

УДК 537.591.15

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ОТ ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ

А.А. Ал-Рубаиее, О.А. Гресс, К.С. Лохтин, Ю.В. Парфенов, С.И. Синеговский

PARAMETRIZATION OF THE CHERENKOV LIGHT LATERAL DISTRIBUTION FUNCTION IN EXTENSIVE AIR SHOWER

A.A. Al-Rubaiee, O.A. Gress, K.S. Lokhtin, Yu.V. Parfenov, S.I. Sinegovsky

С помощью кода CORSIKA выполнено моделирование пространственного распределения черенковского излучения частиц широких атмосферных ливней в интервале энергий 10^{12} – 10^{16} эВ для условий и конфигурации установки Тунка-25. На основе этих расчетов построены наборы аппроксимирующих функций для различных первичных частиц и различных зенитных углов.

The simulation of the Cherenkov light lateral distribution function (LDF) in extensive air showers (EAS) was performed with the CORSIKA code in the energy range 10^{12} – 10^{16} eV for the conditions and the configuration of the Tunka-25 EAS array. Basing on these calculations the approximating function sets for some species of the primary particles and several zenith angles are developed.

Введение

Одной из проблем физики космических лучей является измерение энергетического спектра в окрестности его излома и определение химического состава первичных космических лучей (КЛ) [1–3]. В последние годы интенсивно развивается метод исследования КЛ, основанный на регистрации черенковского света вторичных частиц, генерируемых в каскадных процессах широких атмосферных ливней (ШАЛ) [4–7].

Для восстановления характеристик первичной частицы, породившей атмосферный каскад, по черенковскому излучению вторичных частиц необходимо создание библиотеки образцов ливней, требующее значительных затрат процессорного времени. В данной работе для моделирования пространственного распределения (ФПР) черенковского света от атмосферных каскадов, порожденных протонами и ядрами ПКЛ высоких энергий, использовался пакет программ CORSIKA 5.61 [8] (см. также [9, 10]), в котором адронные взаимодействия моделируются с помощью программ QGSJET [11] и GHEISHA [12]. Моделирование черенковского света с помощью CORSIKA 5.61 требует для расчета одного ливня с энергией 10^{17} эВ более 50 ч работы процессора с частотой порядка нескольких ГГц. Поэтому разработка алгоритмов, ускоряющих моделирование, и поиск возможных аппроксимаций результатов численного моделирования являются практически важными.

В недавних работах [13–15] была предложена параметризация ФПР черенковского излучения как функции расстояния R от оси ШАЛ и энергии E_0 первичной частицы, с помощью которой можно аппроксимировать результаты численного моделирования пространственного распределения черенковских фотонов, рождающихся при развитии ШАЛ, генерируемого в атмосфере Земли частицей космических лучей очень высоких энергий. В настоящей работе мы используем эту форму для представления результатов численного моделирования ШАЛ, выполненного с помощью кода CORSIKA, и описания черенковского света ШАЛ, измеренного на установке Тунка-25 [5, 6].

Моделирование черенковского излучения ШАЛ

В настоящее время единственной возможностью исследовать ПКЛ с энергией выше 10^{15} эВ являются измерения ШАЛ. Детали развития ливня слишком сложны для описания простыми аналитическими моделями, поэтому естественным является применение численных методов, в частности, метода Монте-Карло (МК), для моделирования реальных процессов взаимодействия и переноса частиц в атмосфере.

В данной работе расчет ФПР черенковского света от ШАЛ выполнялся с помощью пакета программ CORSIKA [8], в котором в качестве моделей адронных взаимодействий использовались коды QGSJET [11] при энергиях выше 80 ГэВ и GHEISHA [12] (см. также [9]) для меньших энергий. Код CORSIKA – это МК-программа моделирования ШАЛ, расчета выходов адронов, мюонов, электронов и фотонов в каскаде. Программа позволяет получить информацию о типе и энергии частиц ливня, направлении и времени их прихода на уровень наблюдения. Код поддерживает опцию генерации черенковского излучения заряженными частицами в ливне с использованием системы EGS4 для моделирования электромагнитной компоненты ШАЛ. На результаты моделирования влияет выбор интервала первичных энергий, диапазона длин черенковского излучения, величины пороговых энергий адронов, электронов, мюонов и фотонов, многократное кулоновское рассеяние электронов. Моделирование черенковского света для установки Тунка-25 было выполнено со следующими значениями параметров: диапазон длин черенковского излучения (опция CWAVLG) – 350–600 нм, величины пороговых энергий (ECUTS) – (0.3, 0.3, 0.03, 0.03) ГэВ, фактор 1.0, учитывающий многократное кулоновское рассеяние электронов (STEPFC). ФПР черенковского света были рассчитаны на интервале 2.5–400 м от оси ливня, инициированного протонами, ядрами железа и γ -квантами с энергиями 10^{12} – 10^{16} эВ. Расчеты выполнены для трех значений зенитного угла: 0, 10 и 20°.

