

На правах рукописи

Сабуров Артем Владимирович

**Пространственное распределение частиц ШАЛ с  
энергией выше  $10^{17}$  эВ по данным Якутской  
установки**

Специальность 01.04.16 —  
Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Якутск — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН)

Научный руководитель: **Глушков Александр Васильевич**, кандидат физико-математических наук, ИКФИА СО РАН, Лаборатория широких атмосферных ливней, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Просин Василий Владимирович**, доктор физико-математических наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцина Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Лаборатория наземной гамма-астрономии, ведущий научный сотрудник

**Рубцов Григорий Игоревич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), заместитель директора по научной работе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»)

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте [www.inr.ru](http://www.inr.ru)

Автореферат разослан \_\_\_\_\_.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.119.01,  
член-корреспондент РАН

С. В. Троицкий

## Общая характеристика работы

Целью данной работы является исследование функции пространственного распределения (ФПР) частиц широких атмосферных ливней по данным ЯКУ ШАЛ. ФПР является важной характеристикой широких атмосферных ливней, позволяющей реконструировать многие их параметры, а значит — отражающей основные характеристики ПКЛ: от первичной энергии до массового состава.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. в рамках общепринятых теоретических моделей адронных взаимодействий получить оценку откликов от заряженной и мюонной компонент ШАЛ в детекторах Якутской установки и найти параметризацию их ФПР, которая бы наилучшим образом описывала экспериментальные данные;
2. на основе ФПР рассчитанных откликов и проверки энергетического баланса компонент ШАЛ уточнить оценку энергии ПКЛ, зарегистрированных Якутской установкой;
3. в рамках выполненных расчетов получить оценку глубины максимума развития ливней ( $x_{\max}$ ), зарегистрированных Якутской установкой;
4. получить оценку массового состава КЛ в области  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ из параметров ФПР и оценок  $x_{\max}$ .

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Получена оценка отклика (энерговыведения) сцинтилляционных детекторов Якутской установки в широких атмосферных ливнях с энергиями  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ от вторичных ливневых частиц в рамках четырех моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.
2. Получена оценка массового состава первичных космических лучей с энергиями  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ, рассчитанная с помощью функции пространственного распределения откликов наземных сцинтилляционных детекторов. Согласно этой оценке, в этой области энергий происходит быстрое облегчение состава с ростом энергии.

3. Получена средняя глубина максимума каскадной кривой широких атмосферных ливней из функции пространственного распределения мюонов с порогом  $1 \times \sec \theta$  ГэВ в диапазоне энергий  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ.
4. На основе интерпретации результатов моделирования в рамках четырех наиболее широко используемых моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях получена новая оценка первичной энергии широких атмосферных ливней, которая в  $\sim 1.4$  раза ниже по сравнению со значениями, полученными ранее.

**Научная новизна:**

1. Впервые с помощью четырех широко используемых моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях получена оценка откликов сцинтилляционных детекторов Якутской установки от электронов, позитронов, гамма-квантов и мюонов в широких атмосферных ливнях, вызванных первичными протонами и ядрами железа в космических лучах с энергиями  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ.
2. Впервые вычислены функции пространственного распределения откликов наземных и подземных сцинтилляционных детекторов Якутской установки в рамках четырех моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях и подобраны их аналитические аппроксимации.
3. Впервые из анализа формы функции пространственного распределения откликов наземных сцинтилляционных детекторов Якутской установки была получена оценка массового состава космических лучей с энергиями выше  $10^{17}$  эВ в рамках четырех моделей развития широких атмосферных ливней.
4. Впервые из экспериментальной и расчетной функции пространственного распределения мюонов Якутской установки найдена средняя глубина максимума каскадной кривой в диапазоне энергий выше  $10^{17}$  эВ.
5. Представлена новая интерпретация данных Якутской установки, полученная с помощью модельных расчетов с использованием 4 моделей адронных взаимодействий, которая дала два метода оценки первичной энергии широких атмосферных ливней. Первый основан на функции пространственного распределения откликов наземных

сцинтилляционных детекторов, второй является результатом ревизии калориметрического метода, принятого на установке.

**Практическая значимость:** Построена быстрая модель сцинтилляционного детектора Якутской установки. Проведена ревизия калориметрического метода определения первичной энергии широких атмосферных ливней, принятого в эксперименте. Полученные при этом результаты позволили уточнить оценку энергии космических лучей, зарегистрированных якутским экспериментом. Уточненный энергетический спектр и оценка массового состава, выполненные единой методикой в широком диапазоне энергий, позволят сделать обоснованное заключение об основных источниках космических лучей сверхвысоких энергий, а также о положении на энергетической шкале переходной области между галактическими и внегалактическими космическими лучами.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались на симпозиумах и конференциях: 32-й Международной конференции по космическим лучам (Пекин, Китай, 2011), Международном симпозиуме по космическим лучам сверхвысоких энергий (Женева, Швейцария, 2012) и 33-й Всероссийской конференции по космическим лучам (Дубна, 2014).

**Личный вклад.** Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии. Автор активно участвовал в постановке научных задач, принимал прямое участие в обработке, научном анализе и интерпретации результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных. При участии автора была разработана зарегистрирована в Роспатенте база экспериментальных данных Якутской установки ШАЛ (свидетельство государственной регистрации № 2012620884).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях, 10 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [1–10], 3 — в тезисах докладов [11–13].

Отдельные аспекты работы, положенные в основу диссертации, прошли независимую экспертизу и были поддержаны программой Президиума РАН “Фундаментальные свойства материи и астрофизика” (2012), грантами РФФИ № 13-02-12036-офи-м (2013), а также грантом президента Республики Саха (Якутия) для молодых ученых, специалистов и студентов (2014).

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении приведен обзор научной литературы по теме исследования, дано обоснование актуальности исследования, проведен-

ного в рамках данной диссертационной работы, ставятся задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы. В первой главе дается описание Якутской комплексной установки ШАЛ, описывается методика калибровки, регистрации событий КЛСВЭ и их последующей обработки. Во второй главе приводится обзор программного комплекса и теоретических моделей развития ШАЛ, применявшихся для интерпретации данных Якутской установки. В третьей главе описывается процедура моделирования и приводится методика оценки отклика наземных сцинтилляционных детекторов Якутской установки. В четвертой главе приводится анализ данных ЯКУ ШАЛ и физическая интерпретация особенностей ФПР откликов наземных сцинтилляционных детекторов и мюонов с учетом результатов теоретических расчетов, а также делается вывод по спектру и массовому составу ПКЛ в области энергий  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ. Полный объем диссертации занимает 146 страниц с 58 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 200 наименований.

## Содержание работы

Во введении приведен обзор научной литературы по теме исследования, дано обоснование актуальности исследования, проведенного в рамках данной диссертационной работы, ставятся задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе дается описание Якутской комплексной установки ШАЛ, сделан обзор методов отбора событий, измерения плотности частиц и калибровки детекторов. Описана процедура геометрической реконструкции ливней на основе ФПР заряженных частиц в аппроксимации Грейзена-Линсли и рассмотрен калориметрический метод оценки первичной энергии, принятый экспериментом.

Якутская установка является комплексным детектором широких атмосферных ливней, способным регистрировать заряженные частицы, мюоны с пороговой энергией 1 ГэВ и черенковское излучение ШАЛ. Отбор событий производится по триггерам, генерируемым наземными детекторами с двумя порогами срабатывания: триггеру-1000 с пороговой энергией  $E_0 \simeq (2 - 3) \times 10^{18}$  эВ и триггеру-500 с порогом  $E_0 \sim 10^{17}$  эВ. Наличие двух независимых порогов регистрации ШАЛ позволяют Якутской установке эффективно контролировать широкий диапазон энергии космических лучей.

Экспериментально установлено, что наиболее подходящим классификационным параметром для триггера-500 является плотность частиц на расстояниях 300 м ( $\rho_s(300)$ ), а для триггера-1000 — на расстоянии 600 м ( $\rho_s(600)$ ).

