

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д. В. Скобельцына

На правах рукописи

Калмыков Валерий Николаевич

МАССОВЫЙ СОСТАВ ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В
РАЙОНЕ ИЗЛОМА ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ ШАЛ МГУ

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

*диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук*

Москва

2007

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Калмыков Николай Николаевич
доктор физико-математических наук,
профессор, НИИЯФ МГУ

Официальные оппоненты:

Роганова Татьяна Михайловна
доктор физико-математических наук,
НИИЯФ МГУ

Птускин Владимир Соломонович
доктор физико-математических наук,
ИЗМИРАН

Ведущая организация:

Институт ядерных исследований РАН,
г. Москва

Защита диссертации состоится « 25 » октября 2007г. в 15 час. на заседании диссертационного совета К 501.001.03 в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19-й корпус, аудитория 2-15.

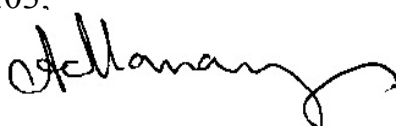
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 21 » сентября 2007г.

Учёный секретарь

диссертационного совета К 501.001.03.

кандидат физ.-мат. наук



А. К. Манагадзе

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Определение массового состава первичных космических лучей (ПКЛ) и их энергетического спектра относится к фундаментальным проблемам физики космических лучей. Знание вида энергетического спектра и зависимости массового состава от энергии является очень важным для теории происхождения космических лучей и их распространения в космическом пространстве. Весьма интересным в этом плане является диапазон энергий $10^{15} \div 10^{17}$ эВ, включающий область излома энергетического спектра космических лучей, который был впервые обнаружен в 1958г. и впоследствии подтверждён практически всеми научными группами, работающими в этом диапазоне энергий. Однако до сих пор существует неоднозначность толкования природы излома. Одной из важнейших характеристик первичных космических лучей, знание которой способно пролить свет на природу излома, является массовый состав ПКЛ в этой области энергий. До настоящего времени с помощью прямых методов (измерения на спутниках, “баллонные” эксперименты и др.) удалось измерить массовый состав ПКЛ до энергий в несколько единиц на 10^{14} эВ/нуклон. Будущие баллонные эксперименты и проектируемые новые спутниковые установки предполагают за несколько лет эксплуатации расширить эту область до 10^{15} эВ. Таким образом, массовый состав ПКЛ в области излома в энергетическом спектре космических лучей и, тем более, в области более высоких энергий доступен в настоящее время для исследования только методами, связанными с изучением широких атмосферных ливней (ШАЛ), и, по-видимому, эти методы будут оставаться единственно возможными в течение обозримого будущего.

В настоящее время экспериментальные данные по массовому составу, полученные различными группами с использованием установок, регистрирующих ШАЛ, далеки от согласия. По этой причине интерес к изучению состава не снижается. Свидетельством тому является возрастающее количество публикаций на эту тему, создание новых и модернизация старых

установок.

Данные установки ШАЛ МГУ, эксплуатация которой была закончена в 1990 г., остаются актуальными и сегодня благодаря ряду её преимуществ. Во-первых, регистрация ШАЛ осуществлялась с помощью счётчиков Гейгера-Мюллера, не имеющих переходного эффекта. Во-вторых, благодаря наличию 4-х подземных детекторов мюонов с пороговой энергией 10 ГэВ имела возможность построения функций пространственного распределения (ФПР) мюонов в индивидуальных ливнях. И, наконец, статистика ливней при энергии около 10^{17} эВ, зарегистрированных установкой ШАЛ МГУ, до настоящего времени не превзойдена.

В представленной диссертации проведено исследование параметров мюонной компоненты ШАЛ и характеристик потока ПКЛ при энергии $10^{15} \div 10^{17}$ эВ.

Цель работы

Провести совместный анализ спектров ШАЛ по числу мюонов и заряженных частиц, а также функций пространственного распределения мюонов в рамках модели взаимодействия адронов QGSJET и восстановить массовый состав ПКЛ в диапазоне первичных энергий $10^{15} \div 10^{17}$ эВ.

Научная новизна работы

На основании экспериментальных данных установки ШАЛ МГУ по спектрам ШАЛ по числу мюонов и заряженных частиц определён массовый состав ПКЛ в диапазоне первичных энергий $10^{15} \div 10^{17}$ эВ. В результате удалось количественно оценить величину излома в парциальных энергетических спектрах ядер по данным установки ШАЛ МГУ, которая равна $\Delta\gamma = 1.0 \pm 0.1$.

На основе полученного экспериментального материала с использованием четырёх мюонных детекторов впервые построены ФПР мюонов с энергией ≥ 10 ГэВ в индивидуальных ливнях. Проведены расчёты ФПР мюонов с энергией ≥ 10 ГэВ с помощью пакета программ CORSIKA в рамках модели

взаимодействия адронов QGSJET и проанализированы экспериментальные ФПР установки ШАЛ МГУ. По результатам анализа восстановлен массовый состав ПКЛ.

Научная и практическая значимость работы

Данные установки ШАЛ МГУ по мюонной компоненте с энергией более 10 ГэВ являются уникальными. Поскольку зависимость числа таких мюонов от первичной энергии отличается от зависимости, характерной для мюонов с энергиями ≤ 1 ГэВ, изучаемых на большинстве других установок, анализ данных установки ШАЛ МГУ представляет особый интерес.

Диссертация содержит важные результаты об энергетическом спектре и массовом составе ПКЛ при энергиях $10^{15} \div 10^{17}$ эВ, которые существенны как для астрофизики, так и для физики высоких энергий. Данные об изменении массового состава в исследуемом диапазоне энергий позволяют ограничить круг рассматриваемых моделей распространения ПКЛ в Галактике и с большей определённой выбрать модель адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании установок нового поколения, предназначенных для исследования ПКЛ при больших энергиях.

