

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 71, ВЫПУСК 3
10 ФЕВРАЛЯ, 2000

Письма в ЖЭТФ, том 71, вып.3, стр.145 - 151

© 2000г. 10 февраля

МЮОНЫ В ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЯХ С

$$E_0 = 10^{16.6} - 10^{19.8} \text{ эВ}$$

А.В.Глушков, И.Т.Макаров, М.И.Правдин, И.Е.Слепцов, В.Р.Слепцова,
Н.Н.Калмыков*

Институт космофизических исследований и аэронауки Якутского научного центра СО РАН
677891 Якутск, Россия

* Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия

Поступила в редакцию 22 декабря 1999 г.

Приведены результаты совместного анализа данных Якутской установки и установки Акено по мюонам (порог $E_\mu \approx 1.0 \cdot \sec\theta$ ГэВ) в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) с энергиями $E_0 \geq 4 \cdot 10^{16}$ эВ. Дано их сравнение с расчетами по модели QGSJET. Показано, что при $E_0 \leq 10^{18}$ эВ эта модель не противоречит измерениям обеих установок в предположении меняющегося состава первичных частиц от смеси с преобладанием тяжелых ядер над протонами. При $E_0 \geq 3 \cdot 10^{18}$ эВ эксперименты указывают на то, что ливни развиваются иначе, чем предсказывает модель QGSJET.

PACS: 95.85.Ry, 96.40.Pq

1. Введение. Мюоны с энергиями $\sim 0.5 - 1.0$ ГэВ являются очень важной компонентой в широких атмосферных ливнях (ШАЛ), образующихся от космических лучей экстремально высоких энергий. Они слабо поглощаются в атмосфере, чувствительны к характеристикам ядерных взаимодействий в процессе развития ШАЛ, а также к химическому составу первичных космических частиц. Количество и пространственное распределение мюонов указанных энергий позволяют регистрировать их установками с большими расстояниями между детекторами ($\sim 0.5 - 1.5$ км). Например, сиднейская группа на установке SUGAR [1] находила по мюонам с пороговой энергией $E_\mu \approx 0.75 \cdot \sec\theta$ ГэВ основные параметры всех ливней: направление прихода и энергию первичных частиц.

На Якутской установке регистрируются мюоны с энергией $E_\mu \approx 1 \cdot \sec\theta$ ГэВ непрерывно с 1978 г. За это время накоплен большой экспериментальный материал, анализ которого показал [2-9], что ШАЛ с $E_0 \geq (3-5) \cdot 10^{18}$ эВ развиваются существенно иначе, чем в области меньших энергий первичных частиц. Этот вывод пока не подтвержден другими исследователями по разным причинам. Так, упомянутая выше установка SUGAR давно закрыта. На установке Haverah Park в Англии (тоже

уже не работает) мало ливней с энергиями $E_0 \geq 10^{18}$ эВ, в которых имеются показания мюонных детекторов [10]. Достаточно длительный период функционирует установка Акено в Японии, где регистрируются мюоны в ШАЛ с энергиями вплоть до $\sim 10^{20}$ эВ [11].

Ниже мы рассмотрим некоторые результаты по мюонам, полученные на Якутской установке и установке Акено. Экспериментальные данные сопоставляются с проведенными нами расчетами по модели QGSJET [12], которая хорошо воспроизводит большой набор экспериментальных данных в ШАЛ при $E_0 \leq (2 - 4) \cdot 10^{18}$ эВ [9, 13, 14]. Недавнее исследование [15] показало, что эта модель в определенном смысле является наилучшей в области энергий $\sim 10^6$ ГэВ, поскольку приводит к одним и тем же оценкам массового состава космических лучей при исследовании различных характеристик ШАЛ в области излома первичного энергетического спектра.

2. Исследуемые характеристики и обсуждения. Ниже мы будем рассматривать функции пространственного распределения (ФПР) мюонов с порогом $E_\mu \approx 1 \cdot \sec\theta$ ГэВ. Методики их получения на обеих установках изложены в [9, 16]. В работе [9] измеренные на Якутской установке ФПР аппроксимировались функциями

$$\rho_\mu(R) = f_\mu(1 + R/2000)^{-6.5} [\text{м}^{-2}] \quad (1)$$

с известным соотношением Грейзена [17]

$$f_\mu = N_\mu(C_\mu/R_0)r^{-0.75}(1+r)^{0.75-b_\mu}, \quad (2)$$

где $r = R/R_0$ ($R_0 = 280$ м), C_μ – нормировочная константа, N_μ – полное число мюонов на уровне наблюдения, b_μ – параметр, зависящий от энергии ливня E_0 и зенитного угла θ .