Геометрическая реконструкция ливней на Якутской установке производится по ФПР заряженных частиц в аппроксимации Грейзена-Линсли:

$$\rho(r) = M_s \cdot \left(\frac{r}{r_M}\right)^{-\alpha_s} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_M}\right)^{-(\beta_s - \alpha_s)}, \quad (1)$$

где  $r_M$  — Мольеровский радиус, а  $\alpha_s$  и  $\beta_s$  — структурные параметры, полученные экспериментально:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_s &= 1 \\ \beta_s(\theta, \rho_s(600)) &= 1.38 + 2.16 \cdot \cos \theta + 0.15 \cdot \lg \rho_s(600) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\rho_s(600)$  — плотность частиц, регистрируемых наземными детекторами на расстоянии 600 м от оси. Мольеровский радиус зависит от температуры ( $t$  °C) и давления ( $p$ , мб), измеряемых в каждом ливневом событии, его среднегодовое значение приблизительно равно 70 м.

Для оценки первичной энергии в якутском эксперименте принят калориметрический метод, основанный на регулярных измерениях потока черенковского излучения ШАЛ. В этом методе первичная энергия  $E_0$  определяется как сумма энергий всех компонент ШАЛ и связывает ее с экспериментально измеряемой величиной  $\rho_s(600)$ :

$$\left. \begin{aligned} E_0 &= E_i + E_{\text{el.}} + E_\mu + \Delta E \\ E_i &= E_\gamma + E_{\text{ion.}} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $E_i$  — энергия, рассеянная над уровнем наблюдения электромагнитной компонентой, включая ионизационные потери электронов/позитронов  $E_{\text{ion.}}$  и энергию фотонов  $E_\gamma$ ;  $E_{\text{el.}}$  — доля первичной энергии, проносимая электронно-позитронной компонентой ниже уровня наблюдения;  $E_\mu$  — энергия мюонов над уровнем наблюдения. Остаток  $\Delta E$  включает в себя энергию нейтрино, энергию, переданную ядрам в различных реакциях, а также ионизационные потери

мюонов и адронов в атмосфере; эта величина не контролируется экспериментом.

Применение данного метода на Якутской установке дало следующую аппроксимацию для оценки  $E_0$ :

$$E_0 = (4.1 \pm 1.4) \times 10^{17} \cdot (\rho_s(600, 0^\circ))^{0.97 \pm 0.04} \text{ (эВ)}, \quad (4)$$

$$\rho_s(600, 0^\circ) = \rho_s(600, \theta) \times \exp\left(\frac{(\sec \theta - 1) \cdot x_0}{\lambda_\rho}\right), \quad (5)$$

$$\lambda_\rho = 400 \pm 45 \text{ (г/см}^2\text{)}, \quad (6)$$

где  $x_0 = 1020 \text{ г/см}^2$  (глубина над уровнем моря Якутской установки),  $\rho_s(600, \theta)$  — плотность заряженных частиц, измеренная наземными сцинтилляционными детекторами (НСД) на расстоянии  $r = 600 \text{ м}$  от оси,  $\lambda_\rho$  — пробег поглощения. Позже, соотношения (4) и (6) были слегка изменены:

$$E_0 = (4.8 \pm 1.6) \times 10^{17} \cdot (\rho_s(600, 0^\circ))^{1.0 \pm 0.02}, \quad (7)$$

$$\lambda_\rho = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \cdot \lg \rho_s(600, 0^\circ). \quad (8)$$

Интенсивность энергетического спектра КЛ, оцененная по формуле (7), оказалась значительно выше мировых данных. Результаты, полученные на Якутской установке, заняли верхнее положение по интенсивности спектра,

**Вторая глава** посвящена обзору использованного в исследовании программного пакета CORSIKA, который является стандартным инструментом в области физики КЛ сверхвысоких энергий и широко применяется исследовательскими группами для теоретических предсказаний и интерпретации экспериментальных данных. Описываются четыре наиболее широко используемые в физике КЛСВЭ модели адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Рассмотрено влияние систематики выбранной модели адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях на измеряемые параметры ШАЛ — глубина максимума развития ливня ( $x_{\max}$ ) и долю мюонов в заряженной компоненте. Также в главе рассмотрены основные изменения, внесенные в модели нового поколения после публикации предварительных данных, полученных на большом адронном коллайдере (БАК).



**Третья глава** посвящена моделированию ШАЛ с помощью кода CORSIKA в рамках нескольких моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях и оценке отклика в сцинтилляционных детекторах Якутской установки.

Для моделирования ШАЛ был использован код CORSIKA версии 7.3700. В качестве генераторов адронных взаимодействий высоких энергий были выбраны модели QGSJet II-04 и EPOS-LHC. Поскольку расчеты ливней с использованием моделей QGSJet II и EPOS сопряжены со значительными временными затратами, для сравнения с генераторами прошлых поколений были взяты модели QGSJet01 и SIBYLL-2.1.

Для получения оценок массового состава ПКЛ, зарегистрированных на ЯКУ ШАЛ, в качестве первичных компонент были выбраны протоны и ядра железа. Были разыграны ливни с энергиями в диапазоне  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ с логарифмическим шагом  $\Delta \lg E_0(\text{эВ}) = 0.5$ . Для учета зенитно-угловой зависимости для каждой компоненты ПКЛ и значения первичной энергии задавались зенитные углы прихода с  $\cos \theta = 1.0, 0.975, 0.95, 0.9, 0.85, 0.75, 0.65$  и  $0.55$ . Для каждого набора входных параметров (первичная частица,  $E_0, \theta$ ) было разыграно по 500 ливней. Для ускорения расчетов был задействован механизм статистического прореживания.

Для построения пространственного распределения частиц на уровне наблюдения применялось радиальное разбиение в плоскости ливневого диска с логарифмическим шагом по расстоянию от оси  $\Delta \lg r(\text{м}) = 0.04$ . В каждом радиальном бине частицы сортировались по энергии  $\epsilon \times \cos \theta_i$  и в них строились дифференциальные энергетические спектры  $I(\epsilon)$ , с помощью которых можно было гибко задавать энергетический порог при построении пространственного распределения частиц и вычислении отклика в сцинтилляционном детекторе. В результате была получена аппроксимация

$$\rho(r) = \rho_s(600) \cdot \left( \frac{r + r_1}{600 + r_1} \right)^{\alpha_s} \cdot \left( \frac{r + r_0}{r_0 + 600} \right)^{\beta_s - \alpha_s} \cdot \left( \frac{r + r_2}{r_2 + 600} \right)^{\gamma_s}, \quad (9)$$

где  $\alpha_s = -2$ ,  $\gamma_s = -8$ ,  $r_0 = 8$ ,  $r_1 = 10$ ,  $r_2 = 10^4$ ; а  $\beta_s$  и  $\rho_s(600, 0^\circ)$  — свободные параметры, которые вычисляются в ходе  $\chi^2$ -минимизации. Здесь был сделан

переход от Мольеровского радиуса  $r_M$  к формальным масштабным параметрам  $r_0$ ,  $r_1$  и  $r_2$ .

Пространственное распределение мюонов аппроксимировалось функцией на основе аппроксимации Грейзена-Линсли:

$$\rho_\mu(r) = \rho_\mu(600) \cdot \left(\frac{r}{600}\right)^{\alpha_\mu} \cdot \left(\frac{r+r_0}{r_0+600}\right)^{\beta_\mu-\alpha_\mu} \cdot \left(\frac{r+2000}{2600}\right)^{\gamma_\mu}, \quad (10)$$

где  $\alpha_\mu = -0.75$ ,  $\gamma_\mu = -6.5$ ,  $r_0 = 280$ ,  $\beta_\mu$ ,  $\rho_\mu(600, 0^\circ)$  — свободные параметры, определяемые в ходе  $\chi^2$ -минимизации.