На защиту выносятся:

1. Количественная оценка изменения показателя парциальных энергетических спектров ПКЛ в области излома по данным установки ШАЛ МГУ.
2. Результаты восстановления массового состава ПКЛ по данным установки ШАЛ МГУ в области первичных энергий $10^{15} \div 10^{17}$ эВ.
3. ФПР мюонов с энергией ≥ 10 ГэВ в индивидуальных ливнях с числом частиц $N_e \geq 3 \cdot 10^7$, полученные с использованием данных от 4-х мюонных детекторов, и уточнённая зависимость плотности мюонов от числа заряженных частиц на расстоянии 50 м от оси ливня.

4. Рассчитанные спектры ШАЛ по числу заряженных частиц и мюонов, а также первичный энергетический спектр космических лучей, полученные в рамках модели адронных взаимодействий QGSJET.

Вклад автора

При определяющем участии автора была произведена обработка экспериментальных данных установки ШАЛ МГУ с использованием 4-х мюонных детекторов, для чего была модернизирована программа обработки информации о мюонной компоненте ШАЛ. Восстановление энергетического спектра и массового состава ПКЛ по экспериментальным спектрам по числу заряженных частиц и мюонов, а также по средним ФПР мюонов, осуществлено автором при помощи разработанных им программ и алгоритмов. Автором выполнены расчёты средних ФПР мюонов с энергией ≥ 10 ГэВ с помощью пакета программ CORSIKA в диапазоне первичных энергий $10^{14} \div 10^{18}$ эВ в рамках модели QGSJET, и проведен их анализ. Существенная часть публикаций по теме диссертации подготовлена и написана автором.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на Международной конференции по космическим лучам (Tsukuba, 2003 г.), на Всероссийской конференции по космическим лучам (Москва, 2004 г.), на Ломоносовских чтениях (2004, 2005 гг.), на Баксанской школе молодых учёных (2003 г.).

Публикации

Основные результаты работы изложены в 7-ми публикациях, список которых приведён в конце автореферата.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 165 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность исследования массового состава ПКЛ. Формулируется цель работы, её новизна и выносимые на защиту положения.

В первой главе кратко излагаются современные модели образования излома в энергетическом спектре ПКЛ при первичной энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Их можно разделить на две категории. В одной из них излом трактуется как следствие изменения характеристик элементарного акта взаимодействия адронов или рассматривается гипотетическая возможность существования новых взаимодействий, так называемой «новой физики». Однако детально такие модели в полной мере не разработаны.

Большинство исследователей придерживается точки зрения, что возникновение излома имеет астрофизическую природу, то есть состоит в наличии соответствующей нерегулярности в энергетическом спектре первичных космических лучей.

Наиболее вероятно, что космические лучи (КЛ) сверхвысоких энергий в Галактике образуются во взрывах сверхновых, ускоряясь на фронтах ударных волн [1,2]. Повысить максимальную энергию частиц КЛ до энергии излома в этой модели можно, если учесть возникновение магнито-гидродинамической турбулентности перед фронтом ударной волны за счёт потоковой неустойчивости ускоряемых частиц [3,4]. После достижения максимальной энергии спектр частиц резко обрывается. Но, поскольку параметры сверхновых различаются, то за счёт этого излом может быть не таким резким. Спектр в источниках до излома $\sim E_0^{-2}$, что противоречит наблюдаемому спектру у Земли ($\sim E_0^{-2.7}$), и для устранения противоречия требуется предполагать слишком сильную зависимость коэффициента диффузии от энергии ($\sim E_0^{0.7}$).

В рамках современной диффузионной модели распространения КЛ в Галактике, развитой в работах В.С. Птускина и других [5], можно получить величину излома в парциальных спектрах различных групп ядер ≤ 0.8 . Сам

механизм его образования объясняется изменением условий распространения КЛ в Галактике: до излома доминирующую роль играет коэффициент перпендикулярной диффузии $D_{\perp} \sim E_0^m$, где $m = 0.2 \div 0.3$, а за изломом определяющим становится коэффициент холловской диффузии $D_A \sim E_0$.

Особенностью, связывающей астрофизические модели, является пропорциональность критической энергии излома в парциальных энергетических спектрах заряду частицы, что естественным образом должно приводить к изменениям в массовом составе ПКЛ в сторону его утяжеления. Результаты изучения массового состава в различных экспериментах подтверждают предположение об утяжелении состава за изломом, но демонстрируют большое расхождение (рис.1). Этот факт подчёркивает необходимость продолжения исследований в данном направлении как с помощью «прямых» методов изучения ПКЛ, так и на установках по регистрации ШАЛ.

