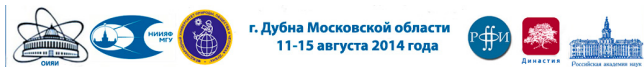


# Переоценка энергии широких атмосферных ливней на Якутской установке методом калориметрирования

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

Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН

33-я Всероссийская конференция по космическим лучам



- 1 Мотивация
- 2 Пространственное распределение сигнала детекторов
- 3 Калориметрический метод
- 4 Обсуждение полученных результатов
- 5 Заключение

# Мотивация

$\rho_{s,600} \rightarrow E_0$ :

Якутск (1978), Глушков (1982):

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

$$\rho_{s,600}(0^\circ) = \rho_{s,600}(\theta) \times \exp\left(\frac{(\sec \theta - 1) \cdot x_0}{\lambda_\rho}\right), \quad (2)$$

$$\lambda_\rho = 400 \pm 45 \text{ (г/см}^2\text{)}, \quad (3)$$

$\rho_{s,600} \rightarrow E_0$ :

Якутск (1978), Глушков (1982):

$$E_0 = (4.1 \pm 1.4) \times 10^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{0.97 \pm 0.04} \text{ (ЭВ)}, \quad (1)$$

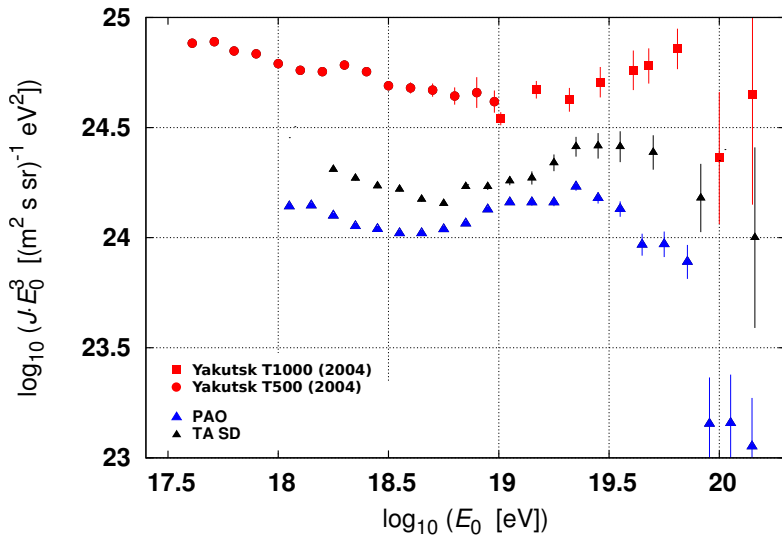
$$\rho_{s,600}(0^\circ) = \rho_{s,600}(\theta) \times \exp\left(\frac{(\sec \theta - 1) \cdot x_0}{\lambda_\rho}\right), \quad (2)$$

$$\lambda_\rho = 400 \pm 45 \text{ (г/см}^2\text{)}, \quad (3)$$

Якутск (1991, 1993, 2003)

$$E_0 = (4.8 \pm 1.6) \times 10^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.0 \pm 0.02}, \quad (4)$$

$$\lambda_\rho = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \cdot \log_{10} \rho_{s,600}(0^\circ). \quad (5)$$

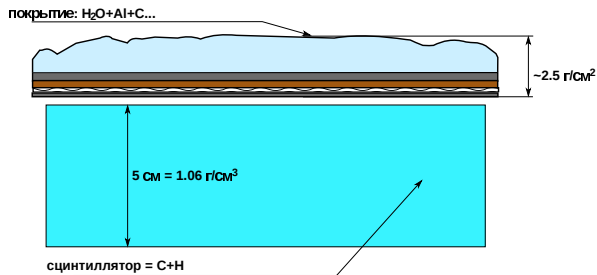


# Пространственное распределение сигнала детекторов

энерговыведение в  
детекторе  $\Delta E_s(R)$ :

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

$E_1 = 11.75$  МэВ (единица  
отклика).

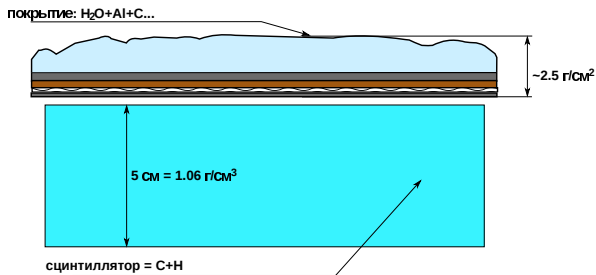




энерговыведение в детекторе  $\Delta E_s(R)$ :

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

$E_1 = 11.75$  МэВ (единица отклика).