На установке Акено используется аппроксимация [16]

$$\rho_\mu(R) = f_\mu(1 + (R/800)^3)^{-0.6}, \quad (3)$$

где f_μ имеет вид (2) с $b_\mu = 3.27 = \text{const}$ во всех ливнях, а параметр R_0 зависит от зенитного угла θ :

$$\lg(R_0) = (0.58 \pm 0.04)(\sec\theta - 1) + (2.39 \pm 0.05). \quad (4)$$

Анализ показал, что соотношение (1) вполне пригодно для описания ФПР в диапазоне 100 – 3000 м и на установке Акено, так как (1) и (3) достаточно близки между собой по форме при надлежащем выборе определяющих их вид параметров b_μ или R_0 . Поэтому для удобства сравнения ФПР мюонов обеих установок мы использовали только аппроксимацию (1), а параметры b_μ для данных Акено нашли методом наименьших квадратов по измеренным плотностям с учетом их ошибок.

На рис.1 точками показаны ФПР мюонов, вычисленные по модели QGSJET от первичных протонов, а кривыми – найденные по этим точкам аппроксимации (1) в ливнях с $E_0 = 3 \cdot 10^{18}$ эВ и $2 \cdot 10^{19}$ эВ. Сплошные кривые соответствуют $\cos\theta = 0.98$, штрих-пунктирные – $\cos\theta = 0.78$ и штриховые – $\cos\theta = 0.58$. Кривыми 1, 2 представлены ФПР в указанных выше ливнях для уровня наблюдения Якутской установки, а кривой 3 – для Акено.

На рис.2 и 3 показаны измеренные ФПР мюонов и их аппроксимации в близких к вертикальному направлению ШАЛ соответственно на Якутской установке и Акено [16–18]. Так как в работе [18] приведены ФПР с пороговой энергией $E_\mu = 0.5$ ГэВ, мы пересчитали их к $E_\mu = 1.0$ ГэВ с помощью спектра Грейзена [19]:

$$F(\geq E_\mu, R) = (51/(50 + E_\mu))(3/(2 + E_\mu))^{\varphi(R)}, \quad (5)$$

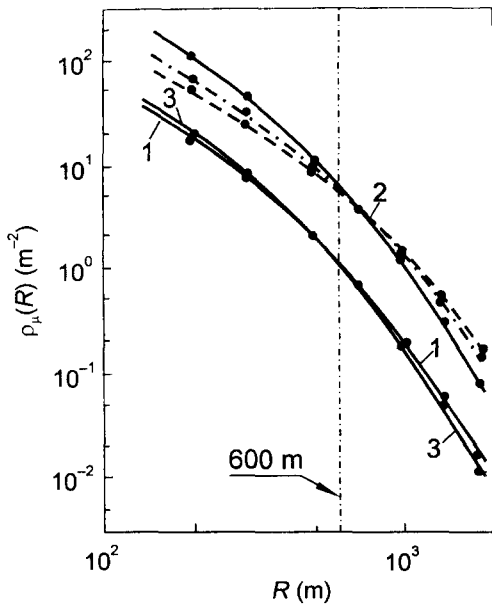


Рис.1. ФПР мюонов с $E_\mu = 1 \cdot \sec\theta$ ГэВ, вычисленные по модели QGSJET от первичных протонов: ● - расчетные плотности, кривые - аппроксимации (1) в ливнях с $E_0 = 3 \cdot 10^{18}$ эВ (1,3) и $2 \cdot 10^{19}$ эВ (2). Сплошные кривые - $\cos\theta = 0.98$, штрих-пунктирные - $\cos\theta = 0.78$ и штриховые - $\cos\theta = 0.58$. Кривые 1 и 2 - Якутская установка, 3 - Акепо