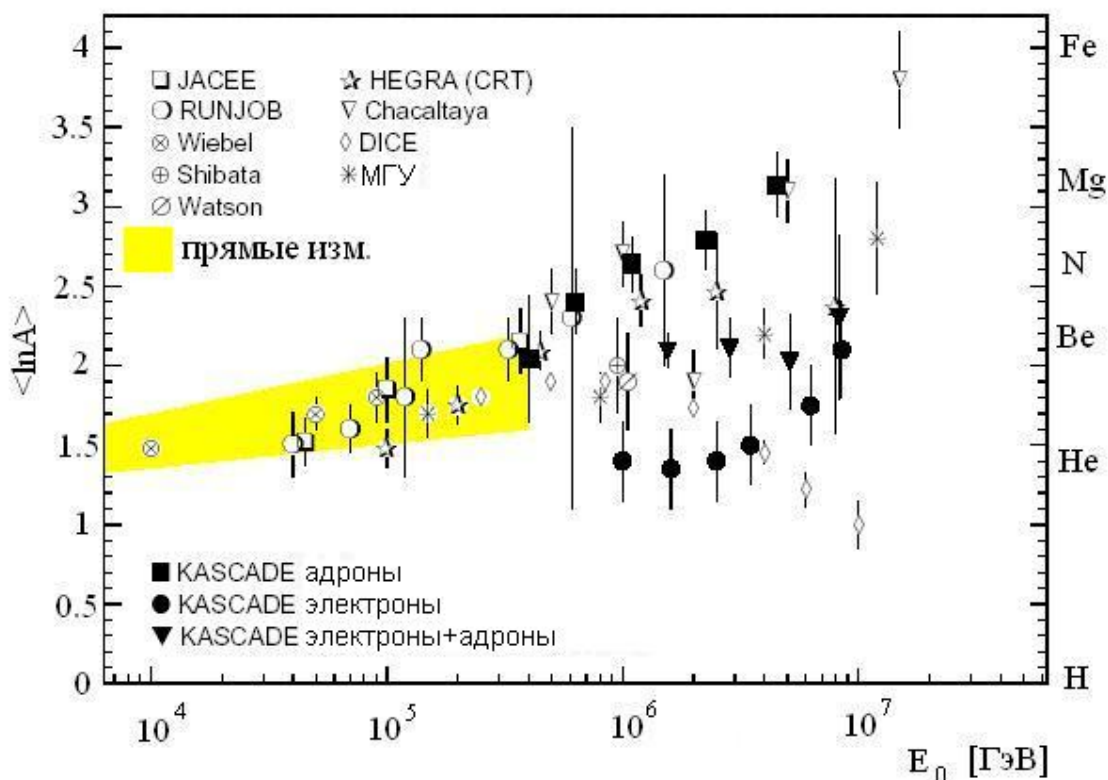


Рис. 1. Результаты изучения массового состава ПКЛ в различных экспериментах.

Кроме того, в главе 1 описаны некоторые установки для регистрации ШАЛ и полученные на них результаты. Данные различных установок о величине излома в парциальных спектрах $\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$ существенно разнятся. Например, установка KASCADE даёт величину излома в парциальных спектрах $\Delta\gamma \sim 2$ [6]. А по данным установки Гамма ($E_\mu \geq 5$ ГэВ), входящей в экспериментальный комплекс ANI, размещённый на горе Арагац (3200 м. над уровнем моря), она не превышает ~ 0.4 [7]. Излом в парциальных спектрах, полученных в эксперименте МАКЕТ того же комплекса ANI, оказался ~ 0.9 [8].

Во второй главе рассмотрена установка ШАЛ МГУ и полученные на ней данные. Излагаются методика и алгоритмы восстановления параметров электронно-фотонной и мюонной компонент ШАЛ.

Установка ШАЛ МГУ создавалась для комплексного исследования широких атмосферных ливней от первичных частиц с энергией 10^{15} - $5 \cdot 10^{17}$ эВ. Данные установки ШАЛ МГУ, эксплуатация которой была закончена в 1990 г., остаются актуальными и сегодня благодаря ряду её преимуществ, отмеченных выше. Кроме того, экспериментальный материал установки ШАЛ МГУ по мюонной компоненте с энергией более 10 ГэВ является уникальным. Поскольку зависимость числа таких мюонов от первичной энергии отличается от зависимости, характерной для мюонов с энергиями ≤ 1 ГэВ, изучаемых на большинстве других установок, анализ данных установки ШАЛ МГУ представляет особый интерес.

В третьей главе описаны модели взаимодействия адронов сверхвысоких энергий и подробно рассмотрена кварк-глюонная картина взаимодействия адронов сверхвысоких энергий согласно модели QGSJET [9].

В настоящее время для моделирования ШАЛ при сверхвысоких энергиях используются различные феноменологические модели, основанные на кварк-глюонной картине адронных взаимодействий. За последние несколько лет предсказания этих моделей значительно сблизились, однако полностью расхождения не устранены. Возможно, что более полный учёт результатов многокомпонентного анализа ШАЛ, а также данных с коллайдера RHIC могли

бы улучшить достигнутую степень согласия. Современные версии выше указанных моделей не позволяют получить, согласованный состав ПКЛ по разным характеристикам ШАЛ. Таким образом, восстанавливаемый массовый состав оказывается чувствительным к выбору модели.

Аргументом в пользу выбора модели QGSJET как основного инструмента исследования являются результаты анализа, проведенного в работе [10]. В ней были сопоставлены данные по изучению массового состава в рамках разных моделей, выполненные двумя способами: с помощью измерения глубины максимума ШАЛ в атмосфере и по отношению числа мюонов в ливне к числу заряженных частиц. Такой же вывод следует и из данных эксперимента «Памир» по изучению гамма-семейств [11], где было установлено, что при энергии 10^{16} эВ доля лёгких ядер в составе ПКЛ должна составлять 30%, что получается в рамках модели QGSJET, но не получается, например, в рамках модели SIBYLL, где эта доля существенно меньше. Между тем практически невозможно получить экспериментальную интенсивность семейств, не предполагая значительной доли лёгких ядер в составе ПКЛ. Отметим также результаты изучения распределения ШАЛ по глубине максимума каскадной кривой [12], свидетельствующие в пользу модели QGSJET и противоречащие моделям, предсказывающим (аналогично модели SIBYLL) большую глубину максимума.