CORSIKA (v. 6.7370): QGSJet01d, QGSJet-II-04, SIBYLL-2.1, EPOS-LHC + FLUKA

$E_0 \in [10^{17} - 10^{19.5}]$  с шагом  $\Delta \log_{10} E_0 = 0.5$  (по 500 ливней для каждого набора входных параметров).

thin sampling:  $\epsilon_{\text{thin}} = 3.16 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$ ,  $w_{\text{max}} = 10^4 - 3.16 \cdot 10^6$ .

$u_m(\epsilon, \theta)$ : отклик одной частицы типа  $m$  ( $m = e^{+/-}, \mu^{+/-}, \gamma$ )

основные физические процессы:

$u_m(\epsilon, \theta)$ : отклик одной частицы типа  $m$  ( $m = e^{+/-}, \mu^{+/-}, \gamma$ )

основные физические процессы:

- $e^{+/-}$ :
  - ионизация
  - bremsstrahlung

$u_m(\epsilon, \theta)$ : отклик одной частицы типа  $m$  ( $m = e^{+/-}, \mu^{+/-}, \gamma$ )

### основные физические процессы:

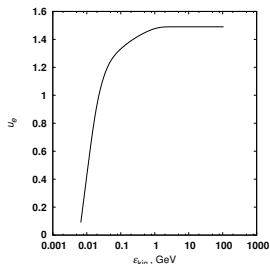
- $e^{+/-}$ :
  - ионизация
  - bremsstrahlung
- $\mu^{+/-}$ :
  - ионизация

$u_m(\epsilon, \theta)$ : отклик одной частицы типа  $m$  ( $m = e^{+/-}, \mu^{+/-}, \gamma$ )

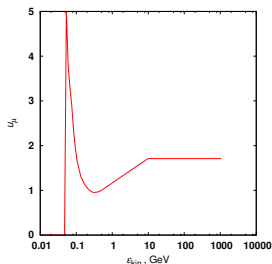
### основные физические процессы:

- $e^{+/-}$ :
  - ионизация
  - bremsstrahlung
- $\mu^{+/-}$ :
  - ионизация
- $\gamma$ :
  - $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$
  - $\delta e^{+/-}$

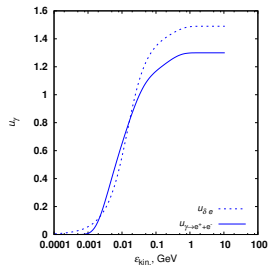
# Оценка отклика в наземных детекторах



$$\rho_e(R) = \sum_i u_e(\epsilon_i, \theta_i) d(\epsilon_i, R, \theta_i)$$

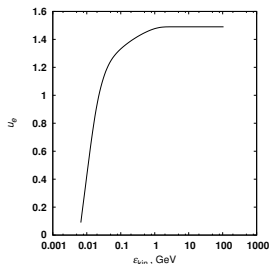


$$\rho_\mu(R) = \sum_i u_\mu(\epsilon_i, \theta_i) d(\epsilon_i, R, \theta_i)$$

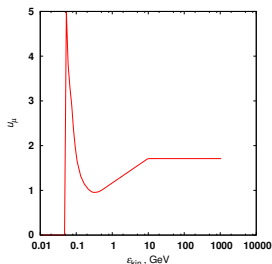


$$\rho_\gamma(R) = \sum_i (u_{\delta e} + u_{\gamma \rightarrow e^+ e^-}) d(\epsilon_i, R, \theta_i)$$

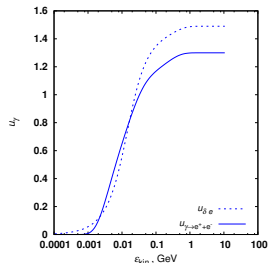
# Оценка отклика в наземных детекторах



$$\rho_e(R) = \sum_i u_e(\epsilon_i, \theta_i) d(\epsilon_i, R, \theta_i)$$



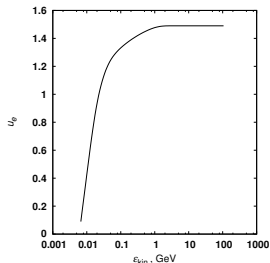
$$\rho_\mu(R) = \sum_i u_\mu(\epsilon_i, \theta_i) d(\epsilon_i, R, \theta_i)$$