Параметры каскадной кривой ШАЛ ( $x_{\max}$ ) получались аппроксимацией функции Гайссера-Хилласа.

Имея дифференциальные энергетические спектры ливневых компонент на разных расстояниях от оси, можно построить модель сцинтилляционного детектора, учитывающую различные процессы, происходящие при прохождении через него частиц и дающую функцию отклика  $u(\epsilon)$ , которая и будет определять плотность частиц, согласующуюся с измеряемой в эксперименте.

Модель детектора была создана в рамках идеологии быстрой симуляции. В ней детектор был представлен в виде нескольких слоев вещества: слой снега (среднегодовое значение 1.5 см в водном эквиваленте), покрытие и пластиковый сцинтиллятор, представленный в виде водного эквивалента толщиной  $\sim 5$  г/см<sup>2</sup>. При этом рассматривались три основные компоненты, регистрируемые станцией наблюдения и связанные с ними наиболее важные физические процессы: ионизация, тормозное излучение — для электронов и позитронов; ионизация — для мюонов; образование пар и электроны отдачи от Комптоновского рассеяния — для гамма-квантов.

Вместе со снегом количество вещества в покрытии составляет  $\sim 2.5$  г/см<sup>2</sup>. Очевидно, что вклад в отклик дадут лишь частицы с энергией достаточной для преодоления всех слоев покрытия и попавшие в сцинтиллятор, поэтому для электромагнитной компоненты будет действительным энергетический порог  $\epsilon_{\text{thr}}^{\text{e-m}} = 6$  МэВ.

Энерговыделение в сцинтилляторе  $\Delta E_s(r)$  пропорционально числу прошедших через него частиц и измеряется в относительных единицах:

$$\rho_s = \frac{\Delta E_s(R)}{E_1}, \quad (11)$$

где  $E_1 = 11.75$  МэВ — энергия, выделенная в сцинтилляторе при прохождении вертикального релятивистского мюона (единица отклика). При этом полный сигнал в детекторе будет суммой вкладов всех компонент:

$$\rho_s(r) = \rho_e(r) + \rho_\mu(r) + \rho_\gamma(r), \quad (12)$$

где вклад каждой компоненты типа  $m$  определяется функцией отклика  $u_m(\epsilon_i, \theta_i)$  и дифференциальным спектром частиц на заданном расстоянии от оси  $I_m(\epsilon_i, \theta_i, r)$  с учетом зенитного угла прихода  $\theta_i$  (энергия приводится к вертикали), т.е. спектр численно задает функцию источника:

$$\rho_m(r) = \sum_i u_m(\epsilon_i, \theta_i) \cdot I_m(\epsilon_i, \theta_i, r). \quad (13)$$

Полученная ФПР отклика детектора имеет сложную форму. Согласно модели QGSJet01, в ливнях с углом  $\cos \theta = 0.95$  инициированных протонами с  $E_0 = 10^{18}$  эВ, на расстояниях от оси  $r > 50$  м она хорошо описывается аппроксимацией (9) с параметрами  $\rho_s(600) = 2.51$  1/м<sup>2</sup>,  $\beta_s = 2.86$ . Аналогичная картина наблюдается в случае других комбинаций первичного состава КЛ и моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.

Из результирующего аналитического описания ФПР вида (9) также вычислялись другие характеристики ШАЛ:  $\rho_s(300, \theta)$  — значение ФПР отклика НСД на расстоянии 300 м от оси и локальная крутизна спада ФПР в фиксированных диапазонах расстояний от оси ( $r_1 - r_2$ ):

$$\eta_s(r_1 - r_2) = \frac{\ln \rho_s(r_1) - \ln \rho_s(r_2)}{\ln r_2 - \ln r_1}, \quad (14)$$

где значение  $\eta(r_1 - r_2)$  вычислялось для трех диапазонов:  $(r_1 - r_2) = (100 - 400)$  м,  $(200 - 800)$  м,  $(300 - 1200)$  м.

ФПР мюонов с различными энергетическими порогами в ливнях, смоделированных с помощью кода CORSIKA, были получены с помощью дифференциальных энергетических спектров мюонов на разных расстояниях от оси. Радиальное разбиение в интервале от 1 до 2000 м производилось с логарифмическим шагом  $\Delta \lg r = 0.04$ , после чего в каждом радиальном бине подсчитыва-

лось полное число частиц путем интегрирования дифференциального спектра. Для получения аналитического описания ФПР была использована аппроксимация вида (10). По ней вычислялись плотности на расстоянии 300 м от оси ( $\rho_\mu(300)$ ), а также значения локальных наклонов ФПР в заданных диапазонах расстояний:

$$\eta_\mu(r_1 - r_2) = \frac{\ln \rho_\mu(r_1) - \ln \rho_\mu(r_2)}{\ln r_2 - \ln r_1}, \quad (15)$$

где  $(r_1 - r_2) = (100 - 400)$  м,  $(200 - 800)$  м и  $(300 - 1200)$  м.

После исключения зенитно-угловой зависимости из ФПР отклика наземных детекторов, для модели QGSJet01 была получена следующая связь между классификационным параметром  $\rho_s(600,0^\circ)$  и первичной энергией  $E_0$  (см. рис. 1):

$$E_0 = (3.24 \pm 0.1) \times 10^{17} \cdot (\rho_s(600,0^\circ))^{1.015}, \quad (16)$$

что в пределах 8% согласуется с оценкой, полученной группой МГУ.

Другие модели — QGSJet II-04, SIBYLL-2.1 и EPOS-LHC — дали, соответственно, следующие зависимости:

$$E_0 = (3.52 \pm 0.1) \times 10^{17} \cdot (\rho_s(600,0^\circ))^{1.02}, \quad (17)$$

$$E_0 = (3.09 \pm 0.1) \times 10^{17} \cdot (\rho_s(600,0^\circ))^{1.015}, \quad (18)$$

$$E_0 = (3.74 \pm 0.1) \times 10^{17} \cdot (\rho_s(600,0^\circ))^{1.02}, \quad (19)$$

Усреднение по всем моделям дало:

$$E_0 = (3.40 \pm 0.18) \times 10^{17} \cdot (\rho_s(600,0^\circ))^{1.017}, \quad (20)$$

что привело к значению оцененной энергии  $E_0$ , которое в 1.20 раз меньше по сравнению с оценкой (4) и в 1.41 раз меньше по сравнению с оценкой (7).

**В четвертой главе** приводится интерпретация экспериментальных данных ЯКУ ШАЛ сделанная на основе полученных модельных предсказаний. Дается оценка массового состава первичных КЛ с энергией  $E_0 \geq 10^{17}$  эВ, описывается методика получения глубины максимума каскадной кривой ШАЛ ( $x_{\max}$ ) из мюонных данных. Пересмотрен калориметрический метод восстановления первичной энергии, принятый в эксперименте. В конце главы приводится по-