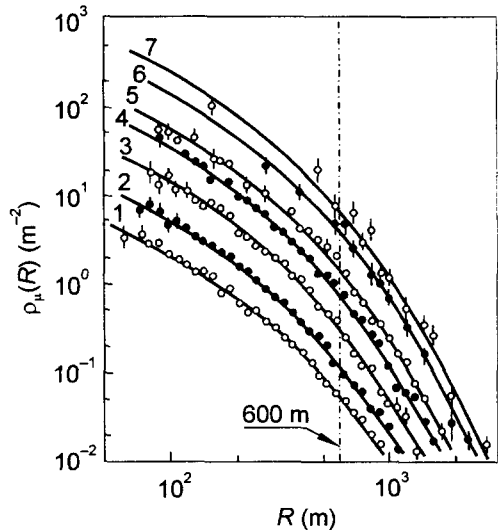


Рис.2. Экспериментально измеренные ФПР мюонов с $E_\mu = 1 \cdot \sec\theta$ ГэВ на Якутской установке в ШАЛ с $(\sec\theta) \approx 1.05$: 1 - $\lg(E_0) = 17.1$; 2 - $\lg(E_0) = 17.5$; 3 - $\lg(E_0) = 17.9$; 4 - $\lg(E_0) = 18.3$; 5 - $\lg(E_0) = 18.7$; 6 - $\lg(E_0) = 19.1$; 7 - $\lg(E_0) = 19.5$. Кривые - аппроксимации (1)

где $\varphi(R) = 0.14 \cdot R^{0.37}$. Это соотношение не противоречит расчетам по модели QGSJET.

Видно, что аппроксимация (1) вполне приемлемо описывает экспериментальные точки на всех расстояниях R от оси ливней, где имеются измерения. О поведении ФПР в целом можно судить по параметру b_μ , который весьма чувствителен к ее малейшим изменениям. Это видно на рис.4, где представлены b_μ в ливнях с $\cos\theta \geq 0.9$ в зависимости от E_0 . Сплошной и штриховой линиями показаны b_μ соответственно для ФПР мюонов Якутской установки и Акепо, рассчитанных по модели QGSJET от первичных протонов. Они удовлетворяют соотношению

$$b_\mu = b_0 + b_1 \cdot (\lg E_0 - 18), \quad (6)$$

где $b_0 = 1.96$ и 2.18 , $b_1 = 0.07$ и 0.1 для Якутска и Акепо, соответственно.

Такое поведение параметра b_μ с физической точки зрения отражает тот факт, что при уменьшении расстояния $X - X_m$ (от максимума развития ливня X_m до уровня наблюдения) X пространственное распределение становится круче, так как мюоны концентрируются все ближе к оси ливня.

Крестиками на рис.4 показаны экспериментальные результаты, полученные на Якутской установке. При $E_0 \leq 10^{18}$ эВ они удовлетворяют (6) с $b_0 = 2.05 \pm 0.02$ и $b_1 = 0.17 \pm 0.03$. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями коэффициента b_1 , характеризующего скорость укрупнения ФПР мюонов с ростом E_0 ,

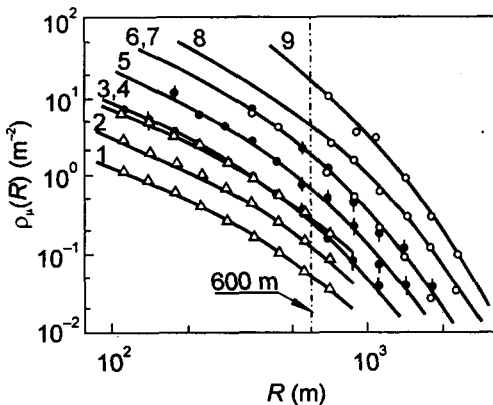


Рис.3. Экспериментально измеренные ФПР мюонов с $E_\mu = 1 \cdot \text{sec}\theta$ ГэВ на установке Акепо (Δ - [16], \bullet - [17], \circ - [18]) в ливнях с $\langle \text{sec}\theta \rangle \approx 1.05$: 1 - $\lg(E_0) = 16.75$, 2 - $\lg(E_0) = 17.25$, 3 - $\lg(E_0) = 17.70$; 4 - $\lg(E_0) = 17.75$, 5 - $\lg(E_0) = 18.25$, 6 - $\lg(E_0) = 18.75$; и $\langle \text{sec}\theta \rangle \approx 1.09$: 7 - $\lg(E_0) = 18.75$, 8 - $\lg(E_0) = 19.25$, 9 - $\lg(E_0) = 19.75$. Кривые - аппроксимации (1)