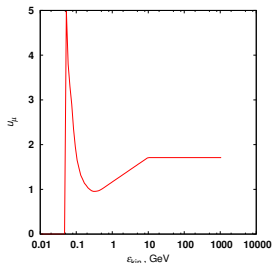
$$\rho_\gamma(R) = \sum_i (u_{\delta e} + u_{\gamma \rightarrow e^+ + e^-}) d(\epsilon_i, R, \theta_i)$$

$u_m(\epsilon, \theta) \rightarrow \text{CORSIKA} \rightarrow d_m(\epsilon, R, \theta)$  для интервалов  $(\log_{10} R_j, \log_{10} R_j + 0.04)$ . Сигнал (6) на расстоянии  $R$ :

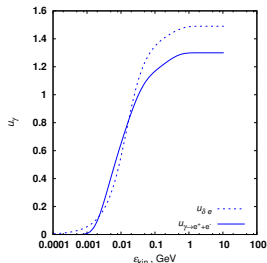
# Оценка отклика в наземных детекторах



$$\rho_e(R) = \sum_i u_e(\epsilon_i, \theta_i) d(\epsilon_i, R, \theta_i)$$



$$\rho_\mu(R) = \sum_i u_\mu(\epsilon_i, \theta_i) d(\epsilon_i, R, \theta_i)$$



$$\rho_\gamma(R) = \sum_i (u_{\delta e} + u_{\gamma \rightarrow e^+ + e^-}) d(\epsilon_i, R, \theta_i)$$

$u_m(\epsilon, \theta) \rightarrow \text{CORSIKA} \rightarrow d_m(\epsilon, R, \theta)$  для интервалов  $(\log_{10} R_j, \log_{10} R_j + 0.04)$ . Сигнал (6) на расстоянии  $R$ :

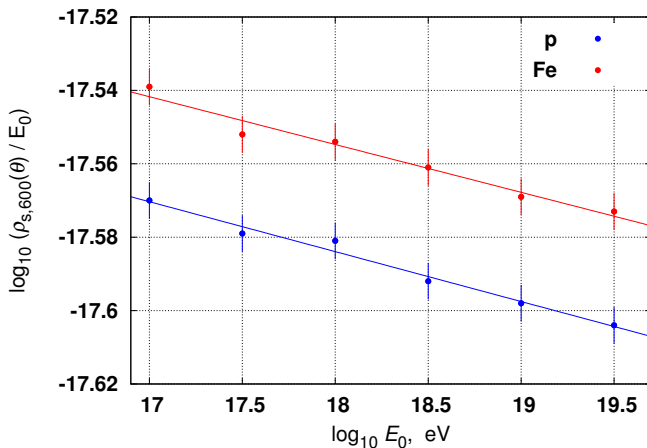
$$\rho_s(R) = \sum_m^3 \sum_{i=1}^{l_m} u_m(\epsilon_i, \theta_i) d_m(\epsilon_i, R, \theta_i), \quad (7)$$

$l_m$  — число частиц типа  $m$  на расстоянии  $R$ .



# QGSJet01d (вертикальные ливни):

$$E_0 = (3.24 \pm 0.1) \times 10^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.015}, \quad (8)$$



QGSJet-II-04, SIBYLL-2.1, EPOS-LHC:

$$E_0 = (3.52 \pm 0.1) \times 10^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02}, \quad (9)$$

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

$$E_0 = (3.74 \pm 0.1) \times 10^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02}, \quad (11)$$

QGSJet-II-04, SIBYLL-2.1, EPOS-LHC:

$$E_0 = (3.52 \pm 0.1) \times 10^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02}, \quad (9)$$

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

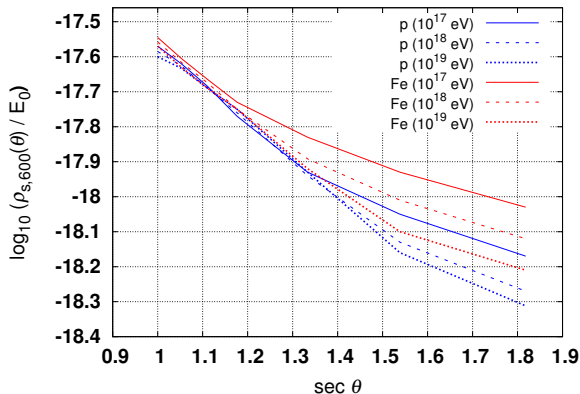
$$E_0 = (3.74 \pm 0.1) \times 10^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02}, \quad (11)$$

Усредненная по всем моделям оценка:

$$E_0 = (3.40 \pm 0.18)^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.017}, \quad (12)$$

что ниже оценки (1) в 1.20 раза и ниже (4) в 1.41 раз.