В четвёртой главе приведены полученные ранее результаты исследования массового состава по данным установки ШАЛ МГУ в диапазоне энергий $10^{15} \div 10^{17}$ эВ. Подробно изложена методика изучения массового состава, применявшаяся автором: совместный анализ спектров ШАЛ по числу заряженных частиц и мюонов, а также средних ФПР мюонов в широком диапазоне по числу заряженных частиц $10^5 \div 10^8$. Для расчётов использовался состав из пяти групп первичных ядер: p — протоны, α -частицы, C-N-O-группа (M), группа Si-P-S (H) и железо (VH).

Спектр по числу заряженных частиц или мюонов можно представить как количество ливней с числом частиц в интервале от N_{\min} до N_{\max} , который

учитывает вклад P_i от пяти групп первичных ядер:

$$J = \sum_{i=1}^5 P_i \int_{-\infty}^{+\infty} I_i(E_0, Z) dE_0 \int_{N_{\min}}^{N_{\max}} W_i(N(E_0, A_i)) dN,$$

где P_i – доля ядер i -той группы при энергии 10^{15} эВ, $I_i(E_0, Z)$ – парциальный энергетический спектр ядер i -той группы с зарядом Z , $W_i(N(E_0, A_i))$ – распределение плотности вероятности образования ливня с числом частиц в интервале от N_{\min} до N_{\max} первичной частицей с энергией E_0 и массовым числом A_i . Эта функция получена в результате расчёта методом Монте-Карло для 5-ти групп первичных ядер в рамках модели QGSJET и в первом приближении близка к распределению Гаусса в логарифмическом масштабе. В ней учтены полные флуктуации числа частиц в ливне: флуктуации в развитии ливня и флуктуации числа частиц, попавших в детектор (пуассоновы флуктуации). Функция, описывающая парциальный энергетический спектр частиц i -й группы в области излома, задавалась соотношением:

$$I(E_0, Z) = \begin{cases} \exp(-(\gamma_1 - 1)x) & x < x_{кр} \\ \exp(-(\gamma_1 - 1)x_{кр} - (\gamma_2 - 1)(x - x_{кр})) & x \geq x_{кр} \end{cases},$$

где $x = \ln E_0$, $x_{кр} = \ln E_{кр}$, $E_{кр} = 3 \cdot 10^{15} \cdot Z$ эВ, γ_1 и γ_2 показатели спектра до и после излома. Показатель γ_1 принимался равным 2.7.

Величины $\Delta\gamma$ и коэффициентов P_i определялись методом минимизации величины χ^2 . Эта процедура осуществлялась следующим образом. Перебирались все возможные массовые составы (коэффициенты P_i) с шагом 0.01, а значение излома $\Delta\gamma$ с шагом 0.05. Если вероятность согласия для данного набора параметров превышала 5%, то он принимался как возможный. Окончательно коэффициенты P_i и $\Delta\gamma$ определялись усреднением по принятым значениям. Проведенный анализ показал, что наилучшим образом спектры воспроизводятся при $\Delta\gamma = 1.0 \pm 0.1$ ($\gamma_1 \approx 2.7$, $\gamma_2 \approx 3.7$). На рисунке 2 приведен график зависимости $\chi^2(\Delta\gamma)$, полученный при оптимизации по P_i .

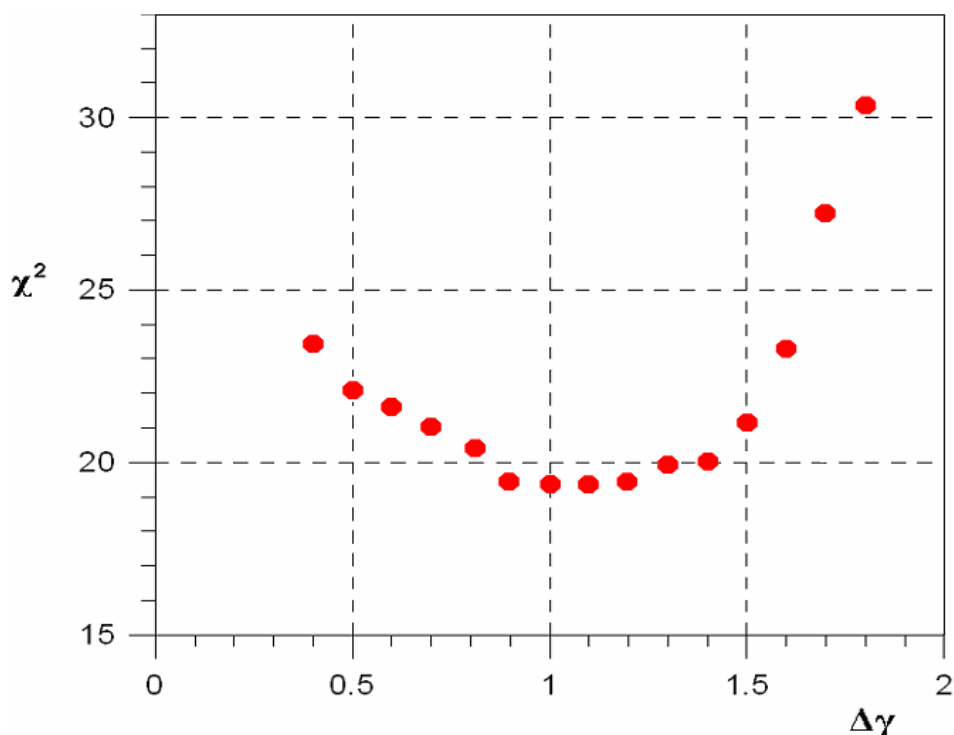


Рис. 2. Зависимость χ^2 от величины излома в парциальных энергетических спектрах.

