

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ

А. В. Глушков*, М. И. Правдин, А. В. Сабуров

*Институт космофизических исследований и астрономии Якутского научного центра им. Ю. Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук
677891, Якутск, Россия*

Поступила в редакцию 12 ноября 2017 г.,
после переработки 3 октября 2018 г.
Принята к публикации 18 октября 2018 г.

Приведены результаты анализа энергетического спектра космических лучей с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ за период непрерывных наблюдений 1974–2017 гг. Для индивидуальных событий использована уточненная формула оценки энергии первичных частиц. Она получена из расчетов откликов наземных и подземных сцинтилляционных детекторов Якутской установки широких атмосферных ливней в рамках моделей QGSjet-01d, QGSjet-II-04, SIBYLL-2.1 и EPOS-LHC с помощью пакета CORSIKA. Новая оценка E_0 стала заметно меньше по сравнению с ранее использованным ее значением.

DOI: 10.1134/S0044451019030106

1. ВВЕДЕНИЕ

Энергетический спектр космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий ($E_0 \geq 10^{17}$ эВ) является одним из главных звеньев в цепи сложных проблем понимания природы первичных частиц с такой энергией. Экспериментальные результаты, полученные на разных установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) [1–7], различаются между собой по абсолютной интенсивности почти в 2 раза, но близки по форме [8]. Такая ситуация во многом объясняется тем фактом, что большинство крупнейших мировых установок в силу разных способов регистрации ШАЛ используют разные методы определения энергии первичных частиц E_0 . Здесь не обойтись без теоретических представлений о развитии ШАЛ.

Якутская установка является старейшей в мире. Она расположена вблизи Якутска на высоте 100 м над уровнем моря (1020 г/см^2). Первые результаты на прототипе из 13 станций были получены в 1970 г. [9]. Постоянная регистрация широких атмосферных ливней началась в 1973 г. [10–12]. В тот момент 35

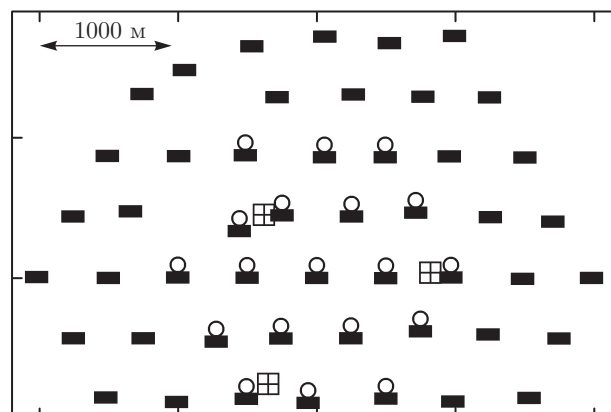


Рис. 1. Общий план расположения детекторов Якутской установки ШАЛ. Прямоугольники — сцинтилляционные наземные детекторы площадью $S = 2 \times 2 \text{ м}^2$; кружки — черенковские детекторы, квадраты с крестом — мюонные детекторы площадью 20 м^2

станций, участвующих в отборе ливней, занимали площадь более 17 км^2 . Станции располагались так, что образовывали сетку из треугольников со стороной 1000 м на всей площади и 500 м в центральной ее части, которая составляла 0.7 км^2 до 1985 г. и 2.6 км^2 после. При реконструкции 1990–1992 гг. об-

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

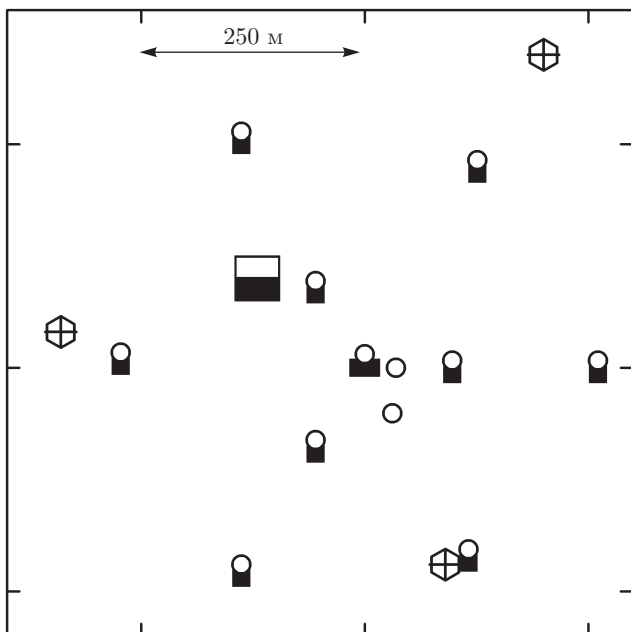


Рис. 2. Подробный план центральной части Якутской установки ШАЛ. Прямоугольники и кружки — то же, что на рис. 1. Большой квадрат — большой мюонный детектор, шестиугольники с крестом — комплексные станции «обскура» с дифференциальным черенковским детектором

шая площадь размещения станций уменьшилась, но их количество возросло почти в 1.5 раза. Сейчас 49 таких станций расположены на площади 8 км², образуя однородную сетку из треугольников со стороной 500 м (рис. 1). Это позволяет исследовать КЛ в интервале $2 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{19}$ эВ с однородными условиями отбора событий по всей площади. В станциях установлено по два сцинтилляционных детектора площадью 2 м² каждый. В центре установки в круге радиусом 250 м в различных пунктах установлены еще 10 таких детекторов, которые не участвуют в отборе событий (рис. 2).