Результаты параметризации ФПР

Для параметризации моделированной ФПР черенковского излучения использовалась предложен-

ная в работе [13] функция Q , зависящая от четырех параметров. Для этой функции мы ввели нормировку $C = 10^3 \text{ м}^{-1}$, обеспечивающую правильную размерность Q и согласованность с размерностью параметров a, b, σ, r_0 :

$$Q(E_0, R) = \frac{C \sigma \exp \left[a - \frac{R/b + (R-r_0)/b + (R/b)^2 + (R-r_0)^2/b^2}{b \left[(R/b)^2 + (R-r_0)^2/b^2 + R\sigma^2/b \right]} \right]}{b \left[(R/b)^2 + (R-r_0)^2/b^2 + R\sigma^2/b \right]} \text{ м}^{-2}, \quad (1)$$

где R – расстояние от оси ливня; E_0 – энергия первичной частицы. В отличие от [13] мы построили параметры ФПР черенковского света как непрерывные функции энергии E_0 , что позволяет для любой энергии первичной частицы рассчитать ФПР черенковского света, хорошо аппроксимирующую результат, полученный с помощью программы CORSIKA. Зависимость от энергии параметров, найденных методом наименьших квадратов, аппроксимировалась выражениями вида:

$$k(E_0) = c_0 + c_1 \lg(E_0/1 \text{ эВ}) + c_2 \lg^2(E_0/1 \text{ эВ}) + c_3 \lg^3(E_0/1 \text{ эВ}). \quad (2)$$

Здесь $k(E_0) = a, \lg(b/1 \text{ км}), \lg\sigma, \lg(r_0/1 \text{ км})$; c_0, c_1, c_2, c_3 – наборы коэффициентов, зависящие от типа первичной частицы (p, Fe, γ) и зенитного угла (см. таблицу).

Построенная таким образом функция (1) с параметрами (2) представляет аппроксимацию моделированной ФПР черенковского света для ливней от

Коэффициенты c_i , определяющие энергетическую зависимость параметров a, b, σ, r_0 (2)

$\theta = 0^\circ$				
p				
k	c_0	c_1	c_2	c_3
a	$5.718 \cdot 10^2$	$-1.242 \cdot 10^2$	$8.846 \cdot 10^0$	$-2.044 \cdot 10^{-1}$
b	$-3.997 \cdot 10^2$	$8.350 \cdot 10^1$	$-5.777 \cdot 10^0$	$1.325 \cdot 10^{-1}$
σ	$3.226 \cdot 10^2$	$-6.674 \cdot 10^1$	$4.572 \cdot 10^0$	$-1.039 \cdot 10^{-1}$
r_0	$3.127 \cdot 10^1$	$-6.295 \cdot 10^0$	$4.167 \cdot 10^{-1}$	$-9.320 \cdot 10^{-3}$
Fe				
a	$-1.818 \cdot 10^2$	$3.213 \cdot 10^1$	$-1.928 \cdot 10^0$	$4.214 \cdot 10^{-2}$
b	$4.707 \cdot 10^2$	$-9.487 \cdot 10^1$	$6.372 \cdot 10^0$	$-1.426 \cdot 10^{-1}$
σ	$4.050 \cdot 10^0$	$-6.199 \cdot 10^{-1}$	$2.421 \cdot 10^{-2}$	$-1.335 \cdot 10^{-4}$
r_0	$3.255 \cdot 10^2$	$-6.561 \cdot 10^1$	$4.400 \cdot 10^0$	$-9.846 \cdot 10^{-2}$
γ				
a	$-5.915 \cdot 10^2$	$1.332 \cdot 10^2$	$-1.015 \cdot 10^1$	$2.635 \cdot 10^{-1}$
b	$2.851 \cdot 10^2$	$-6.702 \cdot 10^1$	$5.292 \cdot 10^0$	$-1.398 \cdot 10^{-1}$
σ	$5.220 \cdot 10^0$	$5.398 \cdot 10^{-1}$	$-2.132 \cdot 10^{-1}$	$1.038 \cdot 10^{-2}$
r_0	$-7.094 \cdot 10^1$	$1.629 \cdot 10^1$	$-1.252 \cdot 10^0$	$3.181 \cdot 10^{-2}$
$\theta = 20^\circ$				
p				
a	$-6.143 \cdot 10^2$	$1.206 \cdot 10^2$	$-7.960 \cdot 10^0$	$1.788 \cdot 10^{-1}$
b	$3.989 \cdot 10^2$	$-8.120 \cdot 10^1$	$5.509 \cdot 10^0$	$-1.245 \cdot 10^{-1}$
σ	$-2.656 \cdot 10^2$	$5.404 \cdot 10^1$	$-3.669 \cdot 10^0$	$8.301 \cdot 10^{-2}$
r_0	$-5.877 \cdot 10^1$	$1.213 \cdot 10^1$	$-8.384 \cdot 10^{-1}$	$1.914 \cdot 10^{-2}$
Fe				
a	$-7.028 \cdot 10^1$	$6.637 \cdot 10^0$	$-5.03 \cdot 10^{-2}$	$2.900 \cdot 10^{-3}$
b	$-2.656 \cdot 10^2$	$5.718 \cdot 10^1$	$-4.048 \cdot 10^0$	$9.451 \cdot 10^{-2}$
σ	$-2.781 \cdot 10^1$	$4.787 \cdot 10^0$	$-2.85 \cdot 10^{-1}$	$5.870 \cdot 10^{-3}$
r_0	$-8.754 \cdot 10^0$	$2.177 \cdot 10^0$	$-1.77 \cdot 10^{-1}$	$4.520 \cdot 10^{-3}$