## Зенитно-угловая зависимость (QGSJet01d)



Линейная зависимость:

$$\lambda_p = 415 \pm 15 \text{ г/см}^2$$

$$\sec \theta < \sec \theta_{\text{lim}} = a + b \log \rho_{s,600}(\theta),$$

# Калориметрический метод

Энергия, рассеянная э/м компонентой в атмосфере:

$$E_i = E_\gamma + E_{\text{ион.}}$$

$$E_i = k \cdot F,$$

$F$  — полный поток черенковского света,  $k$  — масштабный коэффициент.

Энергия, рассеянная э/м компонентой в атмосфере:

$$E_i = E_\gamma + E_{\text{ion.}}$$

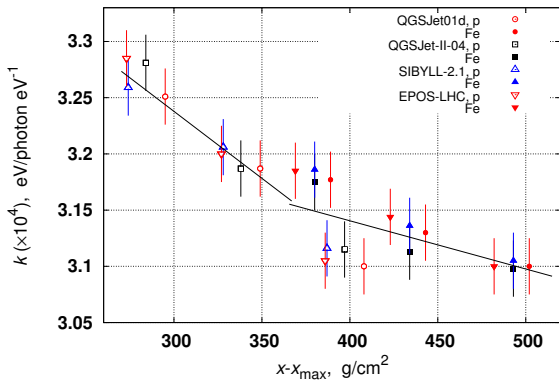
$$E_i = k \cdot F,$$

$F$  — полный поток черенковского света,  $k$  — масштабный коэффициент.

Масштабный коэффициент  $k$ :

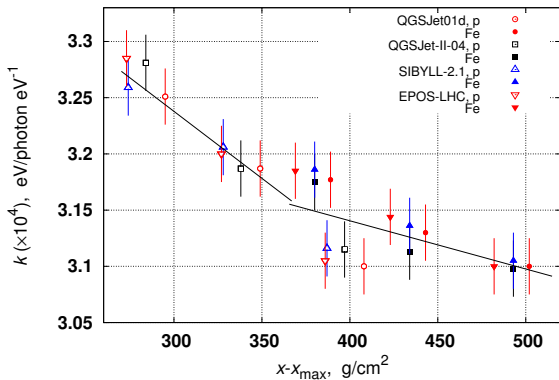
$$k = k_\gamma + k_{\text{ion.}} = \frac{E_\gamma + E_{\text{ion.}}}{F}$$

Зависимость масштабного коэффициента  $k$  от расстояния между  $x_{\max}$  и  $x_{\text{obs}}$ . для протонов и ядер железа:





Зависимость масштабного коэффициента  $k$  от расстояния между  $x_{\max}$  и  $x_{\text{obs.}}$  для протонов и ядер железа:



$$F = \frac{1.265 F_{\text{obs.}}}{\Delta\epsilon},$$

$$\Delta\epsilon = 12400 \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \simeq 2.58$$

$$\lambda_1 = 3000 \text{ \AA},$$

$$\lambda_2 = 8000 \text{ \AA}.$$

Энергия, проносимая  $e^{+/-}$  к уровню наблюдения:

$$\begin{aligned} E_{\text{el.}} &= \int_{x_{\text{obs.}}}^{\infty} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion.}} \cdot N_e(x) dx \simeq \\ &\simeq 2.2 \times 10^6 \cdot N_e(x_{\text{obs.}}) \times \\ &\quad \int_{x_{\text{obs.}}}^{\infty} \exp\left(\frac{x_{\text{obs.}} - x}{\langle \lambda_N \rangle}\right) dx \\ \langle \lambda_N \rangle &\simeq 240 \text{ г/см}^2. \end{aligned}$$

Энергия, проносимая  $e^{+/-}$  к уровню наблюдения:

$$\begin{aligned} E_{\text{el.}} &= \int_{x_{\text{obs.}}}^{\infty} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion.}} \cdot N_e(x) dx \simeq \\ &\simeq 2.2 \times 10^6 \cdot N_e(x_{\text{obs.}}) \times \\ &\quad \int_{x_{\text{obs.}}}^{\infty} \exp\left(\frac{x_{\text{obs.}} - x}{\langle \lambda_N \rangle}\right) dx \\ \langle \lambda_N \rangle &\simeq 240 \text{ г/см}^2. \end{aligned}$$

Число электронов на уровне наблюдения:

$$N_e(x_{\text{obs.}}) \simeq \langle N_s(x_{\text{obs.}}) \rangle - 1.8 \cdot \langle N_{\mu}(x_{\text{obs.}}) \rangle.$$