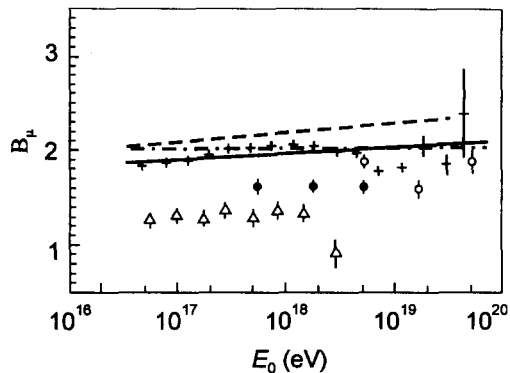


Рис.4. Зависимости параметра b_μ от E_0 в ШАЛ с $\langle \text{sec}\theta \rangle \approx 1.05$: + - экспериментальные данные Якутской установки и Акепо (Δ - [16], \bullet - [17], \circ - [18]); сплошные линии - расчет по модели QGSJET с первичными протонами для Якутской установки, штриховые - для Акепо. Штрих-пунктир - пересчет аппроксимации (3) на (1)

связано, по-видимому, с дополнительным изменением состава первичных частиц:

$$b_1 \approx 0.07 \cdot (1 - \partial \lg A / \partial \lg E_0), \quad (7)$$

где A - массовое число.

Из (7) и измерений следует $\partial \lg A / \partial \lg E_0 \approx -1.43 \pm 0.43$. Это, в свою очередь, не противоречит гипотезе об изменении первичного состава от смеси, обогащенной при $E_0 \sim 10^{17}$ эВ тяжелыми ядрами ($Z = 10-30$ составляют $\sim (63 \pm 7)\%$ [20]), к более легкой. По оценкам [21] доля протонов при $E_0 \sim 10^{18}$ эВ составляет $\sim 80\%$ ($\langle \ln A \rangle \approx 0.4$). В целом здесь по данным Якутской установки наблюдается определенное согласие теории и эксперимента.

При $E_0 \geq (2-4) \cdot 10^{18}$ эВ пространственное распределение мюонов (см. рис.4) становится более пологим, чем ожидается при экстраполяции динамики ФПР на эксперименте из области энергий $E_0 \approx (4-20) \cdot 10^{17}$ эВ. Эта аномалия находит свое отражение в уменьшении параметра b_μ (при $E_0 \sim 10^{19}$ эВ на $\Delta b_\mu \approx -0.35$), которое в ~ 2.7 раза больше, чем предсказывает модель QGSJET для крайних случаев изменения состава от первичных протонов к ядрам железа: $b_\mu(p) - b_\mu(Fe) = 0.13$. Такое поведение ФПР мюонов вызвано, на наш взгляд, каким-то новым развитием ШАЛ.

Рассмотрим данные установки Акепо. Треугольниками и кружками на рис.4 показаны параметры b_μ для ФПР, представленных на рис.3. Видно, что разные серии измерений не вполне согласуются между собой. Более того, полученные на Акепо ФПР оказались значительно выше, чем на Якутской установке, хотя модель QGSJET предсказывает обратное. По-видимому, в данных [16-18] имеются какие-то систематические ошибки, которые приводят к наблюдаемой картине.

Штрих-пунктирной линией на рис.4 показана зависимость, которая возникает из полученной на установке Акепо [16-18] эмпирической формулы (3), при переходе от нее к аппроксимации (1). Наши данные (крестики на рис.4) показывают, что при

недостаточной точности эксперимента вывод о том, что ФПР мюонов не зависит от энергии первичных частиц, возможен. Однако он является ошибочным и выявляется при более детальном и точном исследовании ФПР мюонов.

Наряду с b_μ , другим важным параметром ФПР мюонов, определяющим ее абсолютную величину, является $\rho_{\mu,600}$ – плотность мюонов, измеряемая на расстоянии 600 м от оси ливня. На рис.1 видно, что при фиксированной E_0 этот параметр слабо зависит от θ и уровней расположения Якутской установки и Акепо. Он реально измеряется на эксперименте в широком интервале энергий первичных частиц (рис.2, 3), поэтому часто используется в количественных соотношениях различных характеристик ШАЛ.