Якутская установка выделяется среди других крупнейших установок своей комплексностью: одновременным измерением всех частиц ШАЛ наземными сцинтилляционными детекторами площадью 2 м², мюонов и черенковского излучения ШАЛ. Измерения плотности мюонов в ливнях на Якутской установке ШАЛ проводятся с 1976 г. [13]. В настоящее время на Якутской установке работает три мюонных детектора площадью 20 м² (рис. 1) и большой мюонный детектор площадью 180 м² (рис. 2). Мюонный детектор представляет собой полуподземное помещение, в котором установлены сцинтилляционные детекторы. Экраном от легких частиц служит

слой грунта толщиной около 2.5 м над потолком. Пороговая энергия регистрируемых мюонов определяется поглощением в грунте и приблизительно равна $1.0 / \cos \theta$ ГэВ.

На Якутской установке с самого начала ведутся измерения потока черенковского излучения ШАЛ с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ [14]. В качестве приемника света используются один или несколько фотоумножителей (ФЭУ-49 с диаметром фотокатода 15 см). Сейчас они установлены на 19 станциях в круге радиусом 1 км и еще 12 дополнительных детекторов расположены в самом центре (рис. 1, 2). Сигналы детекторов центрального круга (как черенковских, так и сцинтилляционных) параллельно поступают на специальный регистратор, который отбирает события меньших энергий ($10^{15} - 10^{17}$ эВ) с помощью детекторов черенковского излучения.

Черенковская компонента содержит в себе информацию приблизительно о 80 % первичной энергии, рассеянной ливнем в атмосфере, и дает возможность определить E_0 квазиэмпирическим калориметрическим методом [15–17], основанным на одновременном измерении в ШАЛ на уровне наблюдения полного потока черенковского излучения, полного числа мюонов и всех частиц наземными сцинтилляционными детекторами (см. разд. 2.2). Впервые такой метод был применен в [18] при энергиях $\sim 10^{15}$ эВ. На Якутской установке он осуществлен в области энергий $E_0 \approx (1.0 - 100) \cdot 10^{17}$ эВ и зенитных углов $\theta \leq 45^\circ$ [14]:

$$E_0 [\text{эВ}] = (4.1 \pm 1.4) \cdot 10^{17} (S_{600}(0^\circ))^{0.97 \pm 0.04}, \quad (1)$$

$$S_{600}(0^\circ) [\text{м}^{-2}] = S_{600}(\theta) \exp\left((\sec \theta - 1) \frac{1020}{\lambda}\right), \quad (2)$$

$$\lambda [\text{г/см}^2] = 400 \pm 45, \quad (3)$$

где $S_{600}(\theta)$ — плотность частиц, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии $R = 600$ м от оси ливня. Позже соотношения (1) и (3) несколько видоизменились [16, 17]:

$$E_0 [\text{эВ}] = (4.8 \pm 1.6) \cdot 10^{17} (S_{600}(0^\circ))^{1.00 \pm 0.02}, \quad (4)$$

$$\lambda [\text{г/см}^2] = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \lg(S_{600}(0^\circ)). \quad (5)$$

Оцениваемый по формуле (4) энергетический спектр КЛ оказался по интенсивности существенно выше всех мировых данных [19]. В работах [20, 21] мы пересмотрели энергетическую калибровку ливней с помощью программы CORSIKA [22] с использованием современных моделей адронных взаимодействий, которая рассмотрена ниже.

2. ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ ЭНЕРГИИ

2.1. Функция пространственного распределения сцинтилляционных детекторов

Основные параметры ШАЛ на Якутской установке (направление прихода, координаты оси, первичная энергия) определяются с помощью функции пространственного распределения (ФПР) всех частиц (электронов, мюонов и высокоэнергичных фотонов), регистрируемых наземными сцинтилляционными детекторами (НСД). Эти частицы проходят через многослойный экран из снега, железа, дерева и дюрала (общая толщина ≈ 2.5 г/см²) и далее через сцинтиллятор толщиной 5 см (плотность 1.06 г/см³), в котором вызывают определенное энерговыделение $\Delta E_s(R)$. Оно пропорционально числу прошедших через детектор частиц и на практике измеряется в условных единицах:

$$\rho_s(R) [\text{м}^{-2}] = \Delta E_s(R)/E_1, \quad (6)$$

где $E_1 = 11.75$ МэВ — энергия, выделяемая в наземном детекторе при прохождении через него одного вертикального релятивистского мюона (единичный отклик).

Сцинтилляционные детекторы калибруются и контролируются с помощью амплитудных спектров плотностей от фоновых космических частиц [23]. При этом используются интегральные спектры двух видов. Первый из них — спектр от одного из детекторов, который управляется соседним детектором, находящимся в той же станции (спектр «двойных совпадений» с частотой $\approx (2-3) \text{ с}^{-1}$). Второй — это спектр без управления с частотой $\approx 200 \text{ с}^{-1}$. Он используется для калибровки мюонных детекторов. Оба спектра имеют степенной вид:

$$F(> \rho) \sim \rho^{-\eta} \sim U^{-\eta}, \quad (7)$$

где $\eta = 1.7$ и 3.1 в первом и во втором случаях; $\rho = U/U_1$ — плотность частиц в единицах амплитуды сигнала U_1 эталонного детектора от вертикальных релятивистских космических мюонов. Процедура калибровки и контроля заключается в постоянном наблюдении за величиной U_1 всех детекторов путем периодических измерений их спектров плотностей. Делается это один раз за двое суток. При этом спектры двойных совпадений снимаются 2 ч, а спектры без управления — 30 мин.