Энергия, проносимая  $e^{+/-}$  к уровню наблюдения:

$$\begin{aligned} E_{el.} &= \int_{x_{obs.}}^{\infty} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{ion.} \cdot N_e(x) dx \simeq \\ &\simeq 2.2 \times 10^6 \cdot N_e(x_{obs.}) \times \\ &\quad \int_{x_{obs.}}^{\infty} \exp\left(\frac{x_{obs.} - x}{\langle \lambda_N \rangle}\right) dx \\ \langle \lambda_N \rangle &\simeq 240 \text{ г/см}^2. \end{aligned}$$

Число электронов на уровне наблюдения:

$$N_e(x_{obs.}) \simeq \langle N_s(x_{obs.}) \rangle - 1.8 \cdot \langle N_\mu(x_{obs.}) \rangle.$$

Экспериментально измеренная энергия  $\mu^{+/-}$ :

$$\begin{aligned} E_\mu &= \langle E_{1\mu} \rangle \cdot \langle N_\mu(x_{obs.}) \rangle, \\ \langle E_{1\mu} \rangle &= 10.6 \text{ GeV}. \end{aligned}$$

Таблица 1: наблюдаемые параметры ШАЛ с  $E_0 = 10^{18}$  эВ и  $\cos \theta = 0.95$  от первичных ядер  $A$  согласно моделям и эксперименту (оценка Якутск-1982):

модель	$A$	$k_\gamma(\theta)$ ( $\times 10^4$ ) эВ <sup>2</sup>	$k_{\text{ион.}}(\theta)$ ( $\times 10^4$ ) эВ <sup>2</sup>	$F(\theta)$ ( $\times 10^{13}$ ) эВ <sup>-1</sup>	$\langle N_S(\theta) \rangle$ ( $\times 10^8$ )	$\rho_{s,600}(\theta)$ м <sup>-2</sup>	$\langle N_\mu(\theta) \rangle$ ( $\times 10^6$ )
QGSJet01d	p	0.341	2.846	2.104	2.178	2.312	5.000
	Fe	0.224	2.910	2.148	1.250	2.432	7.225
QGSJet-II-04	p	0.364	2.816	2.070	2.296	2.438	5.582
	Fe	0.246	2.894	2.148	1.358	2.636	7.777
SIBYLL-2.1	p	0.345	2.822	2.100	2.512	2.193	4.254
	Fe	0.224	2.910	2.228	1.384	2.249	4.930
EPOS-LHC	p	0.377	2.815	2.023	2.355	2.655	5.905
	Fe	0.230	2.894	2.133	1.419	2.917	8.180
среднее	p	0.357	2.825	2.074	2.335	2.400	5.185
	Fe	0.231	2.902	2.164	1.353	2.558	7.028
	p-Fe	0.294	2.864	2.119	1.844	2.479	6.107
эксперимент	–	3.700		2.510	1.793	2.656	6.000

Таблица 2: энергетический баланс ШАЛ ( $E_0 = 10^{18}$  эВ и  $\cos \theta = 0.95$ ) от первичных ядер (A) согласно расчетам и эксперименту (Якутск-1982):

модель	A	$E_\gamma$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{\text{ион.}}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{el}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_\mu$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$\Delta E$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_0$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ
QGSJet01d	p	0.806	6.620	1.469	0.517	0.565	9.978
	Fe	0.529	6.660	1.306	0.785	0.798	9.972
QGSJetII-04	p	0.859	6.476	1.474	0.547	0.624	9.980
	Fe	0.582	6.430	1.302	0.844	0.866	9.981
SIBYLL-2.1	p	0.909	6.625	1.523	0.428	0.491	9.976
	Fe	0.528	6.679	1.340	0.702	0.716	9.965
EPOS-LHC	p	0.891	6.412	1.482	0.524	0.657	9.966
	Fe	0.543	6.415	1.305	0.794	0.898	9.955
среднее	p	0.866	6.533	1.487	0.504	0.584	9.974
	Fe	0.546	6.531	1.313	0.781	0.820	9.968
	p-Fe	0.706	6.532	1.400	0.643	0.702	9.970
эксперимент	–	9.287		0.947	0.636	0.860	11.730
новая оценка	–	7.926		0.947	0.618	0.702	10.190

Таблица 2: энергетический баланс ШАЛ ( $E_0 = 10^{18}$  эВ и  $\cos \theta = 0.95$ ) от первичных ядер (A) согласно расчетам и эксперименту (Якутск-1982):

