

ЗЕНИТНО-УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЦ ШАЛ С $E_0 \approx 10^{18}$ эВ ПО ДАННЫМ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ

© 2023 г. А. В. Глушков^{1)*}, К. Г. Лебедев¹⁾, А. В. Сабуров^{1)**}

Поступила в редакцию 03.11.2022 г.; после доработки 17.12.2022 г.; принята к публикации 27.12.2022 г.

Исследованы пространственные распределения частиц в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) на Якутской установке наземными и подземными сцинтилляционными детекторами с порогом $E_\mu \approx \approx 1.0 \text{ sec } \theta$ ГэВ от космических лучей с энергией $E_0 \approx 10^{18}$ эВ за период непрерывных наблюдений 1986–2016 гг. Использованы все данные с зенитными углами $\theta \leq 60^\circ$ в пяти интервалах с шагом $\Delta \cos \theta = 0.1$. Экспериментальные величины сравниваются с расчетными, выполненными по модели развития ШАЛ QGSJET-01-d из пакета программ CORSIKA. Вся совокупность рассмотренных данных указывает на вероятный состав космических лучей, близкий к чисто протонному.

DOI: 10.31857/S004400272303011X, EDN: RLBPYM

1. ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи (КЛ) сверхвысоких энергий ($E_0 \geq 10^{15}$ эВ) активно исследуются во всем мире более 50 лет [1]. До сих пор точно не известен их массовый состав, без знания которого трудно понять характер ядерных взаимодействий в этой области энергий и источники происхождения первичных частиц. Для его оценки используются различные параметры ливней d , чувствительные к массовому составу КЛ. На Якутской установке это делается с помощью функций пространственного распределения (ФПР) электронной, мюонной и черенковской компонент ШАЛ (см., например, [2–7]). Ключом к решению проблемы состава КЛ служит простое соотношение, вытекающее из принципа нуклонной суперпозиции:

$$\ln A = ((d_p - d_{\text{exp}})/(d_p - d_{\text{Fe}})) \ln 56,$$

где A — атомный номер первичной частицы, d — любой чувствительный к составу КЛ параметр, полученный в эксперименте (exp) и расчетным путем для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe). Здесь не обойтись без теоретических представлений о развитии ШАЛ. В [8] рассчитаны ФПР откликов наземных и подземных сцинтилляционных детекторов Якутской установки от первичных частиц с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ по моделям QGSJET-01-d [9], QGSJET-II-04 [10], EPOS-LHC [11] и SIBYLL-2.1 [12] в рамках пакета программ CORSIKA [13].

На рис. 1 приведены оценки состава первичных частиц мировыми установками ШАЛ. Они показывают противоречивую картину в этом вопросе. Установки NEVOD-DECOR и Auger, регистрирующие мюоны в наклонных ливнях, дают значения A при $E_0 \geq 3 \times 10^{17}$ эВ, выходящие за рамки традиционных представлений на этот счет. Это привело к появлению проблемы “muon excess” [14, 15], которая ставит под сомнение существующие модели развития ШАЛ. В этой связи мы анализируем данные Якутской установки при $E_0 \approx \approx 10^{18}$ эВ, которые имеют большую статистику и хорошие точности измерений.

2. ОТБОР И ОБРАБОТКА ЛИВНЕЙ

Были рассмотрены средние плотности всех частиц ШАЛ $\langle \rho_{s,R}(\theta) \rangle$ и мюонов $\langle \rho_{\mu,R}(\theta) \rangle$ с пороговой энергией $E_\mu \approx 1.0 \text{ sec } \theta$ ГэВ, измеренные наземными и подземными сцинтилляционными детекторами на расстояниях $R = 300, 600$ и 1000 м от оси в ливнях со средними зенитными углами $\langle \cos \theta \rangle = 0.95, 0.90, 0.85, 0.75, 0.65$ и 0.55 . В табл. 1 приведена статистика использованных ливней. Экспериментальные ФПР обеих компонент строились в интервалах $\Delta \cos \theta = 0.1$ с шагом по энергии $\Delta \log E_0 = 0.2$. Зенитные углы ШАЛ были $\theta \leq 60^\circ$. Их оси отбирались в центральный круг установки с радиусом 1 км и были найдены с точностью не хуже 50 м. Первичная энергия ливней находилась из соотношений:

$$E_0 = (3.76 \pm 0.3) \times 10^{17} \times (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02 \pm 0.02} [\text{эВ}], \quad (1)$$

¹⁾Институт космофизических исследований и аэронавтики Якутского научного центра им. Ю. Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия.