Для получения оценок отклика НСД с помощью кода CORSIKA (версии 7.3700) был разыгран набор ливней, инициированных первичными протона-

ми (p) и ядрами железа (Fe) 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 задавались зенитные углы прихода с $\cos \theta = 1.0, 0.975, 0.95-0.75$ с шагом 0.05. Для каждого набора входных параметров (частица/ $E_0/\cos \theta$) было разыграно по 500 ливней. С целью ускорения расчетов был задействован механизм статистического прореживания (thinning) со следующими параметрами: ограничение по статистическому весу w_{max} в пределах $[10^4, 3.16 \cdot 10^6]$, степень прореживания ε_{thin} — в пределах $[3.16 \cdot 10^{-6}, 10^{-5}]$, в зависимости от энергии ливня. В качестве генераторов адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях были выбраны модели QGSjet-01-d [24], QGSjet-II-04 [25], SIBYLL-2.1 [26] и EPOS-LHC [27]. В качестве модели низких энергий использовался код FLUKA [28].

Для получения пространственного распределения отклика НСД диапазон расстояний от оси ливня был разбит на интервалы ($\log R_j, \log R_j + 0.04$). При обработке результатов симуляции отбирались частицы, дающие вклад в общее энерговыделение в веществе сцинтиллятора — электроны, мюоны¹⁾ и гамма-кванты. В каждом интервале расстояний строился дифференциальный энергетический спектр частиц типа k , $d_k(E, R, \theta)$. Каждому типу частицы соответствует функция энерговыделения в сцинтилляторе $u_k(E, \theta)$, учитывающая все процессы выделения и поглощения энергии в экране и сцинтилляторе и сечения их взаимодействий аналитическими методами с использованием [29]. Сигнал (6) определяется суммой откликов:

$$\rho_s(R) = \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^{I_k} u_k(E_i, \theta_i) d_k(E_i, R, \theta_i), \quad (8)$$

где I_k — число частиц типа k , которые попали в детектор. Получившиеся плотности усреднялись для всего набора начальных входных параметров.

На рис. 3 показаны зависимости величины $\log(S_{600}(0^\circ)/E_0)$ от E_0 для первичных протонов (светлые кружки) и ядер железа (темные кружки) по модели QGSjet-01-d. Они удовлетворяют соотношению

$$E_0 [\text{эВ}] = (3.55 \pm 0.11) \cdot 10^{17} (S_{600}(0^\circ))^{1.02}. \quad (9)$$

Другие модели QGSjet-II-04, EPOS-LHC и SIBYLL-2.1 дают оценки соответственно

$$E_0 [\text{эВ}] = (3.19 \pm 0.11) \cdot 10^{17} (S_{600}(0^\circ))^{1.03}, \quad (10)$$

¹⁾ Под «электронами» и «мюонами» также подразумеваются соответствующие античастицы.

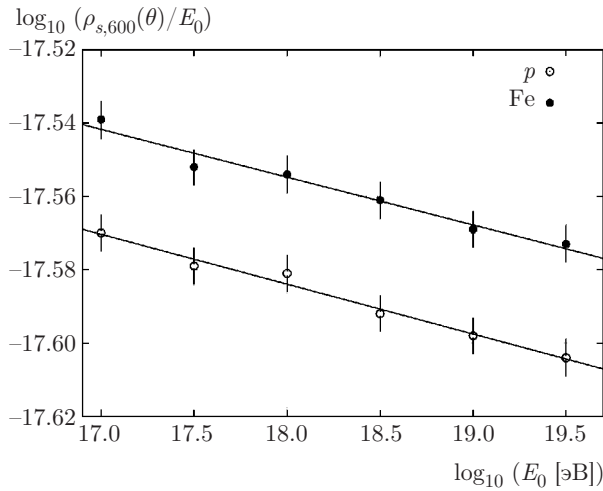


Рис. 3. Зависимости величины $\log_{10}(S_{600}(\theta)/E_0)$ от энергии E_0 для первичных протонов (○) и ядер железа (●) по модели QGSjet-01-d в вертикальных ливнях

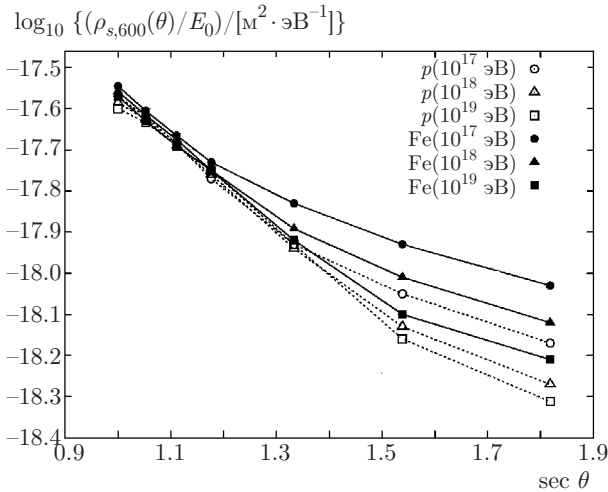


Рис. 4. Зенитно-угловые зависимости величины $\log_{10}(S_{600}(\theta)/E_0)$ по модели QGSjet-01-d для первичных протонов (светлые значки) и ядер железа (темные значки) с энергией $E_0 = 10^{17}$ эВ (○, ●), 10^{18} эВ (△, ▲), 10^{19} эВ (□, ■)

$$E_0 [\text{эВ}] = (2.87 \pm 0.11) \cdot 10^{17} (S_{600}(0^\circ))^{1.03}, \quad (11)$$

$$E_0 [\text{эВ}] = (3.72 \pm 0.11) \cdot 10^{17} (S_{600}(0^\circ))^{1.02}. \quad (12)$$