В результате совместного анализа спектров ШАЛ были получены количественные оценки массового состава ПКЛ в диапазоне первичных энергий $10^{15} \div 10^{17}$ эВ (см. таблицу) и определена зависимость средней величины натурального логарифма массового числа первичной частицы от энергии (рис. 3). На рисунке также показаны данные установок Тунка и KASCADE.

Таблица. Массовый состав ПКЛ, полученный в настоящей работе.

E_0 [эВ]	p	α	M	H	VH
10^{15}	0.245 ± 0.040	0.285 ± 0.070	0.169 ± 0.090	0.224 ± 0.110	0.077 ± 0.050
10^{16}	0.099 ± 0.040	0.232 ± 0.060	0.242 ± 0.080	0.318 ± 0.120	0.109 ± 0.070
10^{17}	0.033 ± 0.020	0.079 ± 0.040	0.162 ± 0.090	0.457 ± 0.110	0.269 ± 0.080

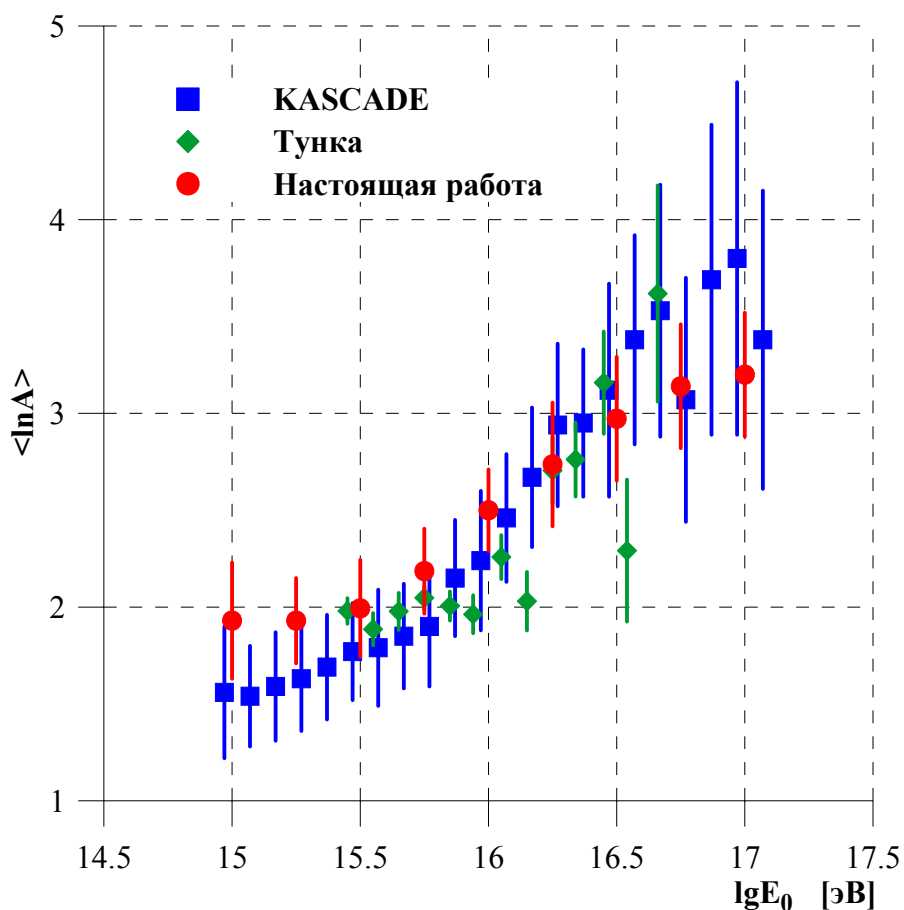


Рис. 3. Зависимость среднего логарифма массового числа от первичной энергии.

На рисунке 4 изображён спектр ШАЛ по числу мюонов, рассчитанный в настоящей работе, и данные установки ШАЛ МГУ: экспериментальный спектр и пересчёт из спектра ШАЛ по числу заряженных частиц. Была использована зависимость, ранее полученная на установке ШАЛ МГУ:

$$N_{\mu} = 3.24 \cdot 10^3 \cdot (N_e / 10^5)^{0.78}$$

Величина изменения показателя в этом спектре составляет $\Delta\kappa_{\mu} = 0.51 \pm 0.04$. В экспериментальном спектре по числу мюонов нет точек до излома. Это обусловлено тем, что методически корректно на установке (в силу особенностей управляющей системы) можно было изучать ливни с числом мюонов $\geq 10^4$, что соответствует области за изломом.