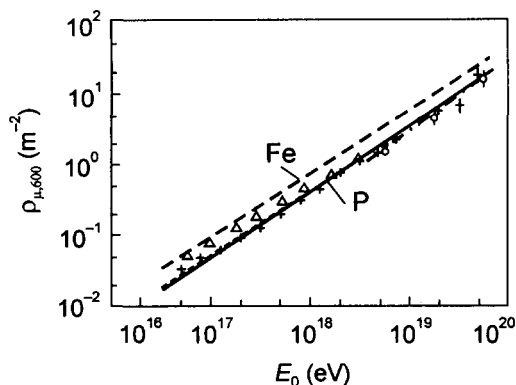


Рис.5. Зависимости $\rho_{\mu,600}$ от E_0 в ШАЛ с $(\sec\theta) \approx 1.05$. Обозначения аналогичны рис.4. Штрих-пунктир – наиболее вероятная зависимость при $E_0 \geq 3 \cdot 10^{18}$

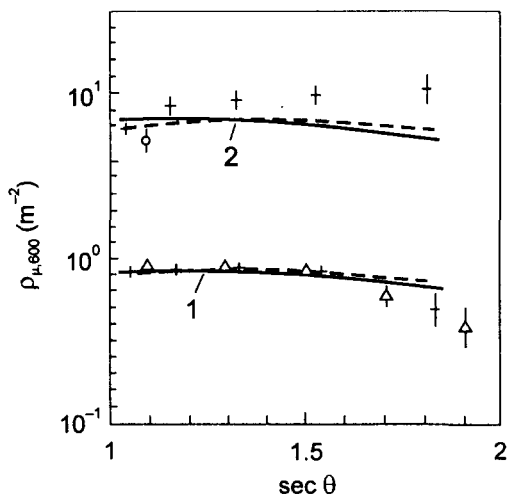


Рис.6. Зенитно-угловые зависимости $\rho_{\mu,600}(\theta)$ в ливнях с $E_0 = 2 \cdot 10^{18}$ эВ (1) и $2 \cdot 10^{19}$ эВ (2). Обозначения аналогичны рис.4

На рис.5 показаны $\rho_{\mu,600}$ в зависимости от E_0 в ливнях с $\sec\theta \leq 1.1$. Сплошной и пунктирными линиями изображены результаты расчетов по модели QGSJET соответственно для Якутской установки и Акепо. Они удовлетворяют зависимости

$$\rho_{\mu,600}(0^\circ) = \alpha \cdot (E_0/10^{18})^\beta, \quad [\text{м}^{-2}], \quad (8)$$

которая приводит в случае первичных протонов к $\alpha(p) = 0.44$, $\beta(p) = 0.92 \pm 0.01$ и $\alpha(p) = 0.44$, 0.91 ± 0.01 для Якутска и Акепо, соответственно.

Крестиками на рис.5 показаны $\rho_{\mu,600}(E_0)$, полученные на Якутской установке. Энергия первичных частиц находилась так же, как и в работах [2–9]:

$$E_0 = 4.8 \cdot 10^{17} (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.0} [\text{эВ}], \quad (9)$$

$$\rho_{s,600}(0^\circ) = \rho_{s,600}(\theta) \exp((\sec\theta - 1) \cdot 1020/\lambda_\rho) [\text{м}^{-2}], \quad (10)$$

$$\lambda_\rho = 450 + 32 \cdot \lg(\rho_{s,600}(0^\circ)) [\text{г/см}^2], \quad (11)$$

где $\rho_{s,600}(\theta)$ – плотность заряженных частиц, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии 600 м от оси ливня. Наши данные удовлетворяют (8) в разных интервалах E_0 по-разному:

$$\alpha = 0.36 \pm 0.02, \quad \beta = 0.82 \pm 0.02 \quad \text{– при } E_0 \leq 10^{18} \text{ эВ,}$$

$$\alpha = 0.32 \pm 0.02, \quad \beta = 1.01 \pm 0.04 \quad - \text{ при } E_0 \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ эВ.}$$

Более слабый рост $\rho_{\mu,600}$ при увеличении энергии ливней в области $E_0 \leq 10^{18}$ эВ подтверждает гипотезу о возможном изменении состава первичных частиц от обогащенной при $E_0 \sim 10^{17}$ эВ тяжелыми ядрами смеси в сторону протонов при $E_0 \sim 10^{18}$ эВ. Для модели суперпозиции в первом приближении имеет место зависимость

$$\beta \approx \beta(p) + (1 - \beta(p)) \cdot \partial \lg A / \partial \lg E_0, \quad (12)$$

из которой и данных Якутской установки следует оценка скорости изменения состава $\partial \lg A / \partial \lg E_0 = -1.25 \pm 0.37$. Это подтверждают данные установки Акено [16], которые удовлетворяют (8) с коэффициентами

$$\alpha = 0.49 \pm 0.02, \quad \beta = 0.80 \pm 0.02 \quad - \text{ при } E_0 \leq 3 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$$

и приводят к оценке $\partial \lg A / \partial \lg E_0 = -1.22 \pm 0.22$.