На рис. 4 изображены зенитно-угловые зависимости величины $\log_{10}(S_{600}(\theta)/E_0)$, вычисленные по модели QGSjet-01-d, которые соответствуют изменениям λ в (2), показанным на рис. 5. Штриховой линией представлены пробеги поглощения для смешанного состава первичных ядер согласно на-

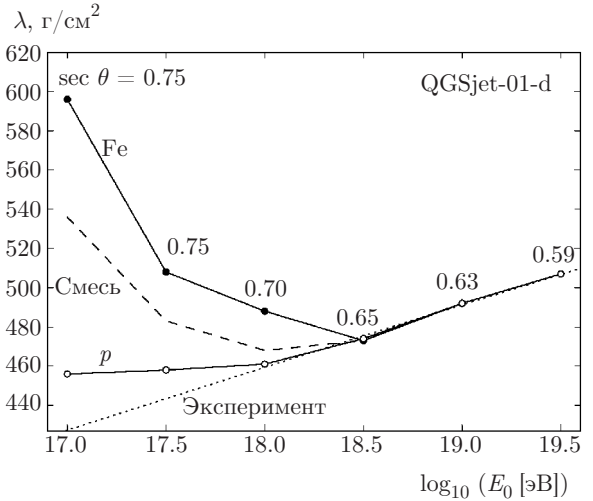


Рис. 5. Значения пробегов поглощения в (2) при пересчете $S_{600}(\theta)$ от наклонных к вертикальным ливням по модели QGSjet-01-d для первичных протонов (p), смешанного состава (штриховая кривая) и ядер железа (Fe) в зависимости от E_0 . Числа — предельно допустимые зенитные углы. Пунктирная кривая — соотношение (5)

шим экспериментальным данным [30, 31]. Пунктирной линией показано эмпирическое соотношение (5).

2.2. Калориметрический метод

Мы рассмотрели этот метод на примере экспериментальных данных [14, 15], взятых за основу при разработке калориметрического метода оценки E_0 на Якутской установке. Первичная энергия находилась в виде суммы:

$$E_0 = E_i + E_{el} + E_\mu + (E_{\mu i} + E_\nu) + E_h, \quad (13)$$

где E_{el} — энергия, пронесимая электромагнитной компонентой и адронами ниже уровня установки; E_μ — энергия мюонов на уровне наблюдения; $E_{\mu i} + E_\nu$ — энергия, рассеянная мюонами над уровнем наблюдения и уносимая образующимися нейтрино; E_h — энергия, передаваемая адронами в разных реакциях.

В табл. 1 и 2 приведены наблюдаемые параметры и основные слагаемые суммы для $E_0 = 10^{18}$ эВ в ливнях с $\cos \theta = 0.95$. Строка «среднее p -Fe» соответствует усредненным между собой величинам в этих таблицах по всем четырем моделям и рассмотренному составу с равными весами. Рассеянная в атмосфере энергия электронно-фотонной компоненты равна

$$E_i = E_\gamma + E_{ion}, \quad (14)$$

Таблица 1. Наблюдаемые параметры ШАЛ с $E_0 = 10^{18}$ эВ и $\cos\theta = 0.95$ от первичных ядер (А) согласно коду CORSICA [22] и экспериментам [14, 15]

Модель	А	$k_\gamma(\theta)$, ($\times 10^4$) эВ ²	$k_{ion}(\theta)$, ($\times 10^4$) эВ ²	$F(\theta)$, ($\times 10^{13}$) эВ ⁻¹	$N_s(\theta)$, ($\times 10^8$)	$S_{600}(\theta)$, м ⁻²	$N_\mu(\theta)$, ($\times 10^6$)
QGSjet-01-d	<i>p</i>	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	<i>p</i>	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	<i>p</i>	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	<i>p</i>	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	<i>p</i>	0.357	2.825	2.074	2.335	2.400	5.185
Среднее	Fe	0.231	2.902	2.164	1.353	2.558	7.028
Среднее	<i>p</i> -Fe	0.294	2.864	2.119	1.844	2.479	6.107
Эксперимент [14, 15]	—	3.700		2.510	1.793	2.656	6.00

Таблица 2. Баланс энергии в ШАЛ с $E_0 = 10^{18}$ эВ и $\cos\theta = 0.95$ от первичных ядер (А) согласно коду CORSICA [22] и экспериментам [14, 15]