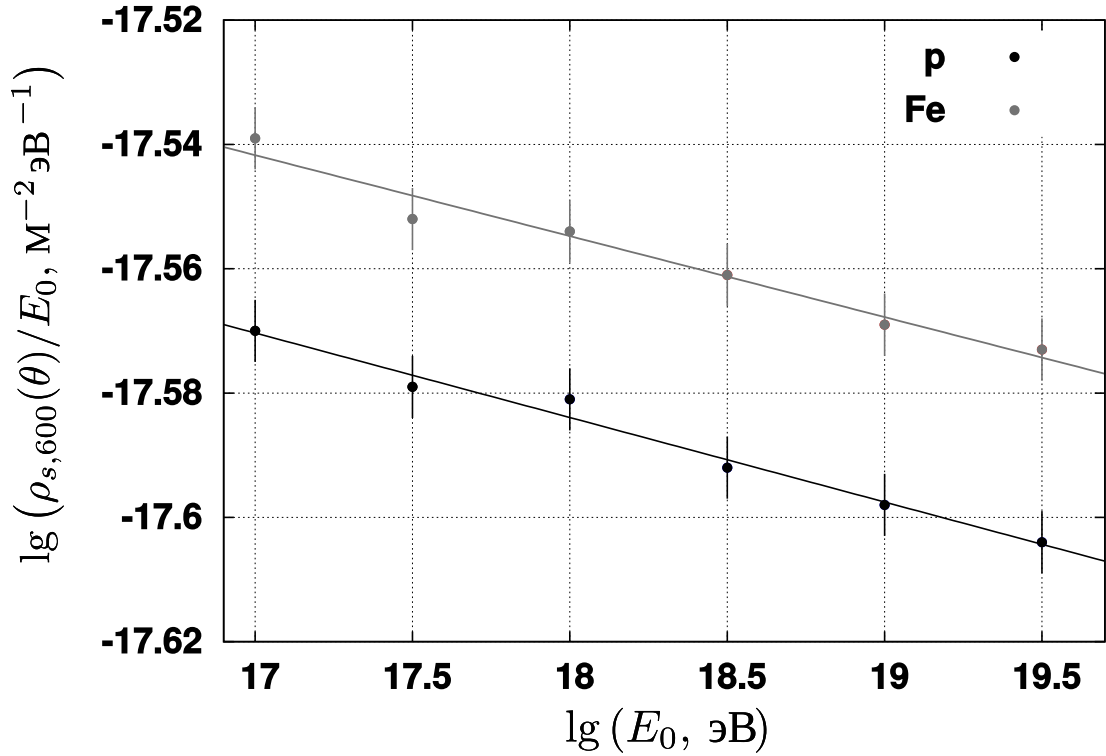


Рис. 1 — Энергетическая зависимость величины  $\lg(\rho_s(600,0^\circ)/E_0)$  для первичных протонов и ядер железа согласно предсказаниям модели QGSJet01 для вертикальных ливней.

правка к энергетическому спектру первичных космических лучей, полученному на ЯКУ ШАЛ.

Для получения оценки массового состава КЛ, зарегистрированных Якутской установкой, были отобраны события с зенитными углами  $\theta \lesssim 25.8^\circ$  ( $\cos \theta \gtrsim 0.9$ ). Энергия КЛ определялась из соотношения (20). Величина  $\rho_s(600,0^\circ)$  в (20) находилась согласно соотношению (5), а длина пробега  $\lambda_\rho$  определялась как

$$\lambda_\rho = 415 \pm 5 \text{ (г/см}^2\text{)}. \quad (21)$$

Геометрическая реконструкция рассмотренных событий производилась по аппроксимации ФПР вида Грейзена-Линсли (1), параметры которой  $\alpha_s$  и  $\beta_s$  задавались соотношениями (2).

В энергетическом интервале рассматриваемого набора ливней производилось разбиение с шагом  $h_s = \Delta \lg E_0 = 0.2$ . Средние ФПР строились в получившихся бинах с последовательным сдвигом по энергии на  $0.5 \cdot h_s$ . При построении ФПР плотности частиц в отдельных ливнях умножались на нормировочный коэффициент  $\langle E_0 \rangle / E_0$  (где  $\langle E_0 \rangle$  — средняя энергия в группе) и усреднялись между собой в радиальных бинах  $\Delta \lg r = 0.04$ . Средние плотно-

сти частиц находились по формуле

$$\langle \rho_s(r_i) \rangle = \frac{\sum_{k=1}^N \rho_k(r_i)}{N}, \quad (22)$$

где  $N$  — число показаний детекторов на расстояниях от оси в интервалах  $(\lg r_i, \lg r_i + 0.04)$ . Полученные пространственные распределения аппроксимировались ФПР вида (9) с параметрами  $\alpha_s = -2$ ,  $\gamma_s = -8$ ,  $r_0 = 8$ ,  $r_1 = 10$ ,  $r_2 = 10^4$ .

Для сравнения экспериментально измеренных ФПР с результатами теоретических расчетов, в качестве параметра крутизны был выбран параметр  $\eta(100-400)$ , определенный соотношением (14). Этот параметр в диапазоне расстояний (100-400) м близок по величине к  $\beta_s$ , однако в реальном эксперименте он измеряется более точно. На рис. 2 черными точками показаны его значения для энергий  $E_0 = 10^{17} - 10^{19.5}$  эВ. Линиями показаны ожидаемые величины, вычисленные с помощью четырех моделей кода CORSIKA. Крестиками показана зависимость, усредненная по всем моделям. Ее значения оказались ближе всего к предсказаниям моделей QGSJet01 и QGSJet II-04. Эта зависимость позволяет оценить массовый состав первичных частиц с помощью соотношения:

$$\langle \ln A \rangle = \frac{\eta_{\text{exp.}} - \eta_p}{\eta_{\text{Fe}} - \eta_p} \cdot \ln 56, \quad (23)$$

где  $\eta = \eta_s(100 - 400)$  — параметры наклона ФПР, полученные в эксперименте (exp.) и расчетным путем для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe).

На рис. 3 приведены зависимости среднего логарифма массового числа  $\langle \ln A \rangle$  первичных частиц КЛ от энергии  $E_0$ , полученные на разных установках ШАЛ. Черными кружками обозначены оценки массового состава из соотношения (23) зависимости, показанной на рис. 2. Крестики — результаты установки KASCADE за период наблюдений с мая 1998 г. по декабрь 1999 г. (Antoni et al., 2001). Косыми крестиками показаны данные установки Тунка-133, полученные из ФПР черенковского света ШАЛ (Prosin et al., 2014). Пустые квадраты — данные обсерватории им. Пьера Ожэ (Andringa et al., 2010). Прямыми и перевернутыми треугольниками, соответственно, обозначены измерения HiRes (Abbasi et al., 2010) и TA (Tsunesada et al., 2011). Все результаты достаточно хорошо согласуются между собой, за исключением оценок  $\langle \ln A \rangle$  при  $E_0 \gtrsim 2 \times 10^{18}$  эВ, вытекающих из данных обсерватории Пьера Ожэ.

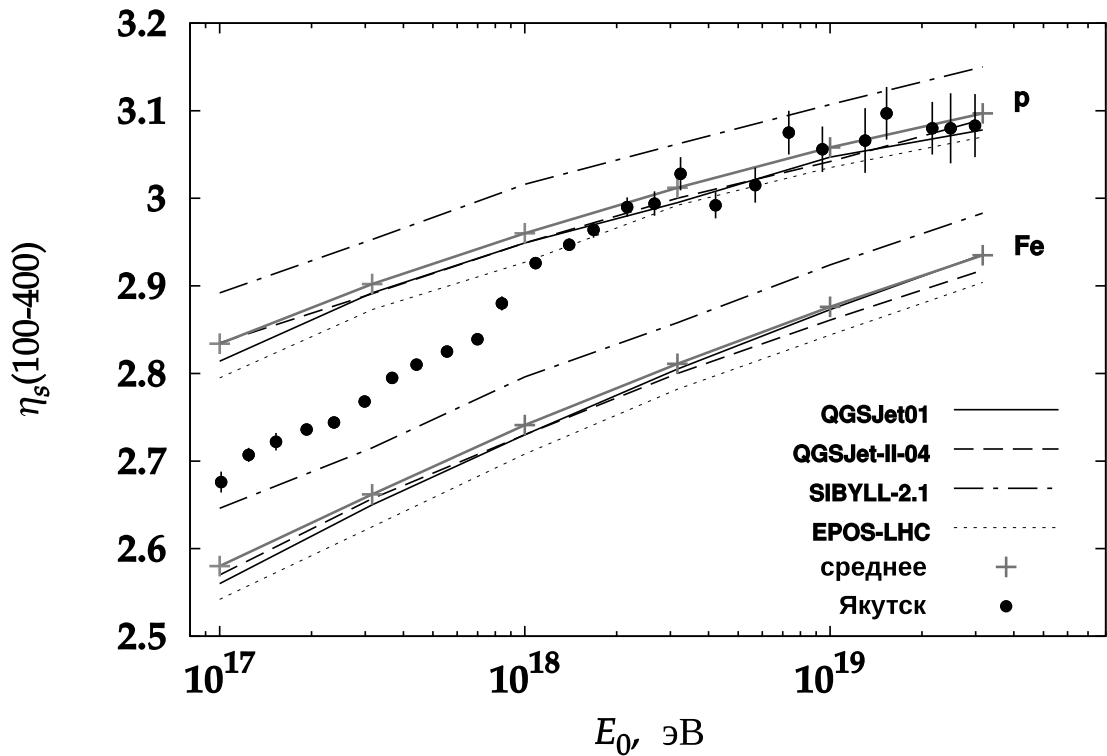


Рис. 2 — Локальный наклон ФПР откликов наземных сцинтилляционных детекторов в диапазоне расстояний 100–400 м от оси в ливнях с  $\cos \theta = 0.95$  и первичными энергиями в диапазоне  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ.