модель	A	$E_\gamma$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{\text{ion}}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{\text{el}}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_\mu$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$\Delta E$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_0$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ
QGSJet01d	p	0.806	6.620	1.469	0.517	0.565	9.978
	Fe	0.529	6.660	1.306	0.785	0.798	9.972
QGSJetII-04	p	0.859	6.476	1.474	0.547	0.624	9.980
	Fe	0.582	6.430	1.302	0.844	0.866	9.981
SIBYLL-2.1	p	0.909	6.625	1.523	0.428	0.491	9.976
	Fe	0.528	6.679	1.340	0.702	0.716	9.965
EPOS-LHC	p	0.891	6.412	1.482	0.524	0.657	9.966
	Fe	0.543	6.415	1.305	0.794	0.898	9.955
среднее	p	0.866	6.533	1.487	0.504	0.584	9.974
	Fe	0.546	6.531	1.313	0.781	0.820	9.968
	p-Fe	0.706	6.532	1.400	0.643	0.702	9.970
эксперимент	–	9.287		0.947	0.636	0.860	11.730
новая оценка	–	7.926		0.947	0.618	0.702	10.190

Из данных таблицы видно, что  $E_i + E_{\text{el.}} + E_\mu \simeq 93\%(E_0)$   
 $\Delta E$  — не контролируется экспериментом.

# Обсуждение



модель	A	$E_\gamma$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{\text{ion}}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{el}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_\mu$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$\Delta E$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_0$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ
QGSJet01d	p	0.806	6.620	1.469	0.517	0.565	9.978
	Fe	0.529	6.660	1.306	0.785	0.798	9.972
QGSJetII-04	p	0.859	6.476	1.474	0.547	0.624	9.980
	Fe	0.582	6.430	1.302	0.844	0.866	9.981
SIBYLL-2.1	p	0.909	6.625	1.523	0.428	0.491	9.976
	Fe	0.528	6.679	1.340	0.702	0.716	9.965
EPOS-LHC	p	0.891	6.412	1.482	0.524	0.657	9.966
	Fe	0.543	6.415	1.305	0.794	0.898	9.955
среднее	p	0.866	6.533	1.487	0.504	0.584	9.974
	Fe	0.546	6.531	1.313	0.781	0.820	9.968
	p-Fe	0.706	6.532	1.400	0.643	0.702	9.970
эксперимент	-	9.287		0.947	0.636	0.860	11.730
новая оценка	-	7.926		0.947	0.618	0.702	10.190

Таблица 2, строка „эксперимент“:  $\sum E = 1.173 \times 10^{18}$  эВ,  
 $\langle E_0 \rangle = 0.997 \times 10^{18}$  эВ

модель	A	$E_\gamma$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{\text{ion}}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{el}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_\mu$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$\Delta E$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_0$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ
QGSJet01d	p	0.806	6.620	1.469	0.517	0.565	9.978
	Fe	0.529	6.660	1.306	0.785	0.798	9.972
QGSJetII-04	p	0.859	6.476	1.474	0.547	0.624	9.980
	Fe	0.582	6.430	1.302	0.844	0.866	9.981
SIBYLL-2.1	p	0.909	6.625	1.523	0.428	0.491	9.976
	Fe	0.528	6.679	1.340	0.702	0.716	9.965
EPOS-LHC	p	0.891	6.412	1.482	0.524	0.657	9.966
	Fe	0.543	6.415	1.305	0.794	0.898	9.955
среднее	p	0.866	6.533	1.487	0.504	0.584	9.974
	Fe	0.546	6.531	1.313	0.781	0.820	9.968
	p-Fe	0.706	6.532	1.400	0.643	0.702	9.970
эксперимент	-	9.287		0.947	0.636	0.860	11.730
новая оценка	-	7.926		0.947	0.618	0.702	10.190

Таблица 2, строка „эксперимент“:  $\sum E = 1.173 \times 10^{18}$  эВ,  
 $\langle E_0 \rangle = 0.997 \times 10^{18}$  эВ  
разница в  $\sim 1.18$  раза