Модель	А	E_γ , ($\times 10^{17}$) эВ	E_{ion} , ($\times 10^{17}$) эВ	E_{el} , ($\times 10^{17}$) эВ	E_μ , ($\times 10^{17}$) эВ	ΔE , ($\times 10^{17}$) эВ	E_0 , ($\times 10^{17}$) эВ
QGSjet-01-d	<i>p</i>	0.806	6.620	1.469	0.517	0.565	9.978
	Fe	0.529	6.600	1.306	0.785	0.798	9.972
QGSjet-II-04	<i>p</i>	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	<i>p</i>	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	<i>p</i>	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	<i>p</i>	0.866	6.533	1.487	0.504	0.584	9.974
Среднее	Fe	0.546	6.531	1.313	0.781	0.820	9.968
Среднее	<i>p</i> -Fe	0.706	6.532	1.400	0.643	0.702	9.970
Эксперимент [14, 15]	—	9.287		0.947	0.636	0.860	11.730
Новая оценка	—	7.926		0.947	0.618	0.702	10.190

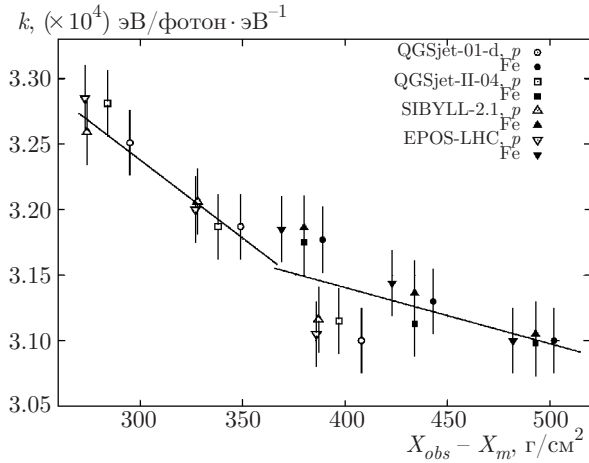


Рис. 6. Зависимости пересчетного коэффициента (16) от расстояния между максимумом ливня X_m и уровнем наблюдения $X_{obs} = 1020 \text{ sec } \theta \text{ г·см}^{-2}$ для первичных протонов (светлые значки) и ядер железа (темные значки) по моделям QGSjet-01-d (кружки), QGSjet-II-04 (квадраты), SIBYLL-2.1 (треугольники вверх) и EPOS-LHC (треугольники вниз). Линии — аппроксимация

где E_γ — энергия гамма-квантов на уровне наблюдения, E_{ion} — суммарные ионизационные потери всех электронов. Энергия E_i пропорциональна полному потоку черенковского излучения F в атмосфере:

$$E_i = kF, \quad (15)$$

где

$$k = k_\gamma + k_{ion} = (E_\gamma + E_{ion})/F \text{ [эВ/фотон·эВ}^{-1}\text{]}. \quad (16)$$

Значения k_γ и k_{ion} в табл. 1 были получены в ходе моделирования развития ШАЛ с помощью кода CORSIKA.

На рис. 6 показаны зависимости пересчетного коэффициента (16) от расстояния между максимумом ливня X_m и уровнем наблюдения $X_{obs} = 1020 \text{ sec } \theta \text{ г·см}^{-2}$. Поток F найден с учетом его ослабления в 1.15 раза за счет рэлеевского рассеяния света в абсолютно чистой атмосфере и ухудшения ее относительной прозрачности для выборки ливней [14, 15] в 1.1 раза. Он дан в интервале излучения 1 эВ:

$$F = 1.265 F_{obs} / \Delta\varepsilon, \quad (17)$$

где F_{obs} — измеренный поток в условиях реального эксперимента,

$$\Delta\varepsilon \text{ [эВ]} = 12400 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \approx 2.58. \quad (18)$$

В нашем случае $\lambda_1 = 3000 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 8000 \text{ \AA}$. Энергия E_{el} пронесится электронно-фотонной компонентой за плоскость установки. Она вычислялась интегрированием дифференциальных энергопотерь по каскадной кривой $N_e(x)$ ниже уровня наблюдения X_{obs} :

$$E_{el} = \int_{X_{obs}}^{\infty} \left(\frac{dE}{dx} \right)_i N_e(x) dx \approx \approx 2.2 \cdot 10^6 N_e(X_{obs}) \int_{X_{obs}}^{\infty} \exp \frac{X_{obs} - x}{\lambda_a} dx, \quad (19)$$

где $N_e(X_{obs})$ — число электронов на уровне наблюдения. Оно находилось из соотношения

$$N_e(X_{obs}) \approx \langle N_s(X_{obs}) \rangle - 1.8 \langle N_\mu(X_{obs}) \rangle, \quad (20)$$

в котором $\langle N_s(X_{obs}) \rangle$ и $\langle N_\mu(X_{obs}) \rangle$ — средние значения полного числа откликов всех частиц и мюонов с порогом больше 1 ГэВ. Коэффициент $2.2 \cdot 10^6 \text{ эВ/г·см}^{-2}$ в (19) равен средним энергопотерям электронов в грунте ниже уровня наблюдения X_{obs} на длине 1 г/см², а подынтегральное выражение определяет суммарный путь всех электронов до их остановки. Эмпирическое соотношение (20) не противоречит рассмотренным моделям.

Энергия мюонов E_μ измерялась экспериментально:

$$E_\mu \approx \langle E_{1\mu} \rangle \langle N_\mu(X_{obs}) \rangle, \quad (21)$$

где $\langle E_{1\mu} \rangle = 10.6 \text{ ГэВ}$ — средняя энергия одного мюона.

