 369062$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}, \text{ выше Pb}) = 3473$ $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэB}) = 35550 \text{ ТэB}$ $N_{\gamma \text{ гало}} = 825178239$ $E_{\text{гало}} = 110703 \text{ ТэB}$ $S_{\text{гало}} = 10(346 \pm 8) + (9.0 \pm 0.2) + (2.75 \pm 0.06) + (2.00 \pm 0.05) \text{ мм}^2$ $< D > (D \ge 0.5) = 1.41$

Расчетный скан гало	Цветовая изограмма			
(изоденса <i>D</i> = 0.5)	$D\left(\Delta D=0.2\right)$	D(x)	3D-изограмма	Характеристики гало
				Тип ядра ПКИ: Fe $E_0 = 1973791$ ТэВ $\cos \theta = 0.87$ $t_{Pb} = 10.18$ cu $N_{\gamma}(R \le 15$ см, выше Pb) = 312261 $N_{\gamma}(R \le 15$ см, $E_{\gamma} \ge 4$ ТэВ, выше Pb) = 2079 $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15$ см, $E_{0\gamma} \ge 4$ ТэВ) = 19210 ТэВ $N_{\gamma \text{ гало}} = 598306338$ $E_{\text{гало}} = 73494$ ТэВ $S_{\text{гало}} = 10(328 \pm 6) + (5.5 \pm 0.1) + (1.50 \pm 0.03) + (1.50 \pm 0.03) \text{ мм}^2$ $(D \ge 0.5) = 1.33$
		A A A A A A A A A A A A A A A A A A A		Тип ядра ПКИ: Fe $E_0 = 1522354 \text{ ТэВ}$ $\cos\theta = 0.93$ $t_{Pb} = 9.53 \text{ сu}$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, \text{ выше Pb}) = 345322$ $N_{\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{\gamma} \ge 4 \text{ ТэВ}, \text{ выше Pb}) = 3330$ $\Sigma E_{0\gamma}(R \le 15 \text{ см}, E_{0\gamma} \ge 4 \text{ ТэB}) = 36254 \text{ ТэB}$ $N_{\gamma \text{ гало}} = 787889308$ $E_{\text{гало}} = 105051 \text{ ТэB}$ $S_{\text{гало}} = 10(326 \pm 7) + (4.8 \pm 0.1) + (2.50 \pm 0.05) + (2.25 \pm 0.05) \text{ мм}^2$ $(D \ge 0.5) = 1.41$