первичной частицы (p, Fe, γ) в интервале энергий 10^{12} – 10^{16} эВ. На рис. 1 показаны в рамках изложенной методики возможности реконструкции типа первичной частицы, породившей ШАЛ. Представлены расчеты моделирования ФПР черенковского

света (сплошные линии) для вертикальных ливней от первичных протонов, ядер железа и γ -кванта с $E_0=10^{14}$ эВ и в сравнении с функцией (1) (штриховые кривые) для интервала расстояний от оси ливня 10–400 м. На рис. 2 для вертикальных ливней приведены результаты моделирования ФПР черенковского света (сплошные линии), выполненного для ШАЛ от γ -кванта в интервале энергий 10^{12} – 10^{14} эВ.

На рис. 3 для двух значений зенитного угла (0° и 20°) показаны результаты моделирования ФПР черенковского света (сплошные линии) от ливней, порожденных протоном с энергией 10^{16} эВ в сравнении с функцией (1) (штриховые и пунктирные кривые) для расстояний от оси ливня 10–400 м. То же самое, но для ядра железа с энергией 10^{15} эВ, показано на рис. 4. Чтобы более отчетливо показать ошибки аппроксимации (1), функция Q для $\theta = 20^\circ$ на рис. 3, 4 умножена на коэффициент 0.1.

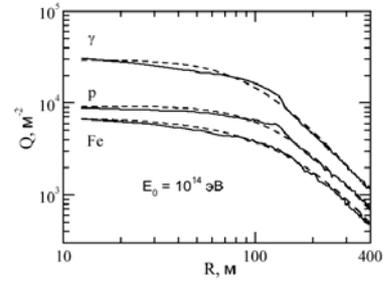


Рис. 1. Результаты моделирования ФПР черенковского света (сплошные линии) с помощью кода CORSIKA в сравнении с функцией (1) (штриховые кривые) для вертикальных ливней от первичных протонов, ядер железа и γ -кванта с $E_0=10^{14}$ эВ.

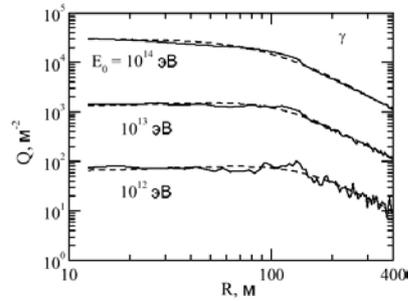


Рис. 2. Расчеты ФПР черенковского света (сплошные линии) с помощью кода CORSIKA в сравнении с функцией (1) (штриховые кривые) для вертикальных ливней от γ -кванта.

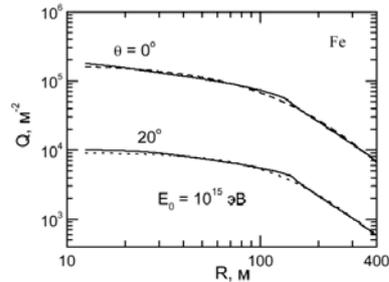


Рис. 3. Пространственное распределение черенковского света от ШАЛ, инициированных ядрами железа с энергией 10^{15} эВ. Сплошные линии – результат моделирования с помощью кода CORSIKA; расчет по формуле (1): штриховые линии – для вертикали и пунктирные – для зенитного угла 20° .

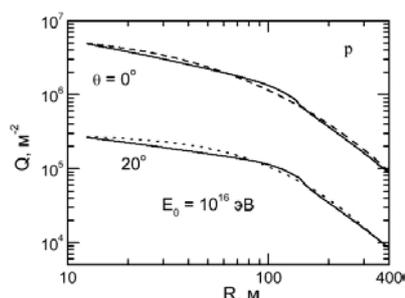


Рис. 4. Пространственное распределение черенковского света от ШАЛ, инициированных протоном с энергией 10^{16} эВ. Сплошные линии – результат моделирования с помощью кода CORSIKA; расчет по формуле (1): штриховые линии – для вертикали и пунктирные – для зенитного угла 20° .