*E-mail: glushkov@ikfia.ysn.ru

**E-mail: vs.tema@gmail.com

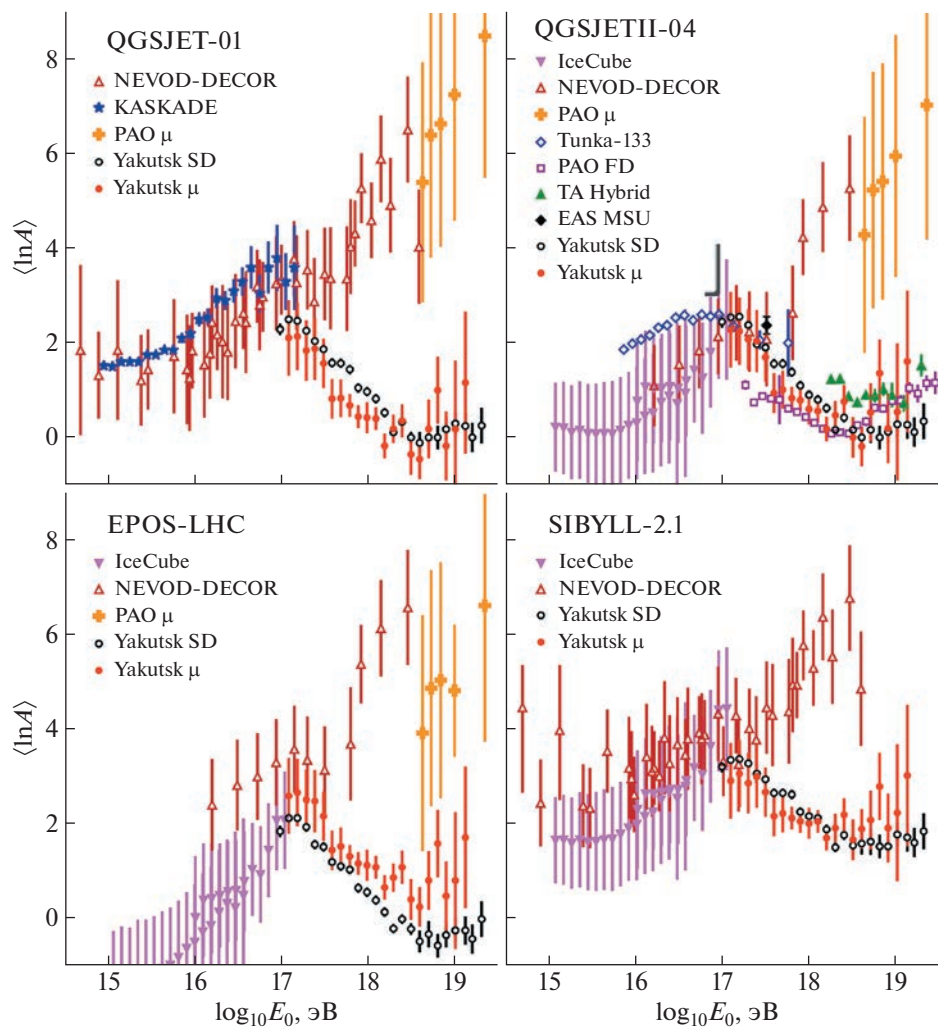


Рис. 1. Энергетические зависимости массового состава КЛ, полученные на разных установках ШАЛ. Пустые кружки — оценки, полученные на Якутской установке по данным наземных детекторов (SD) [16, 17], закрашенные кружки — оценки по мюонной компоненте ШАЛ (μ) [18]. Здесь же приведены оценки, полученные из масштабного параметра z [19] для экспериментов IceCube [20], NEVOD-DECOR [21, 22], ШАЛ-МГУ [23] и PAO (Auger) [24–26]. Также приведены данные установок KASCADE [27], Тунка-133 [28], флуоресцентной части PAO (FD) [29] и TA [30, 31].

$$\begin{aligned} \rho_{s,600}(0^\circ) &= \rho_{s,600}(\theta) \times \\ &\times \exp((\sec \theta - 1)h/\lambda) \text{ [м}^{-2}\text{]}, \end{aligned} \tag{2}$$

с пробегом поглощения λ , показанным на рис. 2; $h = 1020 \text{ г/см}^2$ — глубина атмосферы Якутской установки. Точность определения $\rho_{s,600}(\theta)$ в индивидуальных ШАЛ была не хуже 10%. Соотношение (1) однозначно связывает $\rho_{s,600}(0^\circ)$ и E_0 при любом составе КЛ благодаря тому, что на расстоянии $\approx 600 \text{ м}$ от оси ФПР всех заряженных частиц

пересекаются между собой. Это видно на рис. 3, где в качестве примера показаны ФПР в ливнях с $E_0 = 10^{18} \text{ эВ}$ и $\cos \theta = 0.9$ для первичных протонов (светлые кружки) и ядер железа (темные кружки), вычисленные по модели QGSJET-II-04.

Координаты оси и $\rho_{s,600}(\theta)$ находились по преобразованной функции Линсли [32]:

$$\begin{aligned} f_s(R, \theta) &= \rho_{s,600}(\theta)(600/R)^\alpha \times \\ &\times ((R_M + 600)/(R_M + R))^{b_s - \alpha}, \end{aligned} \tag{3}$$

где R_M — мольеровский радиус, $\alpha = 1$. Последний зависит от температуры (T) и давления (P):

$$R_M \approx (7.5 \times 10^4 / P)(T/273) \text{ [м]}. \tag{4}$$

Значение R_M определялось в каждом ливне (для Якутска $\langle T \rangle \approx -18^\circ\text{C}$ и $\langle R_M \rangle \approx 70 \text{ м}$). В формуле

Таблица 1

$\langle \cos \theta \rangle$	0.95	0.90	0.85	0.75	0.65	0.55
Число ливней	2835	1774	983	637	461	246