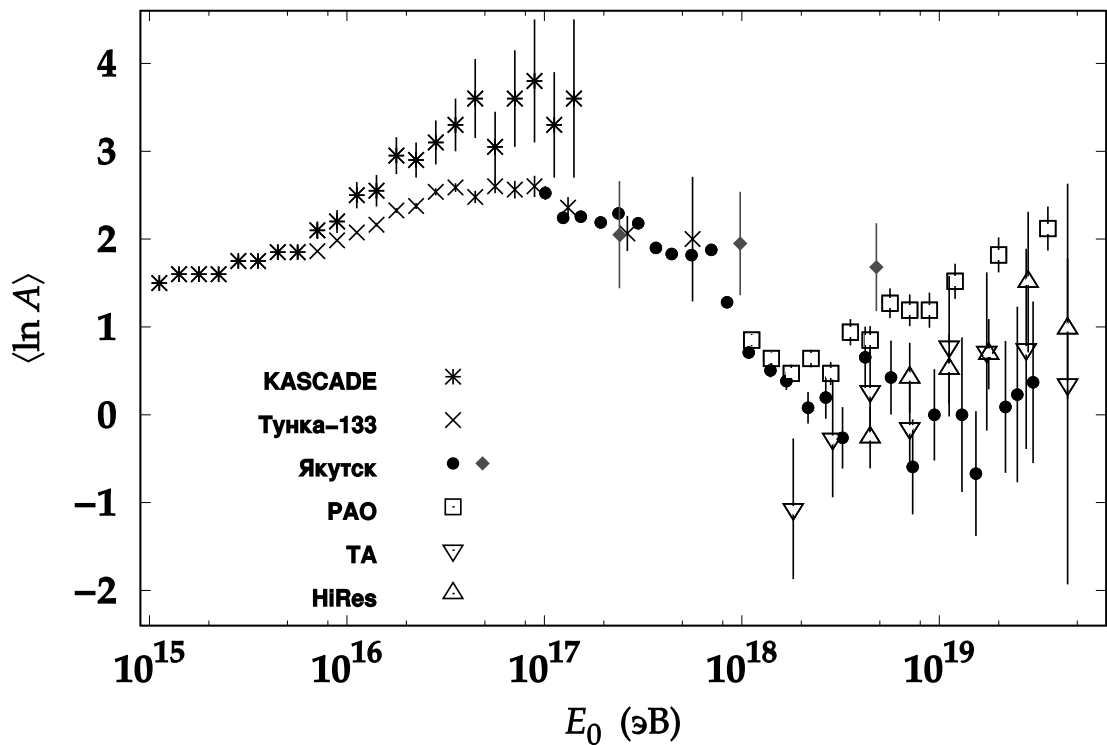


Рис. 3 — Зависимости массового состава КЛ от первичной энергии, полученные на разных установках ШАЛ.

Интерпретация мюонных данных ЯКУ ШАЛ была произведена в рамках моделей SIBYLL-2.1, QGSJet01 и QGSJet II-04. Было исследовано пространственное распределение мюонов, измеренное подземными детекторами установки с порогом  $\epsilon_{\text{thr.}} = 1$  ГэВ. В качестве классификационного параметра была выбрана средняя плотность мюонов на расстоянии 300 м от оси  $\langle \rho_{\mu}(300) \rangle$ , значения которой вычислялись в группах ливней со средними первичными энергиями  $\langle E_0 \rangle$ . Величины  $\rho_{\mu}(300)$  были получены методом средних ФПР. Для получения средних ФПР мюонов был использован метод, аналогичный изложенной в предыдущем разделе процедуре построения средней ФПР сигнала НСД. ФПР строились в бинах по энергии с шагом  $h_{\mu} = \Delta \lg E_0 = 0.2$ , которые последовательно сдвигались по энергии на  $0.5 \cdot h_{\mu}$ . При этом плотности мюонов в отдельных ливнях умножались на нормировочный коэффициент  $\langle E_0 \rangle$  и усреднялись между собой в радиальных бинах  $\Delta \lg r = 0.04$ . Средние плотности мюонов находились по формуле

$$\langle \rho_{\mu}(r_i) \rangle = \frac{\sum_{n=1}^{N_1} \rho_n(r_i)}{N_1 + N_0}, \quad (24)$$

где  $N_1$  и  $N_0$  — числа нулевых и ненулевых показаний мюонных детекторов на расстоянии от оси в интервалах  $(\lg r_i, \lg r_i + 0.04)$ . Полученные средние пространственные распределения мюонов аппроксимировались функцией на основе приближения Грейзена-Линсли вида (10) с параметрами  $\alpha_{\mu} = -0.75$ ,  $\gamma_{\mu} = -6.5$ ,  $r_0 = 280$  и  $\beta_{\mu}, \rho_{\mu}(600, 0^{\circ})$  в качестве свободных параметров; их значения находились с помощью  $\chi^2$ -минимизации.

На рис. 4 показана энергетическая зависимость значений  $\langle \rho_{\mu}(300) \rangle$  нормированных на  $\langle E_0 \rangle$  для  $\langle \cos \theta \rangle = 0.9$ . Такая нормировка на первичную энергию дает более наглядное и удобное для дальнейшего анализа представление мюонных данных. Поскольку точки на рис. 4 не являются независимыми, во время  $\chi^2$ -теста использовалась каждая вторая точка. Вертикальными черточками обозначены ошибки, включающие в себя всю их совокупность, связанную со статистикой событий и усреднением данных. Линиями показаны ожидаемые величины в соответствии с предсказаниями моделей QGSJet01 (штриховые линии), QGSJet II-04 (сплошные линии) и SIBYLL-2.1 (пунктир) для первичных протонов и ядер железа.

Расчеты показывают, что в рамках любой модели развития ШАЛ между глубиной максимума  $x_{\text{max}}$  и логарифмом нормированной на первичную энергию плотностью мюонов имеется линейная зависимость, при любом составе