Построенная аппроксимация наименее точна на расстояниях 10–150 м: здесь ошибка достигает 10–20 %. Для интервала расстояний 150–400 м точность не хуже 5–10 %, на этом интервале наблюдается наилучшее согласие функции (1) с результатом моделирования программой CORSIKA. Для $\theta = 20^\circ$ на интервале 10–150 м точность аппроксимации составляет 5–15 %, а на интервале 150–400 м точность оказалось около 10 %. Очевидно, что точность аппроксимации можно повысить, рассматривая более узкий диапазон энергии; например, при изучения спектра КЛ вблизи излома разумно ограничиться энергиями 10^{15} – 10^{16} эВ.

Заключение

В работе выполнен расчет функций пространственного распределения черенковского излучения в широких атмосферных ливнях, инициированных протонами, ядрами железа и γ -квантами космических лучей в интервале энергий 10^{12} – 10^{16} эВ. Моделирование ливней выполнено с помощью программы CORSIKA для условий и конфигурации установки Тунка-25. На основе этих расчетов были построены наборы аппроксимирующих функций – для различных первичных частиц и различных зенитных углов. Основное преимущество данного подхода заключается в возможности создания за короткое время представительной библиотеки образцов ФПР, которая позволила бы классифицировать события на установках. Дальнейшее развитие методики предполагает реконструкцию характеристик первичной частицы на основе зарегистрированных на установках событий и, следовательно, восстановление энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haungs A. Energy spectrum and mass composition around the knee by EAS measurements // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2003. V. 29. P. 809–820.
2. Hoerandel R. Overview on direct and indirect measurements of cosmic rays some thoughts on galactic cosmic rays and the knee // arXiv: astro-ph/0501251.
3. Wefel J.P. To higher energy: Balloon and satellite investigations around the «knee» // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2003. V. 29. P. 821–830.
4. Ivanov A.A., Knurenko S.P., Slepsov I.Ye. The energy spectrum of cosmic rays above 10^{15} eV as derived from air Cherenkov light measurements in Yakutsk // arXiv: astro-ph/0305053.
5. Budnev N., Chernov D., Galkin V. et al. Tunka EAS Cherenkov array – status 2001 // Proc. 27 ICRC, Hamburg, 7–15 Aug, 2001. P. 581–584.
6. Буднев Н. М., Васильев Р. В. Вишневский Р. и др. Энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей по данным черенковской установки ШАЛ Тунка // Сб. трудов 28-й Всероссийской конференции по космическим лучам. Москва, МИФИ 7–11 июня, 2004. С. 1206–1209.
7. Arqueros F., Barrio J.A., Bernlohr K. Energy spectrum and chemical composition of cosmic rays between 0.3 and 10 PeV determined from the Cherenkov-light and charged-particle distributions in air showers // Astron. Astrophys. 2000. V. 359. P. 682–694.
8. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Report FZKA 6019. Forschungszentrum Karlsruhe. 1998. 90 p.
9. Heck D., Antoni T., Apel W.D. et al. Hadronic interaction models and the air shower simulation program CORSIKA // Proc. 27 ICRC, Hamburg, 7–15 Aug, 2001. P. 233–236.
10. Knapp J., Heck D., Sciutto S.J., et al. Extensive air shower simulations at the highest energies // Astropart. Phys. 2003. V. 19. P. 77–99.
11. Ostapchenko S. QGSJET-II: Towards reliable description of very high energy hadronic interactions // arXiv: hep-ph/0412332, 2004; QGSJET-II: Results for extensive air shower // arXiv: astro-ph/0412591.
12. Heck D., Engel R. Influence of low-energy hadronic interaction programs on air shower simulations with CORSIKA // Proc. 28th ICRC, Tsukuba, July 31–August 7, 2003. P. 79–282.
13. Alexandrov L., Mavrodiev S., Mishev A., Stamenov J. Estimation of the primary cosmic radiation characteristics // Proc. 27 ICRC, Hamburg, 7–15 Aug, 2001. P. 257–260.
14. Mavrodiev S., Mishev A., Stamenov J. A method for energy estimation and mass composition determination of primary cosmic rays at Chacaltaya observation level based on atmospheric Cherenkov light technique // Proc. 28th ICRC, Tsukuba, July 31–August 7, 2003. P. 163–174.
15. Mishev A., Mavrodiev S., Stamenov J. Ground based gamma ray studies based on atmospheric Cherenkov technique at high mountain altitude // arXiv: astro-ph/0410118.