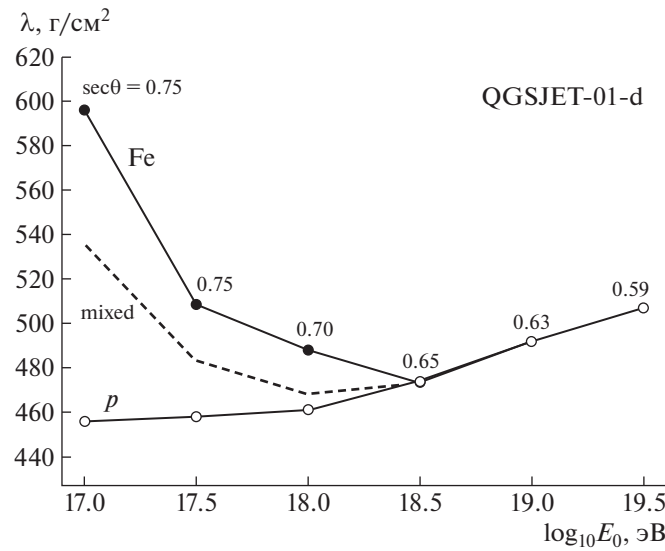


Рис. 2. Значения пробегов поглощения в (2) при пересчете $\rho_{s,600}(\theta)$ от наклонных к вертикальным ливням по модели QGSJET-01-d для первичных протонов (p), смешанного состава и ядер железа (Fe) в зависимости от E_0 . Цифры — предельно допустимые значения $\cos \theta$.

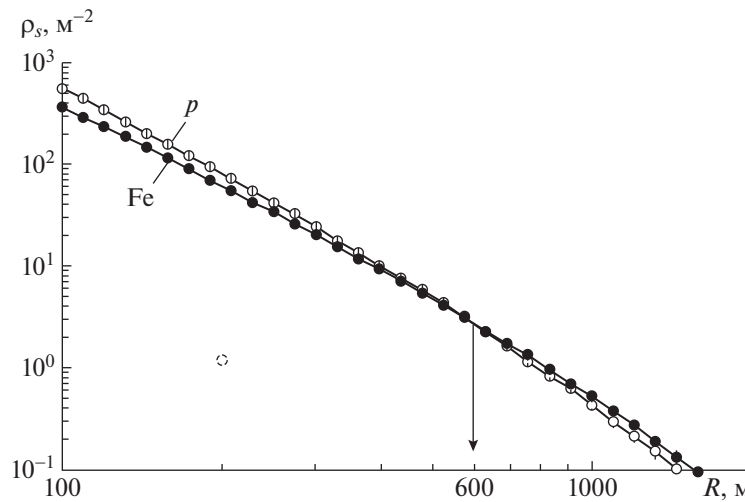


Рис. 3. ФПР заряженных частиц в ливнях с $E_0 = 10^{18}$ эВ и $\cos \theta = 0.9$ для первичных протонов (светлые кружки) и ядер железа (темные кружки), вычисленные по модели QGSJET-II-04 [8].

(4) b_s — параметр, определенный ранее [33]:

$$b_s = 1.38 + 2.16 \cos \theta + 0.15 \log(\rho_{s,600}(\theta)). \quad (5)$$

При построении ФПР плотности частиц в отдельных ливнях умножались на нормировочный коэффициент $\langle E_0 \rangle / E_0$ ($\langle E_0 \rangle$ — средняя энергия в группе) и усреднялись между собой в бинах $\Delta \log(R) = 0.04$. Средние плотности частиц находились по формуле

$$\langle \rho_s(R_i) \rangle = \left(\sum_{k=1}^N \rho_k(R_i) \right) / N, \quad (6)$$

где N — число показаний детекторов на расстояниях от оси в интервалах $(\log(R_i), \log(R_i) + 0.04)$. Полученные ФПР аппроксимировались функцией

$$\rho_s(R, \theta) = f_s(R, \theta) ((600 + R_1) / (R + R_1))^g, \quad (7)$$

где $a = 2$, $R_M = R_0 = 8$ м, $R_1 = 10^4$ м и $g = 10$. Второй сомножитель (7) корректирует крутизну ФПР на периферии ливня. В этой функции был сделан переход от мольеровского радиуса R_M к формальному параметру R_0 , который в совокупности с другими параметрами аппроксимации (7) обеспечивает ее наилучшее согласие с усредненными плотностями (6) в широком диапазоне рас-

