

Алгоритм моделирования и блок-схема модели

Моделирование начинается с розыгрыша энергии первичной частицы. Энергия индивидуального ливня разыгрывалась согласно дифференциального энергетического спектра $J(E)dE \sim E^{-\gamma+1}$ с показателем $\gamma=3,1$. При этом учитывался порог срабатывания установки по энергии равный $\sim 1.2 \cdot 10^{15}$ эВ.

Алгоритм моделирования в этом случае можно записать в виде:

$$LgE_o = LgE_n - Lg(\varepsilon/\gamma+1); \quad (1)$$

Где ε - равномерно распределенное случайное число от 0 до 1.

После розыгрыша E_o ливня определяем X_{max} , для чего использовали зависимость X_{max} от энергии, полученную для модели QGSJET с параметрами $\Delta=0,14$, коэффициентом неупругости $K_{in}=0.6$ (при $E_o=100$ ГэВ) и для случая нормального химического состава:

$$X_{max}=560+60*(LgE_o - 16), \text{ г/см}^2 \quad (2)$$

Так как развитие ШАЛ в атмосфере происходит со значительными флуктуациями, то распределение X_{max} можно аппроксимировать гамма-распределением:

$$W(X_m) \sim X_m/\Lambda - \exp(-X_m/\Lambda), \text{ где } \Lambda = \bar{b}_{X_m}/\sqrt{2}. \quad (3)$$

Среднеквадратическое отклонение \bar{b}_{X_m} для модели QGSJET и нормального химического состава первичных космических лучей равно 60 г/см². Таким образом, глубина максимума индивидуального ливня разыгрывалась по следующему алгоритму:

$$X_m = -\Lambda * Ln(\varepsilon_1 * \varepsilon_2) + X_m - 2 * \Lambda. \quad (4)$$

Далее разыгрывает косинус зенитного угла θ по закону $\cos^6\theta$ и азимутальный угол ϕ случайным образом от 0 до 360 градусов.

Найденные ранее энергия, глубина максимума X_m , зенитный угол θ полностью определяют индивидуальную каскадную кривую. При этом не рассматриваются флуктуации развития субкаскадов, так как они составляют

всего 5% и флуктуации связанные с переходом к другим моделям адронных взаимодействий.

Согласно работе [4] электро-магнитный каскад в области $E_0=10^{15}-10^{17}$ эВ хорошо описывается выражением:

$$N_e = E_0 * 10^{-9} / 1.5 * \exp(-((X_0 / \cos \theta - X_m) / 37.1 + Y) * (1 - 2 * \ln S) + Y), \quad (5)$$

где $Y = 0.8 * \ln(E_0 / 0.81)$, а S – возраст ливня.

Возраст ливня находится из формулы:

$$S = 2 / (1 + Y / ((X_0 / \cos \theta - X_m) / 37.1 + Y)) \quad (6)$$

Для уровня нашей установки $X_0 = 1020$ г/см². По формуле (5) для известных E_0 и θ находим N_e – полное число заряженных частиц. По формуле (6) – возраст ливня S . Таким образом, мы получили исходные параметры искусственного ливня: E_0 , N_e , S , X_m .

Оси искусственного ливня моделируются по методу Монте-Карло случайным образом по нормальному распределению согласно дифференциальному энергетическому спектру.

Далее по формулам $\rho(R)$ и $Q(R)$ для этих параметров находим исходные плотности заряженных частиц и потока черенковского света.

Оценка точности измерения плотности потока черенковского света и потока заряженных частиц ШАЛ на Якутской установке была сделана в 70-е начале 80-х годов по прямым измерениям разными способами. Используя эти данные мы задаем $\rho(R)$ и $Q(R)$, с помощью которых определяются другие параметры ШАЛ по программам обработки принятым на МАЧУ (МАлая Черенковская Установка):

$$\rho(R) = \rho^T(R) * \left[1 + \varepsilon * \sqrt{0.02 + \frac{0.3}{\rho^T(R) * \cos \theta}} \right]$$

$$Q(R) = Q^T(R) * \left[1 + \varepsilon * \sqrt{0.05 + \left(\frac{0.3 * Q_{nop}}{Q^T(R)} \right)^2} \right]$$

Блок-схема моделирования



Результаты полного математического моделирования показали: случайные ошибки оказались равными 20% для измерения первичной энергии ливня. Точность оценки параметров каскадной кривой составила: $X_{\max} - 65 \text{ г/см}^2$, $N_e - 10\%$, $S - 5\%$.