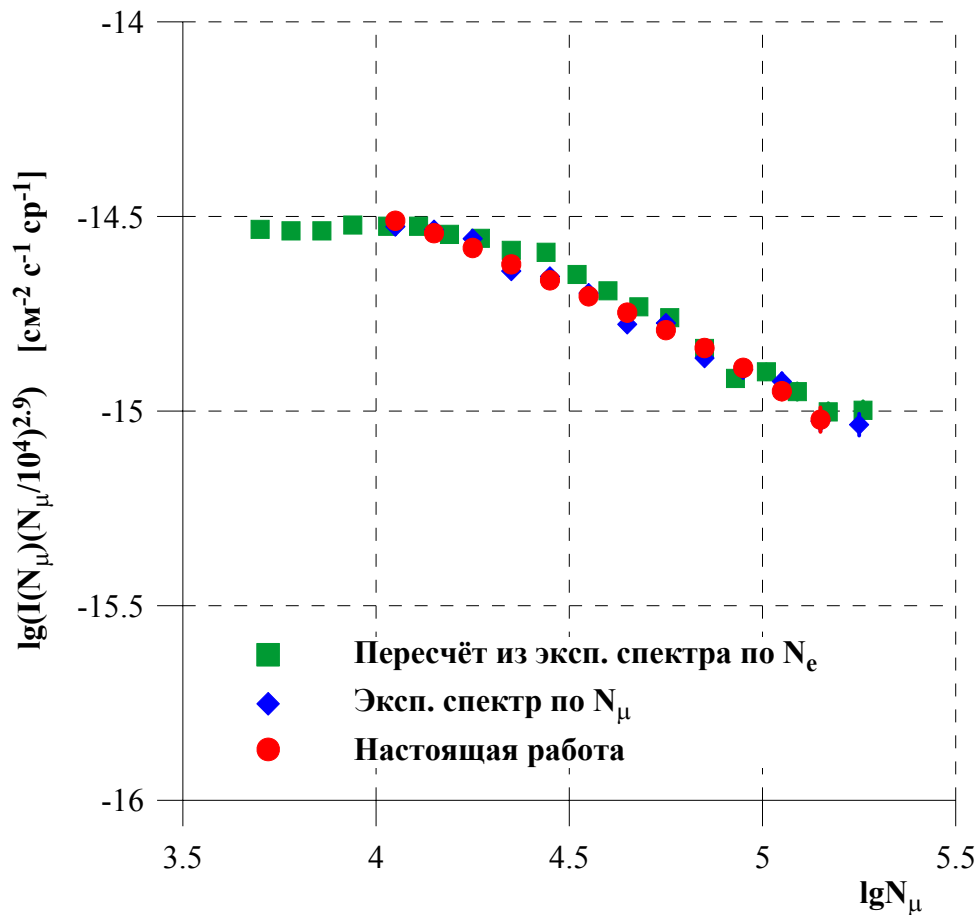


Рис. 4. Дифференциальный спектр ШАЛ по числу мюонов.

Аналогичным образом был построен спектр по числу заряженных частиц. Величина излома в нём почти такая же, как в экспериментальном, $\Delta\kappa_e = 0.522 \pm 0.025$.

Первичный энергетический спектр, рассчитанный в настоящей работе и соответствующий восстановленному составу ПКЛ, показан на рисунке 5. Величина излома в нём равна $\Delta\gamma = 0.47 \pm 0.03$. Там же приведены результаты установок Тунка и KASCADE, а также спектр, полученный ранее пересчётом от спектра по числу заряженных частиц установки ШАЛ МГУ.

Спектр по числу заряженных частиц, полученный на установке KASCADE, хорошо согласуется с данными ШАЛ МГУ. Однако экспериментальный спектр установки KASCADE по N_{μ}^{tr} (N_{μ}^{tr} - полное число мюонов на расстояниях от 40 до 200 м от оси ШАЛ, используемое в эксперименте KASCADE) демонстрирует

слабый излом $\Delta\kappa_{\mu}^{tr} \sim 0.1$, в то время как данные других установок дают большую величину ($\Delta\kappa_{\mu} \sim 0.4 \div 0.5$). Проведенные расчёты показали, что получить столь слабый излом, как на установке KASCADE за счёт увеличения флуктуаций при уменьшении первичной энергии вряд ли возможно.

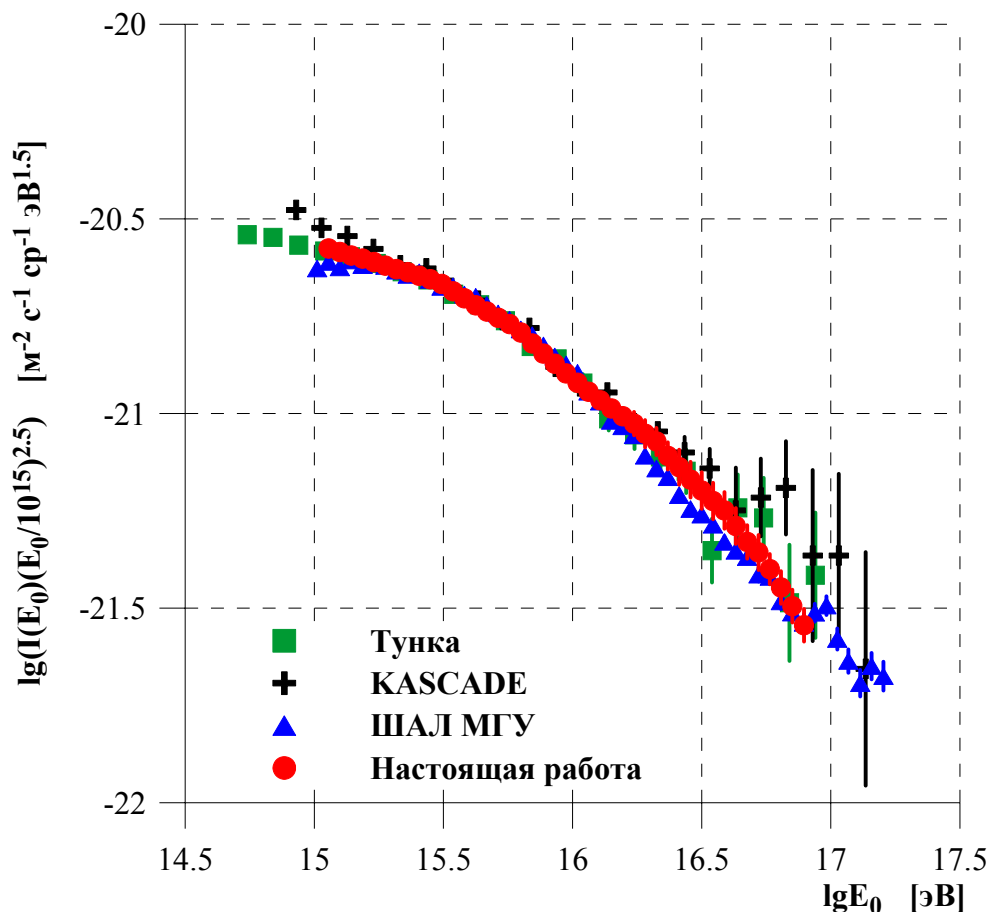


Рис. 5. Дифференциальный энергетический спектр ПКЛ.