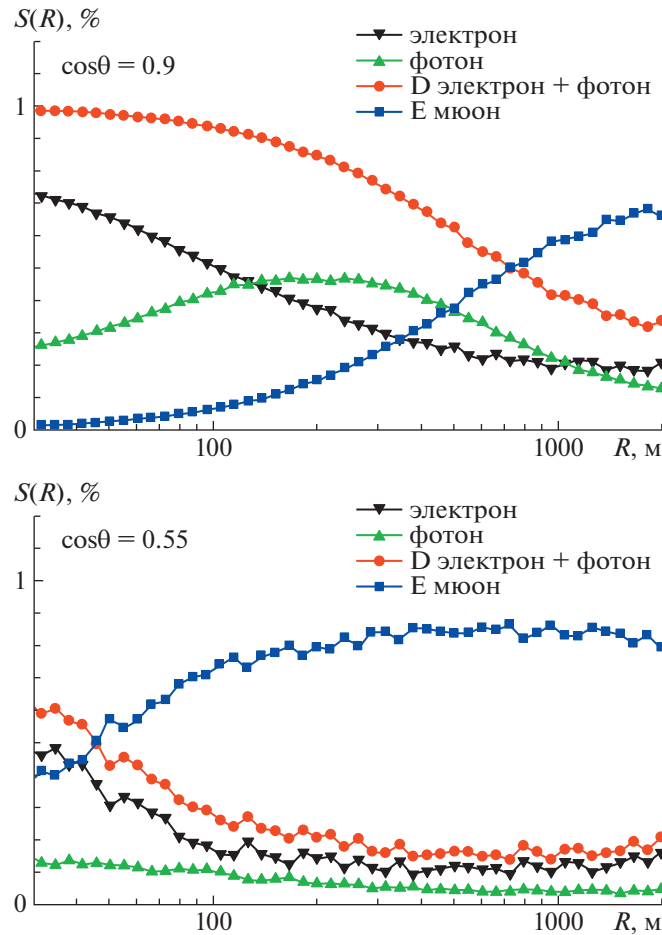


Рис. 4. Относительные вклады частиц ШАЛ в суммарный отклик наземного сцинтилляционного детектора на расстояниях от оси $R = 30\text{--}2000$ м в ливнях с разными зенитными углами, вычисленные по модели QGSJET-01 для первичных протонов [8].

стояний от оси ливня. Величины $\rho_{s,600}(\theta)$ и b_s были свободными параметрами, которые находились методом наименьших квадратов с помощью χ^2 -минимизации. С помощью построенных таким образом средних ФПР находились окончательные значения энергии по пересмотренному калориметрическому методу [34].

ФПР мюонов строились аналогично сказанному выше. Средние плотности находились по формуле

$$\langle \rho_\mu(R_i) \rangle = \left(\sum_{n=1}^{N_1} \rho_n(R_i) \right) / (N_1 + N_0), \quad (8)$$

где N_1 и N_0 — число ненулевых и нулевых показаний мюонных детекторов на расстояниях от оси в интервалах $(\log(R_i), \log(R_i) + 0.04)$. Нулевые показания N_0 относятся к случаям, когда детекторы не зарегистрировали ни одного мюона, но находились в режиме ожидания. ФПР аппроксимировались функцией

$$\rho_\mu(R, \theta) = f_\mu(R, \theta) ((600 + R_1)/(R + R_1))^g, \quad (9)$$

где $R_1 = 2000$ м и $g = 6.5$, с соотношением Грейзенна [35]

$$f_\mu(R, \theta) = \rho_{\mu,600}(\theta) (600/R)^{0.75} \times ((R_0 + 600)/(R_0 + R))^{b_\mu - 0.75}, \quad (10)$$

где $R_0 = 280$ м, b_μ — параметр. Наиболее подходящие значения b_μ и $\rho_{\mu,600}(\theta)$ в (10) находились методом наименьших квадратов с помощью χ^2 -минимизации.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Пространственные распределения частиц ШАЛ измеряются на Якутской установке в единицах энергосвечения вертикальных релятивистских мюонов в пластическом сцинтилляторе (плотность 1.06 г/см^2) толщиной 5 см. Эта энергия $E_1 = 5 \times 1.06 \times 2.217 = 11.75$ МэВ расходуется мюоном на ионизацию вещества пластика и превращается