По абсолютной величине представленные на рис.5 экспериментальные данные при $E_0 \leq 10^{18}$ эВ отличаются между собой в 1.35 раза. Это противоречит тому, что предсказывают расчеты. Причины здесь могут быть разные. Во-первых, оценки E_0 из $\rho_{\mu,600}$ на обеих установках отличаются в 1.15 раза [22]. Во-вторых, ФПР в работе [16] оказались очень пологими (см. рис.4). Возможно это связано с завышением малых плотностей мюонов на периферии ливня? В-третьих, данные Якутской установки при $E_0 \sim 10^{18}$ эВ, где они выходят, казалось бы, на протонный состав первичных частиц, идут ниже расчетов для протонов в ~ 1.2 раза. Все это требует дополнительных исследований особенностей проведения экспериментов на обеих установках.

В области энергий $E_0 \geq 3 \cdot 10^{18}$ эВ данные Якутской установки и Акено в пределах ошибок измерений согласуются между собой, но противоречат рассматриваемой модели при любом составе первичных частиц. Здесь наиболее вероятно зависимость $\rho_{\mu,600}(E_0)$, показанная на рис.5 штрих-пунктирной линией с наклоном $\beta = 1.01 \pm 0.04$.

На рис.6 показаны зенитно-угловые зависимости $\rho_{\mu,600}(\theta)$ в ливнях с $E_0 = 2 \cdot 10^{18}$ эВ (1) и $2 \cdot 10^{19}$ эВ (2). Крестиками изображены экспериментальные данные Якутской установки, треугольниками и кружками – данные Акено [16, 18]. Сплошными и пунктирными кривыми показаны результаты расчетов по модели QGSJET (первичные протоны) для Якутской установки и Акено, соответственно.

Видно, что при $E_0 = 2 \cdot 10^{18}$ эВ экспериментальные данные хорошо согласуются между собой и с расчетами при $\sec\theta \leq 1.6$. В ШАЛ с $E_0 = 2 \cdot 10^{19}$ эВ такого согласия нет. Данные Якутской установки указывают на значительное увеличение $\rho_{\mu,600}$ с ростом θ по сравнению с расчетами, а на установке Акено пока нет ФПР мюонов в наклонных ливнях таких энергий.

3. Заключение. Если подытожить результаты проведенного анализа, то возникает следующая картина. Измеренные на Якутской установке и Акено ФПР мюонов с пороговой энергией $E_{\mu} \approx 1.0 \cdot \sec\theta$ ГэВ можно аппроксимировать на расстояниях от оси ливней $R \approx 100 - 3000$ м функциями (1). В области энергий $E_0 \leq (1 - 2) \cdot 10^{18}$ эВ экспериментальные данные обеих установок не противоречат модели QGSJET и предположению о том, что состав первичных частиц меняется от смеси с преобладанием при $E_0 \sim 10^{17}$ эВ тяжелых ядер ($Z = 10 - 30$ составляют $\sim (63 \pm 7)\%$ [20]) к преимущественно протонному при $E_0 \sim 10^{18}$ эВ [21]. Наблюдаемые здесь разногласия между экспериментами и расчетами связаны, скорее всего, с особенностями измерений ФПР мюонов на рассматриваемых установках. Не исключено также дальнейшее уточнение самой модели QGSJET.

При $E_0 \geq 3 \cdot 10^{18}$ эВ дело обстоит по-другому. Данные Якутской установки (рис. 4–6) указывают на то, что в этой области энергий ливни развиваются иначе, чем предсказывает модель QGSJET при любом составе первичных частиц. Этот вывод подтверждают также аномальные по форме ФПР всех заряженных частиц, измеренные наземными сцинтилляционными детекторами на Якутской установке [9, 23, 24].