Из приведенных в табл. 2 усредненных по всем моделям расчетных значений следует, что суммарная величина $E_i + E_{el} + E_\mu$ составляет примерно 93 % от первичной энергии. Остальная ее часть $\Delta E = (E_{\mu i} + E_\nu) + E_h$ не контролируется экспериментально на Якутской установке. В [14, 15] эта величина взята из более ранних расчетов и грубо не противоречит оценкам кода CORSIKA [22].

В правой колонке табл. 2 даны суммарные значения всех предыдущих компонент. Энергия $E_0 = 1.173 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$ в строке «Эксперимент» превышает ее усредненную модельную величину $\langle E_0 \rangle = 0.997 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$ примерно в 1.177 раза. Это различие возникло из-за завышенного в [14, 15] коэффициента $k = 3.7 \cdot 10^4 \text{ эВ/фотон·эВ}^{-1}$ по сравнению с его расчетной величиной $\langle k \rangle = 3.158 \times 10^4 \text{ эВ/фотон·эВ}^{-1}$. В нижней строке табл. 2 дана новая оценка, $E_0 = 1.019 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$, описанным выше методом калориметрирования с уточненными значениями $E_i = \langle k \rangle F$, $\langle E_{1\mu} \rangle = 10.3 \text{ ГэВ}$ и ΔE . Она

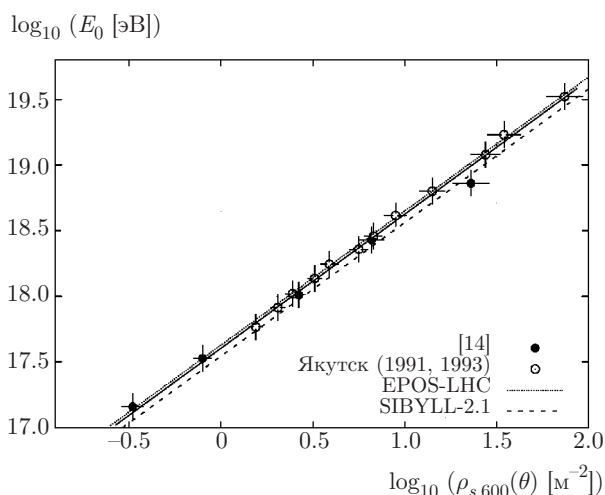


Рис. 7. Зависимости первичной энергии E_0 от параметра $S_{600}(\theta)$ в ливнях с $\langle \cos \theta \rangle = 0.95$ по данным [14] (темные кружки) и [15] (светлые кружки) с новым калориметрированием. Сплошная линия — наилучшая аппроксимация всех данных. Штриховая и пунктирная линии — соотношения (11) и (12) для указанного зенитного угла

показана вместе с другими данными [14] на рис. 7 темными кружками. Светлыми кружками изображены данные [15] с пересмотренными величинами F и E_{ion} за счет уточнения прозрачности атмосферы и использования нового коэффициента k (см. рис. 6). Сплошная линия — зависимость

$$E_0 [\text{эВ}] = (3.76 \pm 0.31) \cdot 10^{17} (S_{600}(0^\circ))^{1.02 \pm 0.02}, \quad (22)$$

удовлетворяющая всем экспериментальным точкам при пересчете $S_{600}(18.2^\circ)$ на вертикаль по формуле (2) с пробегами поглощения λ , изображенными на рис. 5 штриховой кривой (для смешанного состава первичных частиц). Штриховой и пунктирной линиями на рис. 7 изображены соотношения (11) и (12), характеризующие пределы применимости рассмотренных выше моделей развития ШАЛ. Ближе всех к экспериментальным данным значения по моделям QGSJet-01-d и SIBYLL-2.1.

3. ПЕРВИЧНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

Мы рассмотрели более 10^6 ливней, зарегистрированных за период 1974–2017 гг. непрерывной работы Якутской установки. Использована методика построения спектра [32]. Энергия индивидуальных событий находилась по уточненной калориметрической формуле (22), которая слабо зависит от моделей развития ШАЛ и базируется на близких между

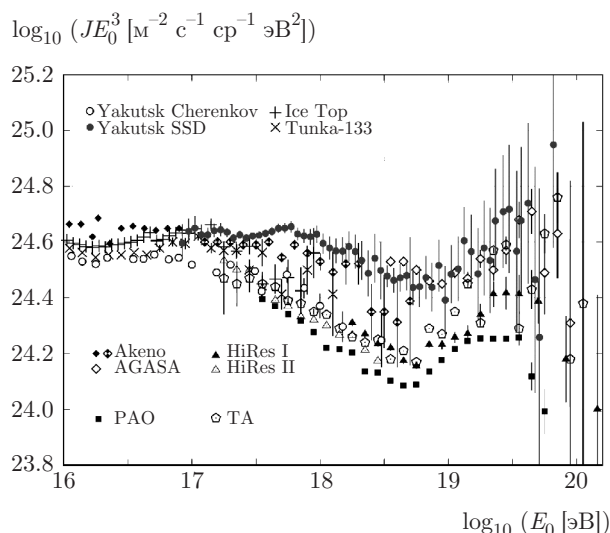


Рис. 8. Дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным разных мировых установок. Темные и светлые кружки — результаты Якутской установки настоящей работы и по черенковскому излучению ШАЛ [33]. Темные, перечеркнутые и светлые ромбы — Akeno (1984, 1992) [34,35] и AGASA [36]. Косые и прямые кресты — Тунка-133 [37] и Ice Top [38]. Темные и светлые треугольники — HiRes I [6] и HiRes II [39]. Светлые пятиугольники — Telescope Array [40]