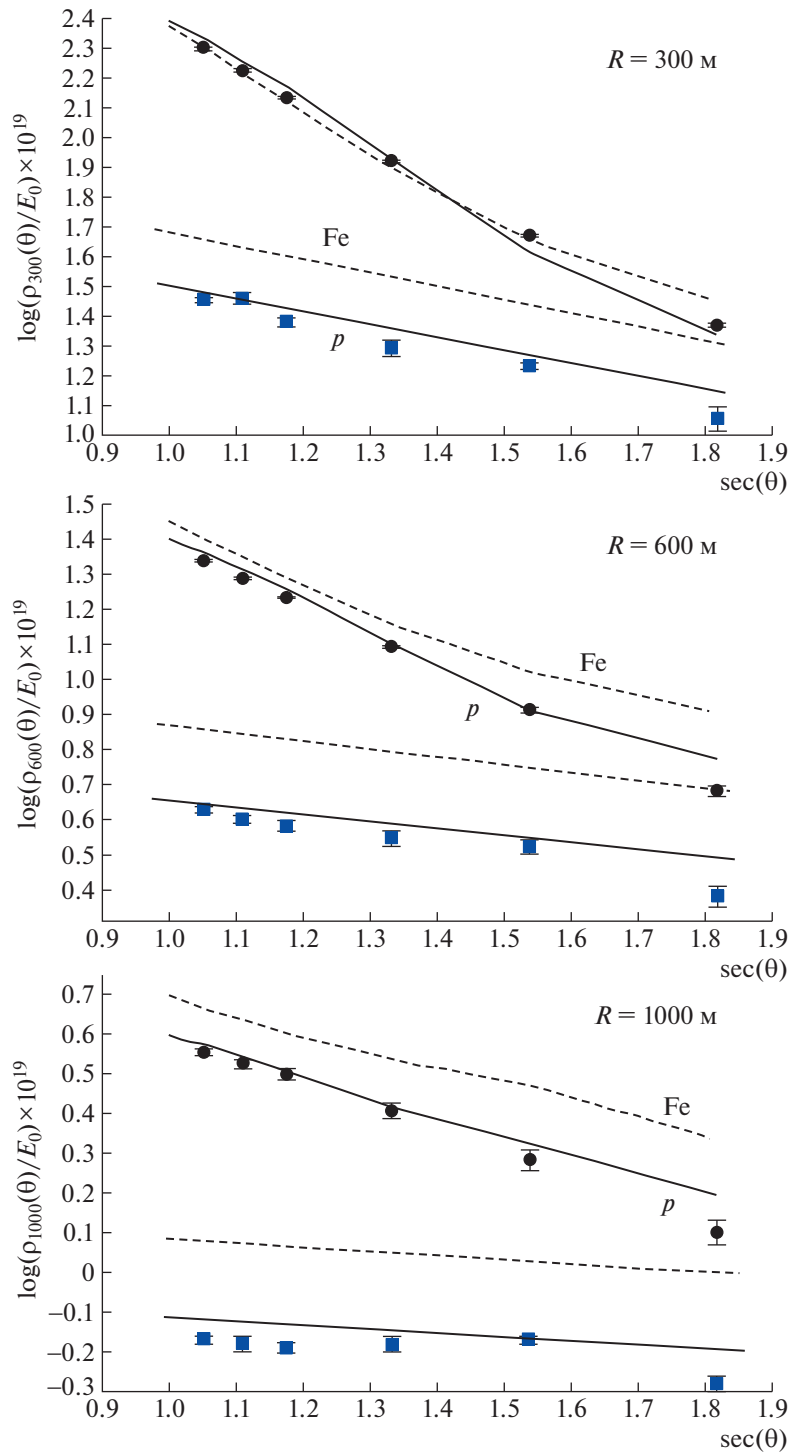


Рис. 5. Зенитно-угловые зависимости откликов наземных (кружки) и подземных с порогом 1.0 сек θ ГэВ (квадраты) сцинтилляционных детекторов на разных расстояниях от оси ШАЛ с энергией 10^{18} эВ, нормированные на экспериментально измеренную первичную энергию (1). Линии — расчеты, выполненные по модели QGSJET-01-d для первичных протонов (сплошные) и ядер железа (штриховые).

в световую вспышку (отклик), прямо пропорциональную числу прошедших через детектор частиц (электронов, мюонов и фотонов). На практике измеряют суммарное энерговыделение этих частиц

$\Delta E_s(R)$ в виде условной плотности в единицах: $\rho_s(R) = \Delta E_s(R)/E_1$ [м⁻²]. Фотоны регистрируются при распаде на электрон-позитронную пару и за счет рождения комптоновских электронов отдачи.