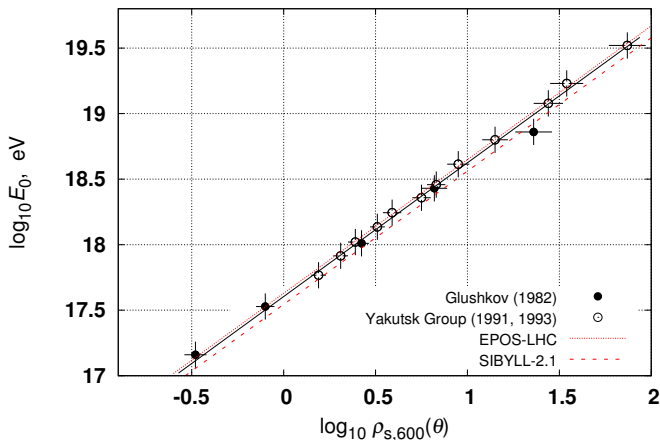
модель	A	$E_\gamma$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{\text{ion}}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_{el}$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_\mu$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$\Delta E$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ	$E_0$ ( $\times 10^{17}$ ) эВ
QGSJet01d	p	0.806	6.620	1.469	0.517	0.565	9.978
	Fe	0.529	6.660	1.306	0.785	0.798	9.972
QGSJetII-04	p	0.859	6.476	1.474	0.547	0.624	9.980
	Fe	0.582	6.430	1.302	0.844	0.866	9.981
SIBYLL-2.1	p	0.909	6.625	1.523	0.428	0.491	9.976
	Fe	0.528	6.679	1.340	0.702	0.716	9.965
EPOS-LHC	p	0.891	6.412	1.482	0.524	0.657	9.966
	Fe	0.543	6.415	1.305	0.794	0.898	9.955
среднее	p	0.866	6.533	1.487	0.504	0.584	9.974
	Fe	0.546	6.531	1.313	0.781	0.820	9.968
	p-Fe	0.706	6.532	1.400	0.643	0.702	9.970
эксперимент	-	9.287		0.947	0.636	0.860	11.730
новая оценка	-	7.926		0.947	0.618	0.702	10.190

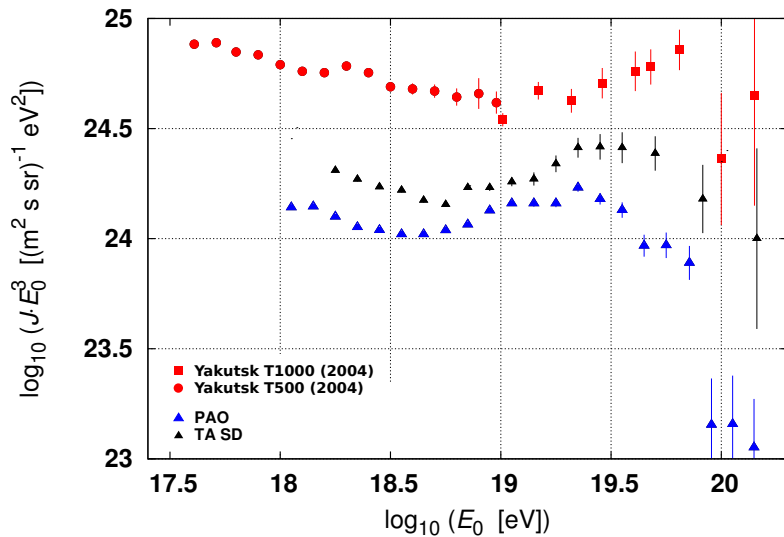
Таблица 2, строка „эксперимент“:  $\sum E = 1.173 \times 10^{18}$  эВ,  
 $\langle E_0 \rangle = 0.997 \times 10^{18}$  эВ  
разница в  $\sim 1.18$  раза

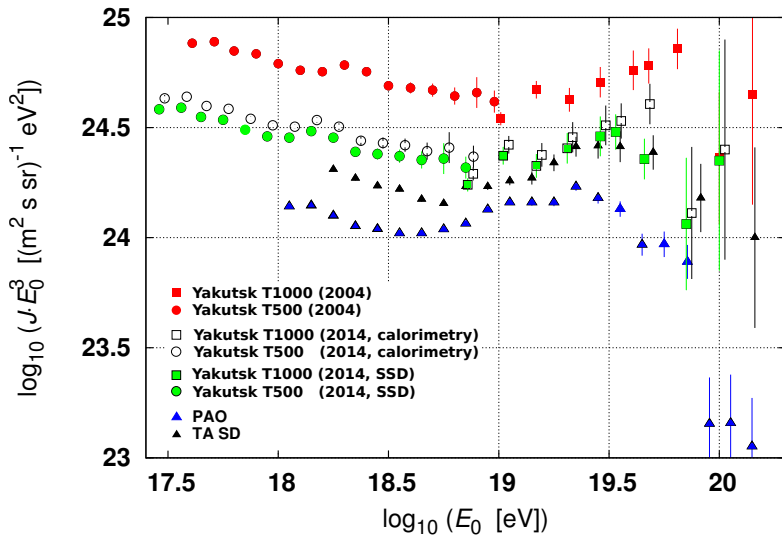
(Якутск'82):  $k = 3.7 \times 10^4$  эВ/фотон эВ $^{-1}$   
CORSIKA:  $\langle k \rangle = 3.157 \times 10^4$  эВ/фотон эВ $^{-1}$