собой результатах (см. табл. 2). Пробеги поглощения брались из расчетов рис. 5 для реального смешанного состава первичных частиц [30, 31]. Полученный спектр показан на рис. 8 темными кружками. Светлыми кружками изображен спектр [33], полученный на Якутской установке из черенковского излучения ШАЛ. Темными, перечеркнутыми и светлыми ромбами представлены данные Akeno (1984, 1992) [34,35] и AGASA [36]. Косыми и прямыми крестами показаны спектры установок Тунка-133 [37] и Ice Top [38]. Темными и светлыми треугольниками изображены данные HiRes I [6] и HiRes II [39]. Темными квадратами представлен спектр PAO [7], светлыми пятиугольниками — Telescope Array [40].

Наш спектр и Akeno–AGASA [34–36] в пределах ошибок экспериментов согласуются между собой во всем диапазоне измеряемых энергий. Возможно, это обусловлено тем, что на обеих установках использовались схожие сцинтилляционные детекторы и методики анализа данных. С данными с установок Тунка-133 [37] и Ice Top [38] наблюдается хорошее согласие при $E_0 \approx 10^{17}$ эВ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование кода CORSIKA применительно к Якутской установке ШАЛ позволило критически

рассмотреть ее энергетическую калибровку, которая длительное время была предметом дискуссий и разногласий с коллегами, работающими на других мировых установках. Это стало возможным благодаря доступности современных моделей развития ШАЛ широкому кругу исследователей, с помощью таких моделей нам удалось вычислить отклики сцинтилляционных детекторов и на их основе получить некоторый набор возможных оценок первичной энергии (9)–(12). Расчеты показали, что в выражениях (1) и (4) энергия, рассеянная в атмосфере в виде электромагнитной компоненты, завышена на (12–17)% в зависимости от глубины максимума ливня X_m (рис. 4), а в (4) это различие усугублено дополнительно за счет переоценки прозрачности атмосферы в худшую сторону примерно на 17%. Новое калориметрирование (22) привело к уменьшению оценки E_0 по сравнению с (4) приблизительно в 1.28 раза и к существенному снижению интенсивности энергетического спектра, измеренного на Якутской установке ШАЛ (рис. 8).

Работа поддержана программой Президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика» и грантом РФФИ 16-29-13019 офи-м.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. M. Edge, A. C. Evans, H. J. Garmston, R. J. O. Reid, A. A. Watson, J. G. Wilson, and A. M. Wray, *J. Phys. A* **6**, 1612 (1973).
2. A. V. Glushkov, V. M. Grigoriev, M. N. Dyakonov, T. A. Egorov, V. P. Egorova, A. N. Efimov, N. N. Efimov, N. N. Efremov, A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, A. D. Krasilnikov, I. T. Makarov, V. N. Pavlov, P. D. Petrov, M. I. Pravdin, I. Ye. Sleptsov, and N. I. Sleptsov, in *Proc. 20th ICRC*, Moscow (1987), Vol. 5, p. 494.
3. N. Sakaki et al. (AGASA Collaboration), in *Proc. 27th ICRC*, Hamburg (2001), Vol. 1, p. 333.
4. R. U. Abbasi et al. (HiRes Experiment), *Astropart. Phys.* **23**, 157 (2005), doi:10.1016/j.astropartphys.2004.12.006.
5. V. P. Egorova, A. V. Glushkov, A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, A. D. Krasilnikov, I. T. Makarov, A. A. Mikhailov, V. V. Olzoev, M. I. Pravdin, A. V. Sabourov, I. Ye. Sleptsov, and G. G. Struchkov, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **136C**, 3 (2004).
6. Y. Tsunesada et al. (Telescope Array Collaboration), in *Proc. 32nd ICRC*, Beijing (2011), Vol. 12, p. 67; arXiv:1111.2507[astro-ph.HE].
7. P. Abreu, M. Aglietta, E. J. Ahn, I. F. M. Albuquerque et al. (Pierre Auger Collaboration), in *Proc. 32nd ICRC*, Beijing (2011); arXiv:1107.4809[astro-ph.HE].
8. А. В. Глушков, М. И. Правдин, Письма в ЖЭТФ **87**, 406 (2008) [A. V. Glushkov and M. I. Pravdin, *JETP Lett.* **87**, 345 (2008), doi:10.1134/S0021364008070023].
9. T. A. Egorov, N. N. Efimov, V. A. Kolosov et al., in *Proc. 12th ICRC*, Hobart (1971), p. 2059.
10. N. N. Efimov, T. A. Egorov, D. D. Krasilnikov, M. I. Pravdin, and I. Ye. Sleptsov, *Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays*, Word Data Center C2, Japan, № 3, p. 56 (1988).
11. М. Н. Дьяконов, Н. Н. Ефимов, Т. А. Егоров и др., в кн. *Космическое излучение предельно высокой энергии*, Наука, Новосибирск (1991), с. 254.
12. В. П. Артамонов, Б. Н. Афанасьев, А. В. Глушков и др., *Изв. РАН, сер. физ.* **58**(12), 92 (1994).
13. A. V. Glushkov, I. T. Makarov, E. S. Nikiforova, M. I. Pravdin, and I. Ye. Sleptsov, *Astropart. Phys.* **4**, 15 (1995).
14. А. В. Глушков, Дисс. ... канд. физ.-матем. наук, НИИЯФ МГУ (1982).
15. А. В. Глушков, М. Н. Дьяконов, Т. А. Егоров, Н. Н. Ефимов, Н. Н. Ефремов, С. П. Кнуренко, В. А. Колосов, И. Т. Макаров, В. Н. Павлов, П. Д. Петров, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов, *Изв. АН СССР, сер. физ.* **55**, 713 (1991).
16. T. A. Egorov et al. (Yakutsk Collaboration), in *Proc. of the Tokyo Workshop on Techniques for the Study of Extremely High Energy Cosmic Rays*, Tokyo (1993).
17. A. V. Glushkov, V. P. Egorova, A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, A. D. Krasilnikov, I. T. Makarov, A. A. Mikhailov, V. V. Olzoyev, V. V. Pisarev, M. I. Pravdin, A. V. Sabourov, I. E. Sleptsov, and G. G. Struchkov, in *Proc. 28th ICRC*, Tsukuba (2003), Vol. 1, p. 393.
18. S. I. Nikolsky, in *Proc. 5th Int. Seminar on Cosmic Rays*, La Paz (1962), Vol. 2, p. 48.
19. V. P. Egorova, A. V. Glushkov, S. P. Knurenko et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **136C**, 3 (2004).
20. А. В. Глушков, М. И. Правдин, А. В. Сабуров, Письма в ЖЭТФ **99**, 501 (2014) [A. V. Glushkov, M. I. Pravdin, and A. V. Saburov, *JETP Lett.* **99**, 431 (2014), doi:10.1134/S0021364014080086].