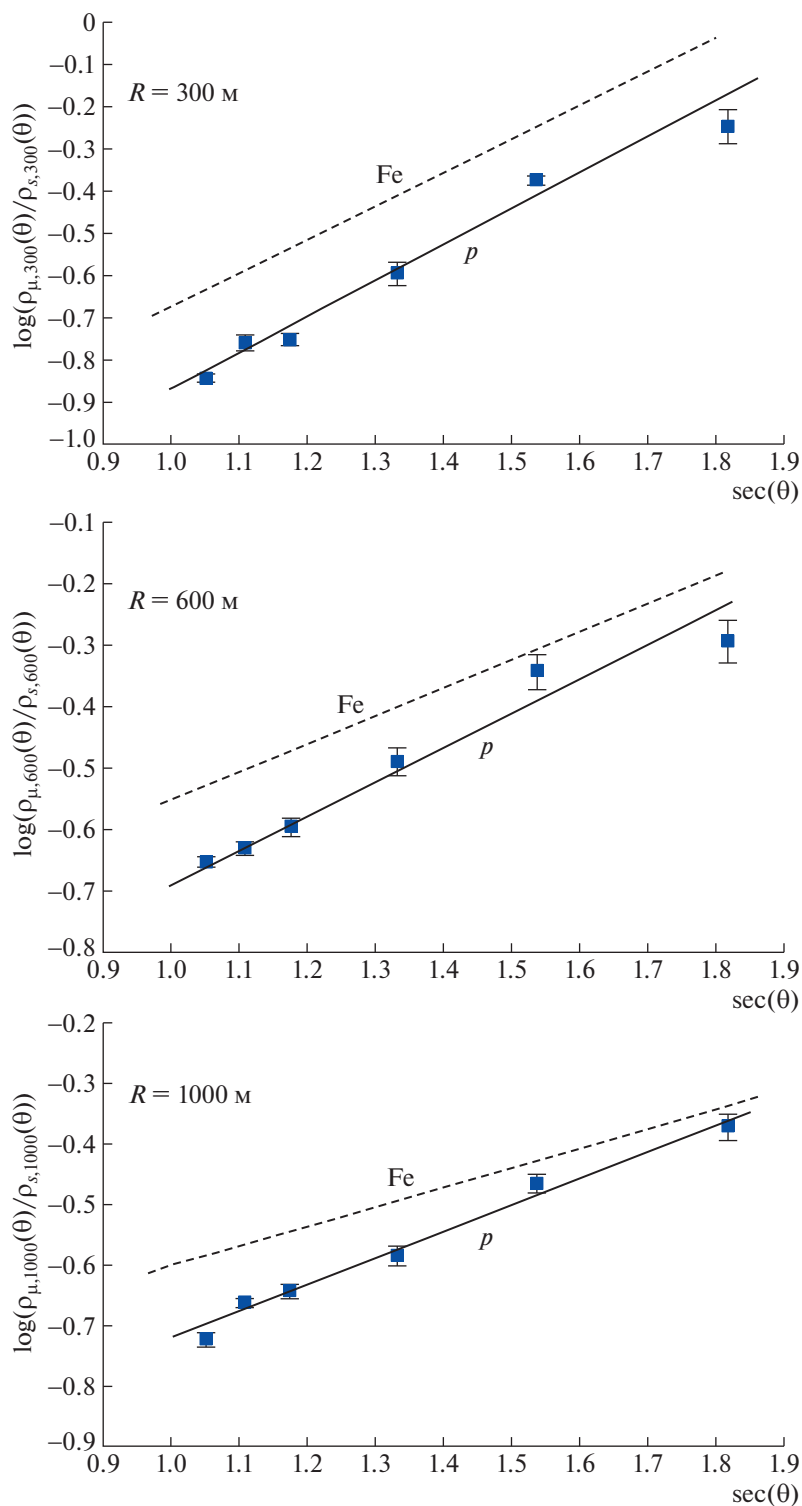


Рис. 6. Зенитно-угловые зависимости доли мюонов с порогом $1.0 \text{ sec } \theta \text{ ГэВ}$ от полного числа наземных частиц на разных расстояниях от оси ШАЛ с энергией 10^{18} эВ . Линии — расчеты по моделям QGSJET-01-d для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe) соответственно.

Они вносят существенный вклад в ФПР наземных детекторов Якутской установки.

На рис. 4 показаны относительные вклады $S(R)$ этих частиц в суммарный отклик на расстояниях

от оси $R = 30\text{--}2000 \text{ м}$ в ливнях с зенитными углами $\theta = 25.8^\circ$ и 56.6° , вычисленные по модели QGSJET-01 для первичных протонов [8]. В качестве модели низких энергий была использова-

на FLUKA [36]. Сначала рассчитывались отклики $U_k(E, \theta)$ от одиночных частиц k -типа (где k — электрон, мюон или гамма-квант) с энергией E . При этом учитывались все процессы выделения и поглощения энергии в экране и сцинтилляторе и сечения их взаимодействий. Затем развитие ШАЛ в реальной атмосфере оценивалось с помощью кода CORSIKA. Для каждого набора первичных параметров (масса первичной частицы, энергия, зенитный угол) было разыграно по 200 ливней. С целью ускорения расчетов был задействован механизм статистического прореживания (hinning) со следующими параметрами: $E_i/E_0 = 10^{-5}$, $\mathbf{w}_{\max} = 10^4$. При пересчете в плотность учитывалось число частиц, приходящих на детектор заданной площади. Ливни усреднялись между собой. Вычислялись энергетические спектры $d_k(E, R, \theta)$ всех типов частиц в интервалах расстояний $\Delta \log R = 0.04$. Их совместный отклик определяется суммой

$$\rho_s(R) = \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^{I_k} U_k(E_i, \theta_i) d_k(E_i, R, \theta_i), \quad (11)$$

где I_k — число частиц типа k , которые попали в детектор. Плотность D на рис. 4 состоит из суммы электронов и фотонов (чистая электромагнитная компонента ШАЛ). В сумме с мюонами (E) она формирует полный отклик $S(R)$. В наклонных ливнях при $R \geq 300$ м наземные сцинтилляционные детекторы регистрируют более 80% мюонов.

Далее рассмотрим величины $\langle \rho_{s,R}(\theta) \rangle$ и $\langle \rho_{\mu,R}(\theta) \rangle$, найденные вычислением из аппроксимаций (7) и (10). Мы приводим суммарные ошибки, которые включают в себя как статистические, так и методические. На практике разделить их между собой бывает трудно и не всегда целесообразно. На рис. 5 показаны зенитно-угловые зависимости плотностей $\log((\langle \rho_{s,R}(\theta) \rangle / \langle E_0 \rangle) \times 10^{19})$ и $\log((\langle \rho_{\mu,R}(\theta) \rangle / \langle E_0 \rangle) \times 10^{19})$, нормированных на энергию (1). Экспериментальные значения сравниваются с расчетными, выполненными по модели QGSJET-01 для первичных протонов и ядер железа. Видно, что все измеренные плотности обеих компонент ШАЛ в разных угловых интервалах не противоречат предположению о том, что космические лучи с энергией $\sim 10^{18}$ эВ состоят из протонов. Мюоны показывают $\approx 10\%$ нехватку плотности по сравнению с расчетами.

На рис. 6 показана доля мюонов $\log(\langle \rho_{\mu,R}(\theta) \rangle / \langle \rho_{s,R}(\theta) \rangle)$, которая напрямую зависит от состава первичных частиц. Она имеет лучшее согласие модели QGSJET-01 с экспериментом. Из этого можно предположить, что общая для всех данных первичная энергия на рис. 5, найденная