$E_0$ , восстановленная из  $\rho_{s,600}(\theta)$  в ливнях с  $\langle \cos \theta \rangle = 0.95$

$$E_0 = (3.60 \pm 0.3) \times 10^{17} \cdot (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02 \pm 0.02}, \quad (13)$$







# Заключение





- С использованием кода CORSIKA в рамках нескольких моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях были рассчитаны отклики в наземных детекторах ЯКУ ШАЛ

- С использованием кода CORSIKA в рамках нескольких моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях были рассчитаны отклики в наземных детекторах ЯКУ ШАЛ
- Расчеты показали, что в выражениях (1) и (4) энергия, рассеянная в атмосфере в виде электромагнитной компоненты, была завышена на 12%-17%, в зависимости от  $X_{\max}$ 
  - в (4) ситуация была усугублена недооценкой прозрачности атмосферы ( $\sim 17\%$ )

- С использованием кода CORSIKA в рамках нескольких моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях были рассчитаны отклики в наземных детекторах ЯКУ ШАЛ
- Расчеты показали, что в выражениях (1) и (4) энергия, рассеянная в атмосфере в виде электромагнитной компоненты, была завышена на 12%-17%, в зависимости от  $X_{\max}$ 
  - в (4) ситуация была усугублена недооценкой прозрачности атмосферы ( $\sim 17\%$ )
- Обновленная калориметрия (13) привела к уменьшению оценки энергии  $E_0$  в сравнении с (1) в  $\sim 1.33$  раза (и, соответственно, к уменьшению интенсивности полученного спектра КЛ)

- С использованием кода CORSIKA в рамках нескольких моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях были рассчитаны отклики в наземных детекторах ЯКУ ШАЛ
- Расчеты показали, что в выражениях (1) и (4) энергия, рассеянная в атмосфере в виде электромагнитной компоненты, была завышена на 12%-17%, в зависимости от  $x_{\max}$ 
  - в (4) ситуация была усугублена недооценкой прозрачности атмосферы ( $\sim 17\%$ )
- Обновленная калориметрия (13) привела к уменьшению оценки энергии  $E_0$  в сравнении с (1) в  $\sim 1.33$  раза (и, соответственно, к уменьшению интенсивности полученного спектра КЛ)
- Независимый метод оценки энергии на основе отклика наземных детекторов дал схожие результаты

- С использованием кода CORSIKA в рамках нескольких моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях были рассчитаны отклики в наземных детекторах ЯКУ ШАЛ
- Расчеты показали, что в выражениях (1) и (4) энергия, рассеянная в атмосфере в виде электромагнитной компоненты, была завышена на 12%-17%, в зависимости от  $x_{\max}$ 
  - в (4) ситуация была усугублена недооценкой прозрачности атмосферы ( $\sim 17\%$ )
- Обновленная калориметрия (13) привела к уменьшению оценки энергии  $E_0$  в сравнении с (1) в  $\sim 1.33$  раза (и, соответственно, к уменьшению интенсивности полученного спектра КЛ)
- Независимый метод оценки энергии на основе отклика наземных детекторов дал схожие результаты
- Оба метода в пределах 10-15% согласуются с расчетами

- С использованием кода CORSIKA в рамках нескольких моделей адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях были рассчитаны отклики в наземных детекторах ЯКУ ШАЛ
- Расчеты показали, что в выражениях (1) и (4) энергия, рассеянная в атмосфере в виде электромагнитной компоненты, была завышена на 12%-17%, в зависимости от  $x_{\max}$ 
  - в (4) ситуация была усугублена недооценкой прозрачности атмосферы ( $\sim 17\%$ )
- Обновленная калориметрия (13) привела к уменьшению оценки энергии  $E_0$  в сравнении с (1) в  $\sim 1.33$  раза (и, соответственно, к уменьшению интенсивности полученного спектра КЛ)
- Независимый метод оценки энергии на основе отклика наземных детекторов дал схожие результаты
- Оба метода в пределах 10-15% согласуются с расчетами
- Полученные спектры КЛ лучше согласуются с мировыми данными