На AGASA (Akeno Giant Air Shower Array – современная установка Akeno с площадью $\sim 100 \text{ км}^2$ [25]) пока мало событий с мюонами в самых мощных (особенно наклонных) ШАЛ, чтобы уверенно судить по ним о поведении ФПР при $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ. Дальнейшее увеличение статистики этих ливней может не внести ясности в затронутую нами проблему о нерегулярности развития ШАЛ в указанной области энергий, так как используемые AGASA мюонные детекторы (гейгеровские счетчики площадью 0.2 или 0.5 м² [25]) обладают узким динамическим диапазоном и насыщаются при $\rho_\mu \geq 10 - 15 \text{ м}^2$. Они дают информацию о распределении мюонов на расстояниях от оси $R \geq 600 - 800 \text{ м}$, но этого не достаточно, чтобы обнаружить относительное изменение формы ФПР в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки России Якутской комплексной установки ШАЛ (регистр. № 01-30), включенной в “Перечень уникальных научно-исследовательских и экспериментальных установок национальной значимости” и в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (98-02-16964). Один из авторов (Н.Н.К.) благодарен Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку в рамках грантов 96-15-96783 и 99-02-16250.

-
1. C.J. Bell et al., J. Phys. **A7**, 990 (1974).
 2. А.В.Глушков, И.Т.Макаров, Е.С.Никифорова и др., ЯФ **58**, 1265 (1995).
 3. A.V.Glushkov, I.T.Makarov, E.S.Nikiforova et al., Astroparticle Physics **4**, 1274 (1995).
 4. А.В.Глушков, В.Б.Косарев, И.Т.Макаров и др., Письма в ЖЭТФ **67**, 361 (1998).
 5. A.V.Glushkov, V.B.Kosarev, I.T.Makarov et al., JETP Letters **67**, 383 (1998).
 6. А.В.Глушков, И.Т.Макаров, М.И.Правдин и др., Изв. РАН., сер. физ. **63**, 538 (1999).
 7. A.V.Glushkov, M.I.Pravdin, V.R.Sleptsova et al., Proc. 26th ICRC **1**, 387 (1999).
 8. A.V.Glushkov, M.I.Pravdin, V.R.Sleptsova et al., Proc. 26th ICRC **1**, 399 (1999).
 9. А.В.Глушков, М.И.Правдин, И.Е.Слепцов и др., ЯФ, в печати (1999).
 10. P.R.Blake and W.F.Nash, J.Phys. G: Nucl. Part. Phys. **21**, 129 (1995).
 11. *Summary of Akeno Experiments. Akeno Observatory, Institute for Cosmic Ray Research University of Tokyo, 1997.*
 12. N.N.Kalmykov et al., Proc. 24th ICRC **1**, 123 (1995).
 13. N.N.Kalmykov et al., Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) **52B**, 17 (1997).
 14. M.Nagano, D.Heck, K.Shinozaki et al., Preprint FZKA 6191, Karlsruhe (1998).
 15. A.D.Erlykin and A.W.Wolfendale, Proc. 16th ECRS. Alcala de Henares, 1998, p.269.
 16. N.Hayashida, K.Honda, M.Honda et al., J.Phys. G: Nucl. Part. Phys. **21**, 1109 (1995).
 17. M.Teshima, Y.Matsubara, T.Hara et al., J. Phys. G: Nucl. Phys. **12**, 1097 (1986).
 18. N.Inoue et al., Proc. 26th ICRC **1**, 357 (1999).
 19. K.Greisen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1966).
 20. Е.А.Вишневская, Н.Н.Калмыков, Г.В.Куликов и др., ЯФ **62**, 300 (1999).
 21. А.В.Глушков, Л.Г.Деденко, Н.Н.Ефимов и др., Изв. АН СССР, сер. физ. **50**, 2166 (1986).
 22. M.Nagano, M.Teshima, Y.Matsubara et al., J. Phys. G: Nucl. Phys. **18**, 423 (1992).
 23. А.В.Глушков, М.И.Правдин, И.Е.Слепцов, Изв. РАН, сер. физ. **61**, 516 (1997).
 24. A.V.Glushkov, M.I.Pravdin, and I.Ye.Sleptsov, Proc. 25th ICRC **6**, 233 (1997).
 25. N.Chiba, K.Hashimoto, N.Hayashida et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. **A311**, 338 (1992).