по формуле (1), вероятно, завышена в ≈ 1.1 раза. Эта гипотеза имеет пока право на существование, но нуждается в глубоком и всестороннем дальнейшем исследовании. Глубины максимума развития каскадной кривой в ливнях с энергией 10^{18} эВ от первичных протонов и ядер железа в рамках модели QGSJET-01 соответственно равны 721 ± 3 и 636 ± 2 г/см². В последнем угловом интервале с $\sec \theta = 1.818$ во всех данных наблюдаются заниженные экспериментальные плотности на $\approx 20\%$ по сравнению с расчетными значениями. Это обусловлено тем, что найденная по формуле (1) первичная энергия оказалась больше (одинаковой во всех первых пяти угловых интервалах энергии) в ≈ 1.1 раза. Вероятно, эта тенденция в более наклонных ШАЛ может усиливаться. Из рис. 6 видно, что доля мюонов на расстояниях от оси $R \approx 300$ м в ливнях с зенитными углами $\approx 60^\circ$ близка к единице. Это свидетельствует о том, что наземные и подземные детекторы регистрируют практически одни и те же частицы: а именно — мюоны с энергией ≥ 2 ГэВ. В этих условиях результаты экспериментов NEVOD-DECOR и Auger, которые согласуются на рис. 1 с аномально тяжелым составом первичных частиц с энергией $\sim 10^{18}$ эВ, могут быть обусловлены этим обстоятельством. Они регистрируют мюоны в сильно наклонных ШАЛ (с $\theta > 60^\circ$), где правильные измерения плотностей мюонов и оценка первичной энергии космических лучей являются актуальными и трудными задачами.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние измерения пространственной структуры частиц ШАЛ на Якутской установке наземными и подземными мюонными детекторами и их сравнение с расчетными ФПР позволило еще раз критически оценить массовый состав космических лучей в области энергий $E_0 \approx 10^{18}$ эВ, где на установке накоплен значительный экспериментальный материал. Совместный анализ зенитно-угловых зависимостей этих двух компонент, которые измеряются однотипными сцинтилляционными детекторами и одинаково калибруются по частоте фоновых частиц ШАЛ, показал их удовлетворительное согласие с моделью QGSJET-01-d с протонным составом первичных частиц рассмотренной энергии. Вывод основан на измерениях $6 \times 3 = 18$ независимых плотностей $\langle \rho_{s,R}(\theta) \rangle$ и такого же числа независимых плотностей $\langle \rho_{\mu,R}(\theta) \rangle$, у которых порог регистрации мюонов увеличился от ≈ 1000 до 1800 МэВ в наклонных ливнях. В расчетах, как и в эксперименте, находились отклики — условное число частиц в единицах вертикальных релятивистских мюонов под слоем свинца толщиной 35 см. Модель QGSJET-II-04 не рассматривалась,