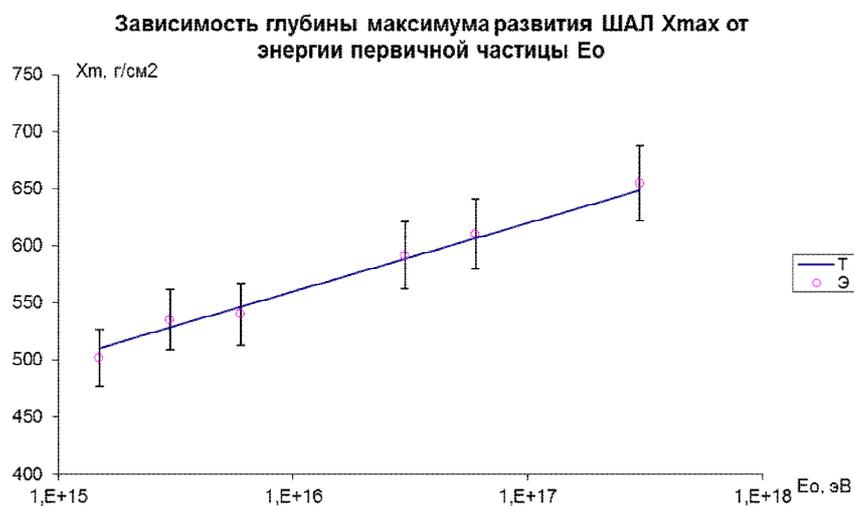


Рис. 1. Зависимость глубины максимума развития ШАЛ от энергии первичной частицы

Голубой линией показаны результаты моделирования, а точки - экспериментальные данные.

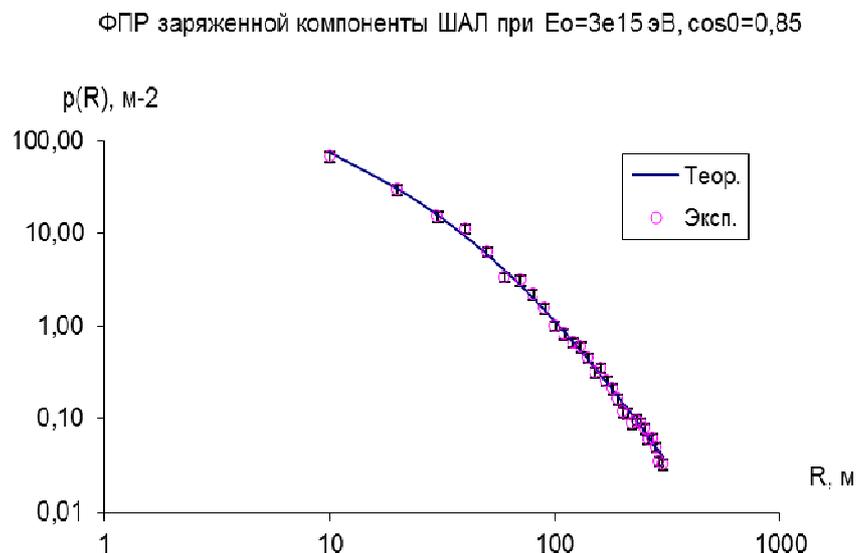


Рис. 2. Функция пространственного распределения заряженной компоненты ШАЛ. Голубая линия получена расчетами, а точки - экспериментальные данные Якутской малой черенковской установки.



Рис. 3. Зависимость полного числа заряженных частиц N_e от энергии первичной частицы E_0