Обработка данных от трёх периферийных мюонных детекторов впервые позволила получить ФПР мюонов с энергией ≥ 10 ГэВ в индивидуальных ливнях (с числом заряженных частиц $N_e \geq 3 \cdot 10^7$). Новые данные дали возможность уточнить вид средних ФПР мюонов на расстояниях порядка 300 метров от оси ШАЛ и построить зависимость средней плотности числа мюонов от числа заряженных частиц на расстоянии 50 метров от оси ливня, которая также подтверждает тенденцию к утяжелению состава.

На следующем этапе работы был осуществлён анализ средних ФПР мюонов с целью количественной оценки массового состава ПКЛ в области излома. При проведении анализа экспериментальные ФПР мюонов сравнивались с расчётными. Для моделирования ШАЛ был использован пакет программ CORSIKA и выполнены расчёты в рамках модели QGSJET. Всего было разыграно $3 \cdot 10^5$ ливней в диапазоне энергий $10^{14} \div 10^{18}$ эВ от пяти групп первичных ядер. Полученные средние ФПР мюонов (рис.6) демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными (в пределах ошибок).

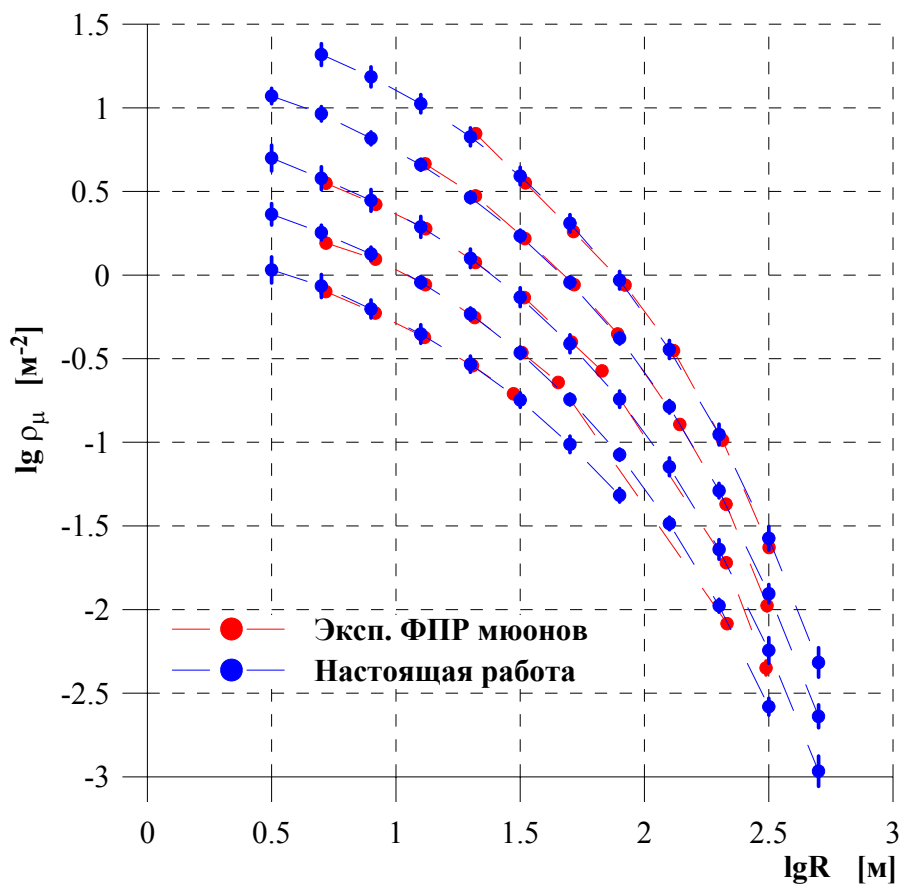


Рис. 6. Средние ФПР мюонов, где $\lg N_e = 5.4-5.6, 5.8-6.0, 6.2-6.4, 6.6-6.8, 7.0-7.2$.

Сделана оценка массового состава ПКЛ в области излома. Расчёты показали, что утяжеление состава также наблюдается. До излома доля легких ядер ($p + \alpha$) составляет 0.65 ± 0.04 , тяжелых ($H + VH$) — 0.07 ± 0.02 . За изломом, при энергии 10^{17} эВ, доля ($p + \alpha$) уменьшается до 0.18 ± 0.05 , а сумма ($H + VH$) возрастает до 0.63 ± 0.03 .

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Впервые по экспериментальным спектрам по числу мюонов и заряженных частиц установки ШАЛ МГУ определена величина изменения показателя в парциальных энергетических спектрах частиц ПКЛ в области излома, равная $\Delta\gamma=1.0\pm 0.1$.
2. Впервые по данным о спектрах ШАЛ по числу заряженных частиц и мюонов установки ШАЛ МГУ восстановлен массовый состав ПКЛ в диапазоне первичных энергий $10^{15}\div 10^{17}$ эВ для отдельных групп ядер. Получено, что с ростом энергии частиц происходит утяжеление массового состава: доля лёгких ядер ($p + \alpha$) уменьшается примерно от 55% до 11%, тогда как доля тяжёлых ядер ($H + VH$) увеличивается от 30% до 70%.
3. Проведена обработка экспериментальных данных по мюонной компоненте ШАЛ с энергией ≥ 10 ГэВ. Новые данные, полученные с использованием 4-х мюонных детекторов, дали возможность впервые получить ФПР мюонов в индивидуальных ливнях с числом частиц $N_e \geq 3 \cdot 10^7$, а также уточнить вид средних ФПР на расстоянии ~ 300 м от оси ШАЛ и вид зависимости плотности числа мюонов в ливне от расстояния до оси ШАЛ $\rho_\mu(R)$ для различных значений числа заряженных частиц в ливне.
4. Осуществлено восстановление массового состава ПКЛ по экспериментальным средним ФПР мюонов и подтверждён вывод об утяжелении состава в диапазоне первичных энергий $10^{15}\div 10^{17}$ эВ.