21. A. V. Glushkov, V. I. Pravdin, and A. Sabourov, *Phys. Rev. D* **90**, 012005 (2014), doi:10.1103/PhysRevD.90.012005.
22. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, *CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers*, FZKA 6019, Forschungszentrum Karlsruhe (1988).
23. А. В. Глушков, О. С. Диминштейн, Т. А. Егоров, Н. Н. Ефимов, Л. И. Каганов, Д. Д. Красильников, С. В. Максимов, В. А. Орлов, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов, в сб. науч. трудов *Экспериментальные методы исследований космических лучей сверхвысоких энергий*, ЯФ СО АН СССР, Якутск (1974), с. 43.
24. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **52**, 17 (1997).
25. S. Ostapchenko, *Phys. Rev. D* **83**, 014018 (2011).
26. E.-J. Ahn, R. Engel, T. K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, *Phys. Rev. D* **80**, 094003 (2009).
27. T. Pierog, Iu. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko, and K. Werner, *Phys. Rev. C* **92**, 034906 (2015), doi:10.1103/PhysRevC.92.034906.
28. G. Battistoni, S. Muraro, P. R. Sala, F. Cerutti, A. Ferrari, S. Roesler, A. Fassò, and J. Ranft, *Proc. of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006*, Fermilab, ed. by M. Albrow and R. Raja, AIP Conf. Proc. **896**, 31 (2007).
29. *Particle Data Group. Atomic and Nuclear Properties of Materials for more than 300 Materials*, Электронный ресурс, 2012. URL: <http://pdg.lbl.gov/2013/AtomicNuclearProperties/index.html>.
30. А. В. Глушков, А. В. Сабуров, *Письма в ЖЭТФ* **100**, 793 (2014) [A. V. Glushkov and A. V. Sabourov, *JETP Lett.* **100**, 696 (2015), doi:10.1134/S0021364014230052].
31. A. Sabourov, A. Glushkov, M. Pravdin, Y. Egorov, A. Ivanov, S. Knurenko, V. Mokhnachevskaya, I. Petrov, and L. Timofeev, in *Proc. 35th ICRC*, Busan, Korea (2017), PoS(ICRC2017)553.
32. А. В. Глушков, М. И. Правдин, *ЖЭТФ* **128**, 103 (2005) [A. V. Glushkov and M. I. Pravdin, *JETP* **101**, 88 (2005), doi:10.1134/1.2010665].
33. S. Knurenko and A. Sabourov, *EPJ Web of Conf.* **53**, 04004 (2013), doi:10.1051/epjconf/20135304004.
34. M. Nagano, T. Hara, Y. Hatano, N. Hayashida, S. Kawaguchi, K. Kamata, K. Kifune, Y. Mizumoto et al., *J. Phys. G* **10**, 1295 (1984).
35. M. Nagano, M. Teshima, Y. Matsubara, H. Y. Dai, T. Hara, N. Hayashida, M. Honda, H. Ohoka, and S. Yoshida, *J. Phys. G* **18**, 423 (1992).
36. K. Shinozaki (for AGASA Collaboration), *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **151**, 3 (2006).
37. S. F. Berezhnev, D. Besson, N. M. Budnev et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **692**, 98 (2012), doi:10.1016/j.nima.2011.12.091.
38. M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), *Phys. Rev. D* **88**, 042004 (2013), doi:10.1103/PhysRevD.88.042004.
39. Z. Zundel et al. (Telescope Array Collaboration), in *Proc. 34th ICRC*, Netherlands (2015), PoS(ICRC2015)445.
40. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma et al., *Astropart. Phys.* **80**, 131 (2016), doi:10.1016/j.astropartphys.2016.04.002.