так как она ранее (см., например, рис. 1) не противоречит сказанному выше о составе первичных частиц [16–18]. Мы планируем продолжить эти исследования с другими энергиями ШАЛ. А также рассмотрим более детально модели EPOS-LHC и Sibyll-2.3d, которые хуже согласуются с данными Якутской установки, особенно последняя из них [16–18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. K. F. Grieder, *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects* (Springer, Berlin, 2010), <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76941-5>
2. A. V. Glushkov, V. M. Grigoriev, N. N. Efimov, M. I. Pravdin, O. S. Diminstein, and V. P. Sokurov, in *Proceedings of the 16th ICRC, Kyoto, 1979*, Ed. by S. Miyake and N. Gakujutsu Kaigi (Tokyo, 1979), ADS: 1979ICRC....8..158G.
3. А. В. Глушков, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, НИИЯФ МГУ (Москва, 1982).
4. А. В. Глушков, Л. Г. Деденко, Н. Н. Ефимов, Н. Н. Ефремов, И. Т. Макаров, П. Д. Петров, М. И. Правдин, Изв. АН СССР. Сер. физ. **55**, 2166 (1986).
5. А. В. Глушков, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов, В. Р. Слепцова, Н. Н. Калмыков, ЯФ **63**, 1557 (2000).
6. А. В. Глушков, А. В. Сабуров, Письма в ЖЭТФ **98**, 661 (2013), <https://doi.org/10.7868/S0370274X13220025>
7. E. G. Berezhko, S. P. Knurenko, and L. T. Ksenofontov, *Astropart. Phys.* **36**, 31 (2013), doi: 10.1016/j.astropartphys.2012.04.014
8. А. В. Сабуров, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук, ИЯИ РАН (Москва, 2018).
9. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **52**, 17 (1997), doi: 10.1016/S0920-5632(96)00846-8
10. S. Ostapchenko, *Phys. Rev. D* **83**, 014018 (2011), <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.014018>; arXiv: 1010.1869 [hep-ph].
11. T. Pierog, Iu. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko, and K. Werner, *Phys. Rev. C* **92**, 034906 (2015), doi: 10.1103/PhysRevC.92.034906; arXiv: 1306.0121 [hep-ph].
12. E.-J. Ahn, R. Engel, T. K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, *Phys. Rev. D* **80**, 094003 (2009), doi: 10.1103/PhysRevD.80.094003; arXiv: 0906.4113 [hep-ph].
13. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, *Forschungszentrum Karlsruhe Report FZKA 6019* (Karlsruhe, 1988).
14. A. Aab *et al.* (Pierre Auger Collab.), arXiv: 1408.1421 v6 [astro-ph.HE].
15. Gesualdi, A. D. Supanitsky, and A. Etchegoyen, arXiv: 2003.03385v1 [astro-ph.HE].
16. А. В. Глушков, А. В. Сабуров, Письма в ЖЭТФ **100**, 793 (2014).
17. А. В. Глушков, М. И. Правдин, А. В. Сабуров, Письма в Астрон. журн. **44**, 643 (2018), <https://doi.org/10.1134/S0320010818100029>
18. А. В. Глушков, А. В. Сабуров, Письма в ЖЭТФ **109**, 579 (2019).
19. H. P. Dembinsky, J. C. Arteaga-Velázquez, L. Cazon, *et al.* (for the WHISP group), in *Proceedings of the UHECR2018, Paris, 2018*, Talk id: 64367, arXiv: 1902.08124 [astro-ph.HE].
20. J. G. Gonzales, M. G. Aartsen, M. Ackermann, *et al.* (IceCube Collab.), in *Proceedings of the 20th ISVHECRI, Nagoya, 2018*, Talk id: 2964861.
21. А. Г. Богданов, Д. М. Громушкин, Р. П. Кокоулин, Дж. Маннокки, А. А. Петрухин, О. Сааведра, Дж. Тринкери, Д. В. Чернов, В. В. Шутенко, И. И. Яшин, ЯФ **73**, 1904 (2010) [A. G. Bogdanov, D. M. Gromushkin, R. P. Kokoulin, G. Mannocchi, A. A. Petrukhn, O. Saavedra, G. Trincherro, D. V. Chernov, V. V. Shutenko, and I. I. Yashin, *Phys. At. Nucl.* **73**, 1852 (2010), doi: 10.1134/S1063778810110074].
22. A. G. Bogdanov, R. P. Kokoulin, G. Mannocchi, A. A. Petrukhn, O. Saavedra, V. V. Shutenko, G. Trincherro, and I. I. Yashin, *Astropart. Phys.* **98**, 13 (2018), doi: 10.1016/j.astropartphys.2018.01.003
23. Yu. A. Fomin, N. N. Kalmykov, I. S. Karpikov, G. V. Kulikov, M. Yu. Kuznetsov, G. I. Rubtsov, V. P. Sulakov, and S. V. Troitsky, *Astropart. Phys.* **92**, 1 (2017), doi: 10.1016/j.astropartphys.2017.04.001; arXiv: 1609.05764 [astro-ph.HE].
24. A. Aab *et al.* (Pierre Auger Collab.), *Phys. Rev. D* **91**, 032003 (2015), <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.032003>; arXiv: 1408.1421 [astro-ph.HE].
25. A. Aab *et al.* (Pierre Auger Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **117**, 192001 (2016), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.192001>; arXiv: 1610.08509 [hep-ex].
26. S. Müller *et al.* (Pierre Auger Collab.), in *Proceedings of the UHECR2018, Paris, 2018*, id: 65721.
27. H. Ulrich *et al.* (KASCADE Collab.), in *Proceedings of the 27th ICRC, Hamburg, 2001*, Ed. by K.-H. Kampert, G. Hainzelmann, and C. Spiering (Copernicus, Berlin, 2001), ADS: 2001ICRC....1...97U.
28. V. V. Prosin *et al.* (Tunka Collab.), *Nucl. Instrum. Methods A* **756**, 94 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.09.018>
29. J. Bellido for the Pierre Auger Collab., in *Proceedings of the 35th ICRC, Busan, 2017*, PoS (ICRC2017) 506, doi: 10.22323/1.301.0506
30. R. U. Abbasi *et al.* (Telescope Array Collab.), *ApJ* **858**, 76 (2018), <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabad7>; arXiv: 1801.09784 [astro-ph.HE].
31. R. U. Abbasi *et al.* (Telescope Array Collab.), *Phys. Rev. D* **99**, 022002 (2019), <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.022002>; arXiv: 1808.03680 [astro-ph.HE].

32. J. Linsley *et al.*, J. Phys. Soc. Japan **17**, Suppl. A-III, 91 (1962).
33. А. В. Глушков, О. С. Диминштейн, Н. Н. Ефимов и др., *Сб. науч. трудов* (ЯФ СО АН СССР, Якутск, 1976), с. 45.
34. А. В. Глушков, М. И. Правдин, А. В. Сабуров, ЯФ **81**, 535 (2018), <https://doi.org/10.1134/S0044002718040049>
35. K. Greisen, Annu. Rev. Nucl. Sci. **10**, 63 (1960), doi: 10.1146/annurev.ns.10.120160.000431
36. G. Battistoni, S. Muraro, P. R. Sala, F. Cerutti, A. Ferrari, S. Roesler, A. Fasso, and J. Ranft, in *Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006, Fermilab, September 6–8, 2006*, Ed. by M. Albrow and R. Raja; AIP Conf. Proc. **896**, 31 (2007).

ZENITH-ANGULAR CHARACTERISTICS OF AIR SHOWER PARTICLES IN COSMIC RAY EVENTS WITH ENERGY $\sim 10^{18}$ eV ACCORDING TO THE DATA OF THE YAKUTSK ARRAY

A. V. Glushkov¹⁾, K. G. Lebedev¹⁾, A. Saburov¹⁾

¹⁾ Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk, Russia

We present the results of the analysis of the extensive air shower particle lateral distribution obtained from the data of the Yakutsk array. Events were selected with preliminary energy estimation above 10^{18} eV and with fired underground muon detectors with $E_\mu \approx 1.0 \text{ sec } \theta \text{ GeV}$ energy threshold. The analysis covers the period of continuous observation from 1986 to 2016 and includes all events with arrival direction zenith angles $\theta \leq 60^\circ$. Experimentally measured values were compared to those obtained in simulation performed with the use of CORSIKA code within the framework of the QGSJET-01-d hadron interaction model. The whole set of data hints of a probable pure protonic cosmic ray mass composition.