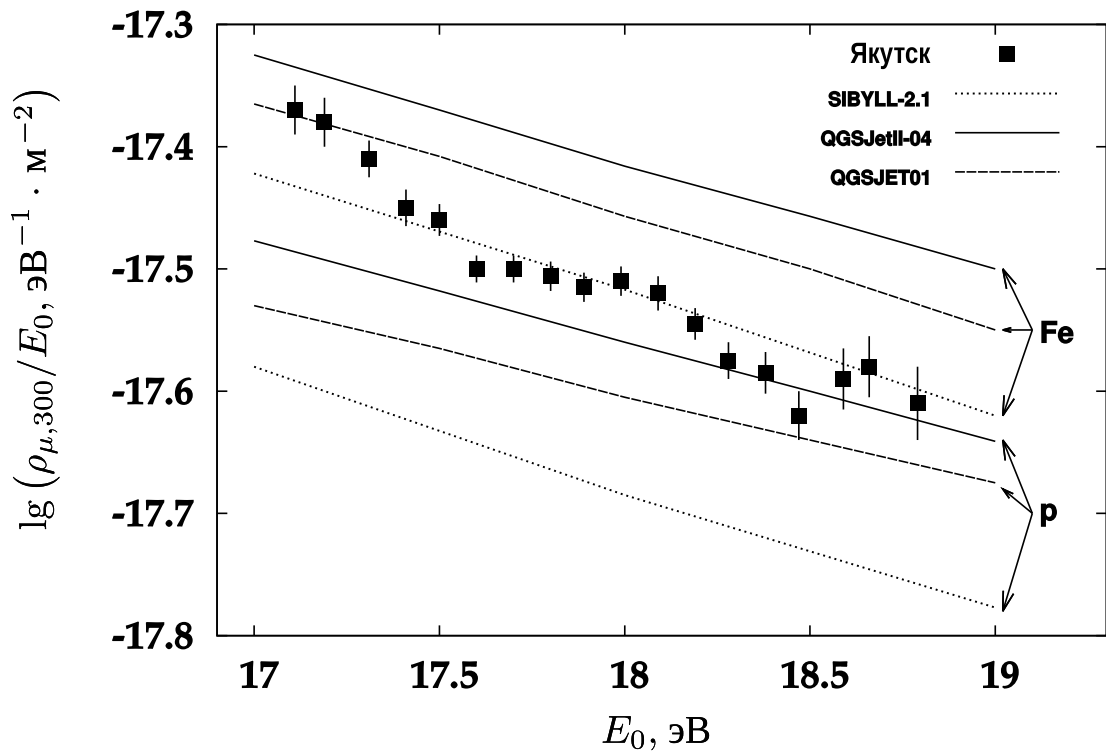


Рис. 4 — Энергетическая зависимость средней плотности мюонов с порогом  $1.0 \cdot \sec \theta$  ГэВ на расстоянии от оси 300 м, нормированной на первичную энергию  $E_0$ , в ливнях с  $\langle \cos \theta \rangle = 0.9$ . Приведено сравнение с теоретическими предсказаниями, полученными в рамках моделей QGSJet II-04, QGSJET01 и SIBYLL-2.1 для первичных протонов и ядер железа.

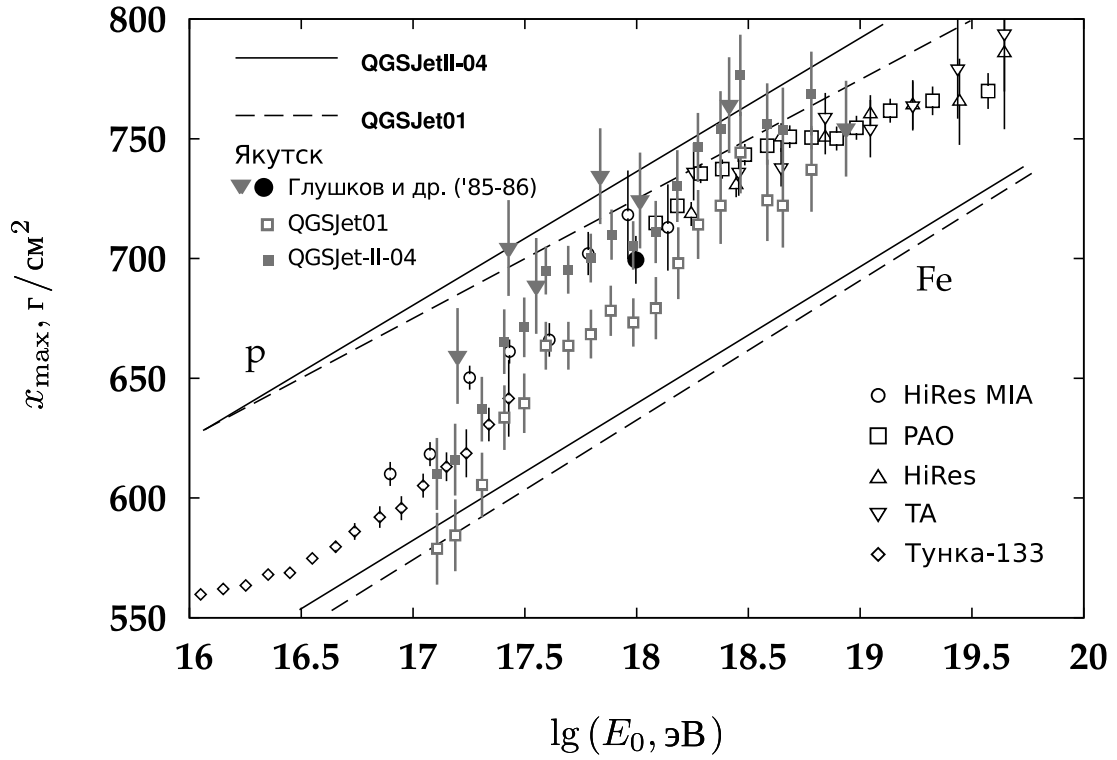


Рис. 5 — Зависимости глубины максимума развития ШАЛ  $x_{\max}$  от энергии ПКЛ. Красными квадратами показана интерпретация данных Якутской установки в рамках моделей QGSJet01 и QGSJet II-04. Светлые кружки — результаты HiRes MIA (Abu-Zayyad et al., 2001), светлые квадраты — PAO (Abraham et al., 2010); прямые треугольники — HiRes (Barcikowski et al., 2013), треугольники, направленные вниз — TA (Jui et al., 2011), ромбики — данные установки Тунка-133 (Prosin et al., 2014). Линиями обозначены теоретические предсказания, полученные в рамках моделей QGSJet01 и QGSJet II-04; они относятся лишь к данным Якутской установки.

первичных частиц:

$$x_{\max} = a \cdot \lg \frac{\rho_{\mu}(300)}{E_0} + b \cdot \sec \theta + c. \quad (25)$$

Константы  $a$  и  $b$  при  $\theta \lesssim 45^\circ$  остаются постоянными,  $c$  зависит от модели развития ШАЛ.

На рис. 5 и красными квадратами показана зависимость  $x_{\max}(E_0)$ . Там же для сравнения приведены данные других экспериментов. Мюоны существенно дополняют и уточняют общую картину.

Моделирование с помощью пакета CORSIKA позволило проанализировать, как калориметрический метод (3) соотносится с модельными предсказа-

ниями по суммарному энерговыделению различных компонент ШАЛ на уровне наблюдения. Энергия, рассеянная в атмосфере электромагнитной компонентой  $E_i$ , является суммой энергии гамма-квантов на уровне наблюдения  $E_\gamma$  и суммарных ионизационных потерь всех электронов и позитронов  $E_{\text{ион.}}$ . Она связана с полным потоку  $F$  черенковского излучения в атмосфере через масштабный коэффициент  $k$ :

$$E_i = k \cdot F, \quad (26)$$

где  $k$  — масштабный коэффициент, измеряемый в эВ/фотонов эВ<sup>-1</sup>:

$$k = k_\gamma + k_{\text{ион.}} = \frac{E_\gamma + E_{\text{ион.}}}{F}. \quad (27)$$

Энергия  $E_{\text{el.}}$  — часть первичной энергии, проносимой электронами и позитронами ниже уровня установки. Она была оценена путем интегрирования дифференциального энерговыделения вдоль каскадной кривой  $N_e(x)$  с пределом ниже уровня наблюдения. Энергия мюонов была определена из экспериментальных данных.

В таблицах 1 и 2 приведены измеряемые параметры и основные компоненты, составляющие первичную энергию для  $E_0 = 10^{18}$  эВ и  $\cos \theta = 0.95$ .

В колонка  $F$  таблицы 1 приведены значения потока черенковского света, измеряемого интегральными черенковскими детекторами. Значения в колонках  $k_\gamma$  и  $k_{\text{ион.}}$  той же таблицы были получены с моделированием с помощью кода CORSIKA. Средние значения  $N_s$  и  $N_\mu$  были получены из ФПР, усредненных по интервалу энергий. В строке “среднее р-Fe” приведены значения, усредненные по всем моделям и составам.