По материалам диссертации опубликованы 7 работ:

1. Вишневецкая Е. А., Калмыков В. Н., Калмыков Н. Н., Куликов Г. В., Просин В. В., Соловьева В. И., Сулаков В. П., Фомин Ю. А. Энергетический спектр космических лучей из анализа электронной, мюонной и черенковской компонент широких атмосферных ливней. // Изв. РАН Сер. физ. 2002, т. 66, 11, с. 1566.

2. Вишневецкая Е. А., Ильина Н. П., Калмыков В. Н., Куликов Г. В., Сулаков В. П. Определение массового состава первичного космического излучения и спектр широких атмосферных ливней по числу мюонов. // Изв. РАН Сер. физ. 2003, т. 67, 4, с. 435.
3. Fomin Yu. A., Kalmykov N. N., Kalmykov V. N., Kulikov G. V., Solovjeva V. I., Sulakov V. P., Vishnevskaya E. A. Energy spectrum of cosmic rays in the knee region and studies of different components of extensive air showers. // Proc. 28 th ICRC Tsukuba 2003, v. 1, p. 119.
4. Калмыков В. Н. Анализ спектра широких атмосферных ливней по числу мюонов с использованием кварк-глюонной модели адронных взаимодействий. // Труды 4-й БМШ ЭТФ, 2003, с. 142.
5. Вишневецкая Е. А., Калмыков В. Н., Калмыков Н. Н., Куликов Г. В., Сулаков В. П. Восстановление энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей по спектрам широких атмосферных ливней по числу электронов и мюонов. // Вестник МГУ Сер. физика и астрономия 2004, № 1, с. 28.
6. Калмыков Н. Н., Куликов Г. В., Соловьева В. И., Сулаков В. П., Фомин Ю. А., Калмыков В. Н. Характеристики мюонной компоненты по данным установки ШАЛ МГУ. // Изв. РАН Сер. физ. 2004, т. 68, 11, с. 1608.
7. Калмыков Н. Н., Куликов Г. В., Сулаков В. П., Калмыков В. Н. Результаты анализа данных о мюонной компоненте ШАЛ по наблюдениям на установке ШАЛ МГУ. // Вестник МГУ Сер. физика и астрономия 2006, № 6, с. 29.

Ссылки на литературу:

1. Крымский Г. Ф. Механизм регулярного ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны. // ДАН СССР 1977, т. 234, с. 1306.
2. Bell A. R. The acceleration of cosmic rays in shock fronts. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 1978, v. 182, p. 147 and 443.
3. Bell A. R., Lucek S. G. Cosmic ray acceleration to very high energy through the

- non-linear amplification by cosmic rays of the seed magnetic field. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2001, v. 321, p. 433.
4. Ptuskin V. S., Zirakashvili V. N. On the spectrum of high-energy cosmic rays produced by supernova remnants in the presence of strong cosmic-ray streaming instability and wave dissipation. // Astron. Astrophys. 2005, v. 429, p. 755.
 5. Ptuskin V. S., Rogovaya S. I., Zirakashvili V. N. et al. Diffusion and drift of very high energy cosmic rays in galactic magnetic fields. // Astron. Astrophys. 1993, v. 268, p. 726.
 6. Antoni T., Apel W. D., Badea A. F. et al. KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: results and open problem. // Astropart. Phys. 2005, v. 24, p. 1.
 7. Ter-Antonyan S. V., Martirosov R. M., Garyaka A. P., et. al. Primary energy spectra and elemental composition. GAMMA experiment. // arXiv: astro-ph/0506588.
 8. Chilingarian A., Gharagozyan G., Ghazaryan S., et. al. Study of extensive air showers and primary energy spectra by MAKET-ANI detector on mountain Aragats. // Astropart. Phys. 2007, v. 28, p. 58.
 9. Kalmykov N. N., Ostapchenko S. S., Pavlov A. I. Quark-gluon-string model and EAS simulation problems at ultra-high energies. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 1997, 52B, p. 17.
 10. Erlykin A. D., Wolfendale A. W. On the problem of determining the mass composition of cosmic rays derived from air shower measurements. // Astropart. Phys. 1998, v. 9, p. 213.
 11. Puchkov V. S., Borisov A. S., Guseva Z. M., et. al. Mass composition of primary cosmic rays at energies of 1-1000 PeV according to data of experiment "Pamir". // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 2006, v. 151, p.236-239.
 12. Просин В. В. Энергетический спектр и массовый состав космических лучей в диапазоне энергий $10^{15} \div 10^{17}$ эВ по данным установок для регистрации черенковского света от широких атмосферных ливней. // Диссертация на соискание ученой степени док. физ.-мат. наук, Москва, 2006, НИИЯФ МГУ.

Подписано в печать 19.09.2007.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ № Т-471

Отпечатано в типографии «КДУ»
Тел./факс: (495) 939-40-36
E-mail: press@kdu.ru