

СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ЧЕРЕНКОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ НА УРОВНЕ ГОР ОТ ШАЛ С ЭНЕРГИЕЙ $10^{15} \div 10^{16}$ эВ

Б.Н. Афанасьев, Н.М. Нестерова, Л.А. Хейн

Данные измерений черенковского излучения на уровне $\sim 700 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ в ШАЛ от космических частиц с энергией свыше 1 ПэВ сравниваются с результатами расчетов ядерно-каскадного процесса в атмосфере при различных предположениях о росте с энергией сечения взаимодействия адронов.

Целью работы является сопоставление экспериментальных данных с расчетами пространственного распределения плотности потока черенковского излучения (ЧИ) из атмосферы на уровне гор, возникающего при прохождении широких атмосферных ливней (ШАЛ) от космических частиц с энергией $10^{15} \div 2 \cdot 10^{16}$ эВ. Для сравнения используются результаты измерений, проведенных на Тянь-Шане /1,2/ (уровень $690 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$) в 1981-82 г.г. и на Памире /3/ (уровень $650 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$) в 1957 г.

Сравнение проводится с результатами расчетов для уровня $700 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ атмосферы, в которых была использована та же программа, что и в /4/ для уровня моря. В основу расчетов заложена экстраполяция к энергиям ШАЛ характеристик взаимодействия адронов, полученных на ускорителях.

Поскольку вопрос о сечении взаимодействия при сверхскоростных энергиях является одним из наиболее важных, были рассчитаны три варианта роста с энергией сечения взаимодействия адронов с ядрами атомов воздуха:

$$\sigma_{h-A}^{\text{prod}} = 273 [1 + a_{\sigma} \ln(E/0,072)] \text{ мб} \quad (E \text{ в ТэВ}),$$

$$1) a_{\sigma} = 0; \quad 2) a_{\sigma} = 0,03; \quad 3) a_{\sigma} = 0,05; \quad \sigma_{N-A}^{\text{prod}} / \sigma_{\pi-A}^{\text{prod}} = 1,2.$$

Расчеты ЧИ проведены для ШАЛ, образованных первичными протонами с энергией 1, 10 и 100 ПэВ при трех зенитных углах наклона оси ливня $\Theta = 0, 17$ и 30° . Расчетные функции пространственного распределения ЧИ на уровне $700 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ при Θ , равных 0 и 17° , отличаются не более чем на 10% на расстояниях от оси $R = 10 - 250$ м (где есть экспериментальные данные). Это дает основание сравнивать с ними не только тянь-шаньские, но и памирские результаты. При $\Theta = 30^{\circ}$ пространственные распределения становятся существенно положе. Для сравнения с экспериментами по ЧИ от ШАЛ с $\Theta < 30^{\circ}$ ($\Theta = 17^{\circ}$) использованы расчеты при $\Theta = 17^{\circ}$ для Тянь-Шаня ($720 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$) и при $\Theta = 0^{\circ}$ для Памира ($680 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$).

При обработке тянь-шаньских данных по ЧИ параметры ШАЛ на уровне наблюдения (полное число электронов N_e , координаты оси, параметр возраста и др.) находились по алгоритму, созданному на базе аппроксимационной программы FUMILI. Средние ошибки в определении этих параметров составляли: расстояния до оси $\Delta R \leq 2,5$ м, числа частиц $\Delta N_e \leq 25\%$, параметра возраста $\Delta S \leq 0,2$ при $R < 30$ м (при $R < 10$ м точности повышались примерно в 2 раза).

С помощью дополнительного розыгрыша, аналогичного проделанному в работе /5/, проведен анализ влияния системы регистрации, способов отбора и обработки событий ЧИ ШАЛ /6/. Результаты анализа учтены в представленных распределениях.

Переход от числа электронов на уровне наблюдения (N_e) к энергии первичной частицы (E_0) был осуществлен "калориметрическим" методом, как и для памирских данных в работе /7/. Учитывался вклад различных компонент ШАЛ, в том числе энергетические потери электронно-фотонной компоненты, восстановленные по ЧИ ШАЛ в атмосфере. Однако зависимости $E_0(N_e)$, полученные для Тянь-Шаня, отличаются от памирских скорее всего из-за примененных ранее алгоритмов обработки.