Из данных таблицы 2, усредненных по всем моделям, следует, что суммарное значение энергии  $E_i + E_{\text{el.}} + E_\mu$  равна приблизительно 93% первичной энергии  $E_0$ . Оставшаяся часть ( $\Delta E$ ) не контролируется установкой. В нее входят энергия нейтрино, энергия, переданная ядрам в ходе различных реакций и ионизационные потери мюонов в атмосфере. Ее значение было получено из ранних расчетов, и оно приблизительно согласуется с предсказаниями, полученными с помощью кода CORSIKA.

Суммарные величины всех компонент, составляющих первичную энергию, приведены в последней колонке таблицы 2. Величина  $E_0 = 1.173 \times 10^{18}$  эВ в колонке “эксперимент” превосходит среднее значение  $\langle E_0 \rangle = 0.997 \times 10^{18}$  эВ,

Таблица 1 — Измеряемые параметры ШАЛ с  $E_0 = 10^{18}$  эВ и  $\cos \theta = 0.95$  от первичных ядер ( $A$ ) согласно результатам моделирования с помощью кода CORSIKA и экспериментальным данным.

модель	$A$	$k_\gamma(\theta)$ ( $\times 10^4$ ) эВ <sup>2</sup>	$k_{\text{ion.}}(\theta)$ ( $\times 10^4$ ) эВ <sup>2</sup>	$F(\theta)$ ( $\times 10^{13}$ ) эВ <sup>-1</sup>	$\langle N_s(\theta) \rangle$ ( $\times 10^8$ )	$\rho_s(\theta)$ м <sup>-2</sup>	$\langle N_\mu(\theta) \rangle$ ( $\times 10^6$ )
QGSJet01	p	0.341	2.846	2.104	2.178	2.312	5.000
	Fe	0.224	2.910	2.148	1.250	2.432	7.225
QGSJet II-04	p	0.364	2.816	2.070	2.296	2.438	5.582
	Fe	0.246	2.894	2.148	1.358	2.636	7.777
SIBYLL-2.1	p	0.345	2.822	2.100	2.512	2.193	4.254
	Fe	0.224	2.910	2.228	1.384	2.249	4.930
EPOS-LHC	p	0.377	2.815	2.023	2.355	2.655	5.905
	Fe	0.230	2.894	2.133	1.419	2.917	8.180
среднее	p	0.357	2.825	2.074	2.335	2.400	5.185
	Fe	0.231	2.902	2.164	1.353	2.558	7.028
	p-Fe	0.294	2.864	2.119	1.844	2.479	6.107
эксперимент	—		3.700	2.510	1.793	2.656	6.000

Таблица 2 — Энергетический баланс ШАЛ с  $E_0 = 10^{18}$  эВ и  $\cos \theta = 0.95$  от первичных ядер ( $A$ ) согласно результатам моделирования с помощью кода CORSIKA и экспериментальным данным.

модель	$A$	$E_\gamma$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{\text{ion.}}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{\text{el.}}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_\mu$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$\Delta E$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_0$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ
QGSJet01	p	0.806	6.620	1.469	0.517	0.565	9.978
	Fe	0.529	6.660	1.306	0.785	0.798	9.972
QGSJet II-04	p	0.859	6.476	1.474	0.547	0.624	9.980
	Fe	0.582	6.430	1.302	0.844	0.866	9.981
SIBYLL-2.1	p	0.909	6.625	1.523	0.428	0.491	9.976
	Fe	0.528	6.679	1.340	0.702	0.716	9.965
EPOS-LHC	p	0.891	6.412	1.482	0.524	0.657	9.966
	Fe	0.543	6.415	1.305	0.794	0.898	9.955
среднее	p	0.866	6.533	1.487	0.504	0.584	9.974
	Fe	0.546	6.531	1.313	0.781	0.820	9.968
	p-Fe	0.706	6.532	1.400	0.643	0.702	9.970
эксперимент	—		9.287	0.947	0.636	0.860	11.730
новая оценка	—		7.926	0.947	0.618	0.702	10.190

полученное в ходе моделирования, в  $\sim 1.177$  раз. Такое различие может являться следствием завышения оценки масштабного коэффициента  $k$ , ранее его значение было определено как  $k = 3.7 \times 10^4$  эВ/фотон  $\cdot$  эВ $^{-1}$ , тогда как моделирование с помощью кода CORSIKA дало  $\langle k \rangle = 3.157 \times 10^4$  эВ/фотон  $\cdot$  эВ $^{-1}$ .

Новая оценка первичной энергии, полученная описанным в предыдущем разделе калориметрическим методом дана в последней строке таблицы 2. Значение  $E_0 = 1.019 \times 10^{18}$  эВ было определено с использованием обновленных значений  $E_i = \langle k \rangle \cdot F$ ,  $\langle E_{1\mu} \rangle = 10.3$  ГэВ и  $\Delta E$ . В результате была получена зависимость

$$E_0 = (3.6 \pm 0.3) \times 10^{17} \cdot (\rho_s(600, 0^\circ))^{1.02 \pm 0.02}, \quad (28)$$

которая описывает всю совокупность экспериментальных данных при значениях  $\rho_s(600, 18.2^\circ)$  приведенных к вертикали с помощью соотношения (5) и при  $\lambda_\rho = 415$  г/см $^2$ . Ближе всего к экспериментальным данным оказались модели QGSJet II-04 и EPOS-LHC; однако нельзя исключить достоверности QGSJet II и SIBYLL-2.1.

На рис. 6 показаны дифференциальные энергетические спектры, измеренные современными установками ШАЛ. Кружками и квадратами (ливни, отобранные триггером-500 и триггером-1000 соответственно) обозначены данные Якутской установки: черные символы относятся к оценке первичной энергии с помощью соотношений (7) и (8); светлые значки — результат пересмотренного калориметрического метода (28), серые значки — реконструкция по  $\rho_s(600)$  (20). Серые треугольники — спектр, полученный в обсерватории им. Пьера Ожэ (Abreu et al., 2011), черные треугольники — данные наземных детекторов установки Telescope Array (Tsunesada et al., 2011).

Независимые способы оценки  $E_0$  — по ФПР сигналов НСД (20) и с помощью калориметрического соотношения (28) — дали близкие результаты, которые в пределах (10 – 15)% согласуются с результатами симуляции с помощью кода CORSIKA. При  $E_0 \geq 8 \times 10^{18}$  эВ они не противоречат данным Telescope Array и согласованно указывают на увеличение крутизны спектра в области предельных энергий ( $E_0 \geq 3 \times 10^{19}$  эВ). Это укрупнение не противоречит ГЗК-обрезанию но, возможно, имеет иную астрофизическую природу. Что касается различий в интенсивностях спектров при  $E_0 \leq 8 \times 10^{18}$  эВ, то они имеют другие причины. Вероятно, это результат систематических ошибок в методах реконструкции первичной энергии, применяемых в разных экспериментах.

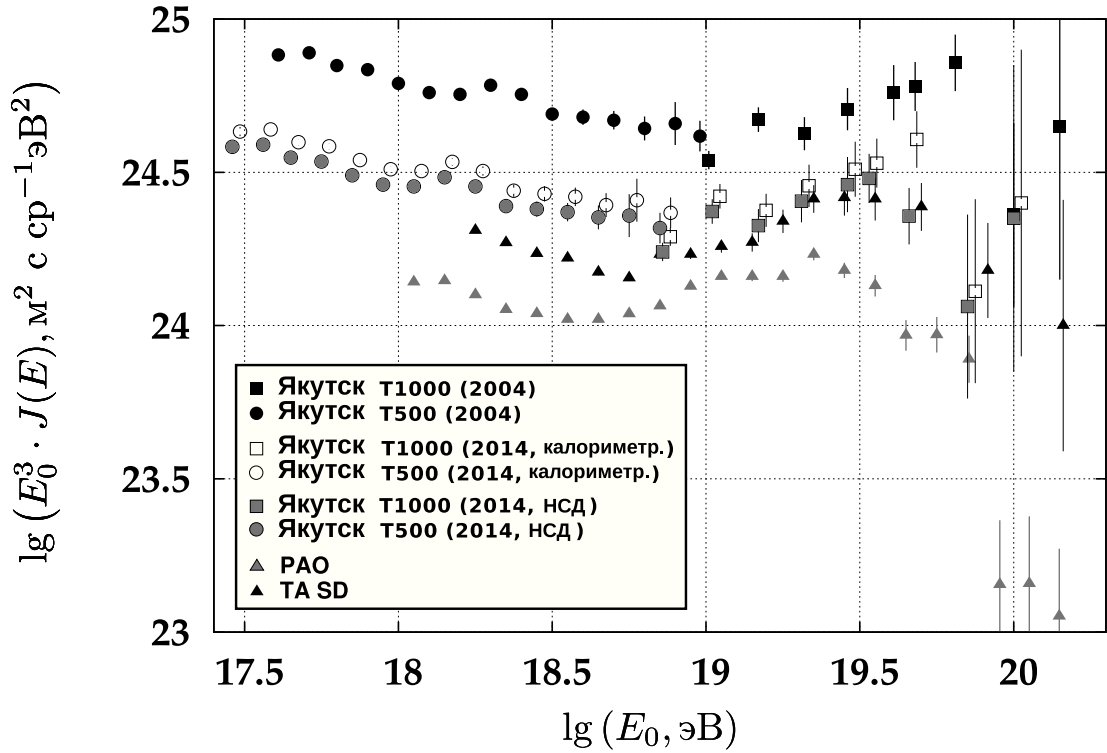


Рис. 6 — Дифференциальные энергетические спектры согласно данным крупнейших мировых установок ШАЛ.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Из ФПР откликов наземных сцинтилляционных детекторов Якутской установки, полученных за период наблюдения 1977-2013 гг., дана оценка массового состава с энергиями  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ в рамках четырех моделей развития ШАЛ. Наилучшее согласие теории и эксперимента наблюдается для моделей QGSJet01 и QGSJet II-04. В области энергий  $(1 - 20) \times 10^{17}$  эВ происходит изменение массового состава от  $\langle \ln A \rangle \simeq 2.5$  к чисто протонному.
2. Из экспериментальной и расчетной ФПР мюонов Якутской установки с порогом выше  $1 \times \sec \theta$  ГэВ найдена средняя глубина максимума каскадной кривой в диапазоне энергий  $10^{17} - 10^{19.5}$  эВ.
3. Из ФПР откликов наземных сцинтилляционных детекторов Якутской установки, вычисленных с помощью моделей QGSJet01, QGSJet II-04, SIBYLL-2.1 и EPOS-LHC, дана новая оценка первичной энергии ШАЛ:

$$E_0 = (3.40 \pm 0.18) \times 10^{17} \cdot \rho_s(600, 0^\circ)^{1.017} \text{ эВ.}$$

Пересмотренный калориметрический метод дал новую оценку энергии ШАЛ:

$$E_0 = (3.6 \pm 0.3) \times 10^{17} \cdot \rho_s(600,0^\circ)^{1.02 \pm 0.2} \text{ эВ.}$$

Она в 1.41 раза меньше по сравнению с ранее использованным методом калориметрирования.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Оценка массового состава ПКИ в области  $10^{17} - 10^{19}$  эВ на основе многокомпонентного анализа характеристик ШАЛ, зарегистрированных на Якутской комплексной установке / А. А. Иванов, С. П. Кнуренко, А. А. Лагутин и др. // Изв. РАН. сер. физ. — 2007. — Т. 71, № 4. — С. 467–469.
2. The composition of the primary particles at energies  $3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$  eV observed at the Yakutsk array / L. G. Dedenko, G. F. Fedorova, T. M. Roganova et al. // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* — 2012. — Vol. 39, no. 9. — P. 095202.
3. Глушков А. В., Сабуров А. В. Переменный состав космических лучей с  $E_0 \geq 10^{17}$  эВ по данным мюонных детекторов Якутской установки ШАЛ // Письма в ЖЭТФ. — 2013. — Т. 98, № 10. — С. 661–664. — URL: [http://jetpletters.ac.ru/ps/2026/article\\_30537.shtml](http://jetpletters.ac.ru/ps/2026/article_30537.shtml).
4. Кнуренко С. П., Сабуров А. В. Спектр и массовый состав космических лучей в области  $10^{15} - 10^{18}$  эВ по данным Якутской установки // *Изв. РАН. сер. физ.* — 2014. — Т. 78, № 3. — С. 324–326.
5. Глушков А. В., Правдин М. И., Сабуров А. В. Переоценка энергии ШАЛ на Якутской установке с помощью кода CORSIKA // Письма в ЖЭТФ. — 2014. — Т. 99, № 8. — С. 501. — URL: [http://jetpletters.ac.ru/ps/2041/article\\_30754.shtml](http://jetpletters.ac.ru/ps/2041/article_30754.shtml).
6. Глушков А. В., Сабуров А. В. Определение глубины максимума каскадной кривой из мюонной компоненты на Якутской установке ШАЛ // ЖЭТФ. — 2014. — Т. 146, № 5 (11). — С. 968–972. — URL: <http://jetp.ac.ru/cgi-bin/e/index/r/146/5/p968?a=list>.

7. Глушков А. В., Сабуров А. В. Массовый состав космических лучей с энергией  $E_0 \geq 10^{17}$  эВ по данным наземных детекторов Якутской установки ШАЛ // Письма в ЖЭТФ. — 2014. — Т. 100, № 11. — С. 793–796. — URL: [http://jetpletters.ac.ru/ps/2061/article\\_31014.shtml](http://jetpletters.ac.ru/ps/2061/article_31014.shtml).
8. Glushkov A. V., Pravdin M. I., Sabourov A. Revision of the energy calibration of the Yakutsk extensive air shower array // *Phys. Rev. D*. — 2014. — Jul. — Vol. 90, no. 1. — P. 012005.
9. Глушков А. В., Сабуров А. В. Определение глубины максимума каскадной кривой из мюонной компоненты на Якутской установке ШАЛ // *Изв. РАН сер. физ.* — 2015. — Т. 79, № 3. — С. 365.
10. Глушков А. В., Сабуров А. В. Массовый состав космических лучей с энергией  $E_0 \geq 10^{17}$  эВ по данным наземных детекторов Якутской установки ШАЛ // *Изв. РАН сер. физ.* — 2015. — Т. 79, № 3. — С. 368.
11. Knurenko S. P., Sabourov A. [Spectrum and mass composition of cosmic rays in the energy range  \$10^{15} - 10^{18}\$  eV derived from the Yakutsk array data](#). — 2011. — arXiv : astro-ph.HE/1112.2430. Proc. of the 32nd ICRC, Beijing, China.
12. The energy spectrum of cosmic rays at the highest energies / B. R. Dawson, I. C. Maris, M. Roth et al. // *EPJ Web of Conferences*. — 2013. — Vol. 53. — P. 01005. — Proc. of the UHECR 2012 — Int. Symp. Future Direct. UHECR Phys.
13. Air shower simulation and hadronic interactions / J. Allen, A. Castellina, R. Engel et al. // *EPJ Web of Conf.* — 2013. — Vol. 53. — P. 01007. — Proc. of the UHECR 2012 — Int. Symp. on Future Direct. UHECR Phys.



Подписано в печать 21.12.17. Формат 60x84/16. Гарнитура «Таймс».  
Печ.л. 1,5. Уч.-изд.л. 1,87. Тираж 100 экз. Заказ № 221.

Издательский дом Северо-Восточного федерального университета,  
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5  
Отпечатано в типографии Издательского дома СВФУ