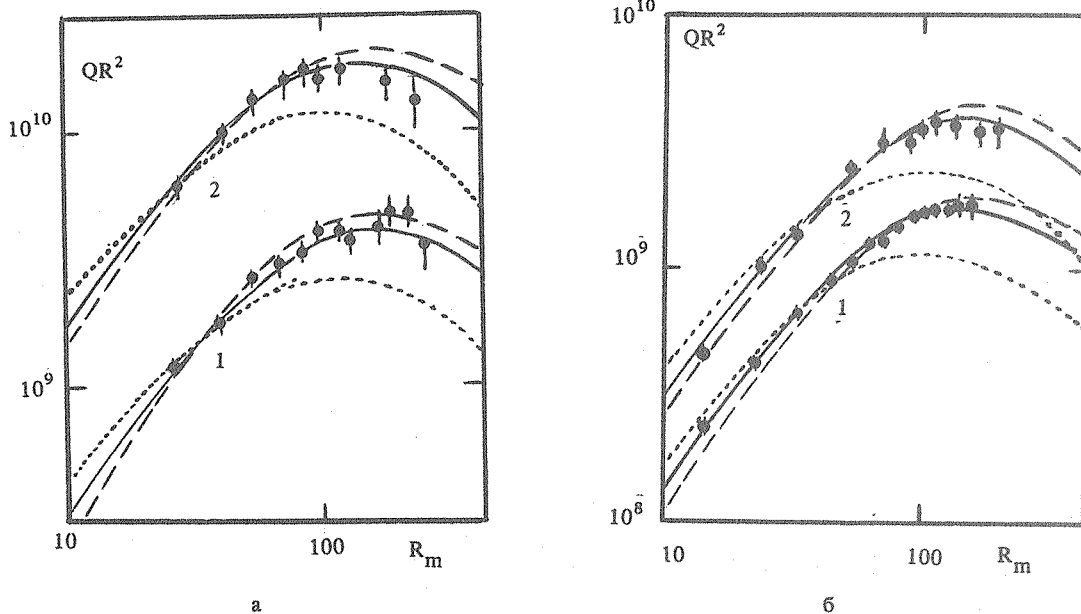


Рис. 1. Зависимость плотности потока черенковского излучения QR^2 от расстояния R до оси ШАЛ на уровне гор. Точки – эксперимент; кривые – расчет при соответствующих первичных энергиях E_0 для трех вариантов роста сечения взаимодействия: $a_G = 0$ – точечные, 0,03 – сплошные и 0,05 – пунктирные линии. а) Эксперимент Тянь-Шаня: $E_0 = 2$ ПэВ (1), $E_0 = 9$ ПэВ (2). б) Эксперимент Памира: $E_0 = 0,9$ ПэВ (1), $E_0 = 2,3$ ПэВ (2).

На рис. 1 показаны результаты экспериментов и расчетов пространственного распределения плотности потока ЧИ ШАЛ в единицах QR^2 фотон (Q – число фотонов на m^2 ; R – расстояние до оси в метрах). На рис. 1а приведены экспериментальные данные тянь-шаньской установки для ШАЛ при $\Theta < 30^\circ$ со средним значением $\bar{N}_e = 7,8 \cdot 10^5$ ($\bar{E}_0 = 2 \cdot 10^{15}$ эВ) и $\bar{N}_e = 3,9 \cdot 10^6$ ($\bar{E}_0 = 9 \cdot 10^{15}$ эВ); на рис. 1б – данные Памирской установки для ШАЛ при $\Theta < 30^\circ$ с $\bar{N}_e = 5 \cdot 10^5$ ($\bar{E}_0 = 9 \cdot 10^{14}$ эВ) и $\bar{N}_e = 1,3 \cdot 10^6$ ($\bar{E}_0 = 2,3 \cdot 10^{15}$ эВ). На рисунках представлены также результаты расчетов ЧИ при указанных выше энергиях, полученные путем пересчета от $E_0 = 1-10$ ПэВ для трех вариантов роста с энергией сечения взаимодействия адронов.

На основании сравнения экспериментов с расчетами можно сделать следующие выводы.

1) Абсолютные расчетные значения плотности потоков черенковского излучения ШАЛ с $E_0 = 10^{15} \div 10^{16}$ эВ на расстояниях до 150 м от оси согласуются с экспериментом.

2) По расчетам разница между крайними предположениями о росте сечения ($a_G = 0$ и 0,05) достаточно велика, в то время как разница между $a_G = 0,03$ ($\sigma(E) \sim \ln E$) и $a_G = 0,05$ ($\sigma(E) \sim \ln^2 E$) мала и точность экспериментальных данных не позволяет сделать выбор между этими моделями при $R < 100$ м.

3) Сравнение эксперимента с расчетами по форме пространственных распределений ЧИ ШАЛ показывает, что на расстояниях $R > 150$ м экспериментальные распределения круче расчетных для $a_G > 0,03$ при энергии $E_0 > 2 \cdot 10^{15}$ эВ, что соответствует более медленному росту σ_{h-A}^{prod} , чем по закону $\sim \ln^2 E$. Этот вывод только усилится, если в расчетах принять сложный ядерный состав первичных космических частиц, так как расчетные кривые в этом случае будут положе, чем при чисто протонном составе.

Таким образом, для энергий ШАЛ 1–10 ПэВ экспериментальные данные по пространственному распределению черенковского излучения на уровне гор при прочих характеристиках, заложенных в расчетах, лучше согласуются с предположением о более слабом росте сечения взаимодействия адронов с ядрами атомов воздуха σ_{h-A}^{prod} , чем рост сечения pp-взаимодействий при энергиях современных ускорителей (возможно, за счет меньшего сечения взаимодействия пионов).

Кроме уменьшения σ_{p-A}^{prod} , соответствия с экспериментом можно достичь за счет изменения ряда других параметров взаимодействия. Во всяком случае, эксперимент указывает на меньшее дробление энергии в атмосфере, чем при условиях, принятых в варианте расчетов для $a_\sigma = 0,05$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Afanasiev B. N. et al. Proc. 18th ICRC, Bangalore, 6, 200 (1983).
2. Erlykin A. D. et al. Proc. 9th ICRC, London, 2, 731 (1965).
3. Chudakov A. S. et al. Proc. Moscow ICRC, 11, 46 (1960).
4. Ivanenko I. P., Makarov L. A., Hein L. A. Proc. 15th ICRC, Plovdiv, 8, 297 (1977).
5. Асейкин В. С. и др. Препринт ФИАН № 153, 1975.
6. Афанасьев Б. Н., Падей В. А., Стаменов Й. Н. Вопросы атомной науки и техники, сер. техн. физ. эксперим., вып. 1, 49 (1983).
7. Nikolsky S. I. Proc. 5th Interamerican seminar on cosmic ray, La Paz, 2, 48 (1962).

Поступила в редакцию 15 декабря 1986 г.