

УДК 537.591

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И ЗАРЯДОВОЕ ОТНОШЕНИЕ
АТМОСФЕРНЫХ МЮОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

¹А.А. Кочанов, ²Т.С. Синеговская, ¹С.И. Синеговский

**ENERGY SPECTRUM AND CHARGE RATIO OF THE HIGH-ENERGY
ATMOSPHERIC MUONS**

¹A.A. Kochanov, ²T.S. Sinegovskaya, ¹S.I. Sinegovsky

На основе Z-факторного метода решения уравнений адронного каскада в атмосфере исследовано влияние неопределенностей спектра и состава первичных космических лучей на поток и зарядовое отношение атмосферных мюонов на уровне моря в широком интервале энергий. Приведено сравнение рассчитанного энергетического спектра мюонов на уровне моря с новыми измерениями, полученными на установках L3+Cosmic и ALEPH.

Basing on the Z-factor method of solution of the atmospheric nuclear cascade equations we study the influence of the primary cosmic-ray spectrum and mass composition uncertainties on the atmospheric muon flux and charge ratio in a wide energy range. The calculated spectrum is compared with that of measured recently with the L3C and ALEPH spectrometers.

Введение

Сопоставление расчета спектров и зенитно-угловых распределений атмосферных мюонов с измерениями дает возможность решать два типа задач: а) при известном энергетическом спектре и составе первичных космических лучей (ПКЛ) исследовать адрон-ядерные взаимодействия; б) при заданной модели рождения адронов косвенно изучать характеристики ПКЛ.

В исследованиях мюонной компоненты космических лучей заметен существенный разброс экспериментальных данных, полученных на разных установках за последние 35 лет. При этом о несогласованности измерений можно говорить даже в области сравнительно низких энергий (до 20 ГэВ), где ошибки невелики. Расчеты потоков атмосферных мюонов также претерпели за эти годы значительные изменения (см. [1–3]), и связано это, может быть, не столько с уточнением моделей адронных взаимодействий, сколько с новыми прямыми измерениями спектра и состава ПКЛ. В последнее время появились работы [4–6], в которых утверждается, что измеренный спектр ПКЛ согласуется с данными мюонных экспериментов только в области энергий до 100 ГэВ, а при более высоких энергиях расчет дает величину потока мюонов, примерно на четверть меньшую наблюдаемой. Это расхождение интерпретируется авторами [4–6] как недооценка потока нуклонов, измеренного в баллонных и спутниковых экспериментах. Ниже мы покажем, что возможна и менее радикальная интерпретация этого расхождения: используемая в современных расчетах модель QGSJET01 дает, по-видимому, заниженные сечения рождения пионов в нуклон-ядерных соударениях.

В настоящей работе на основе метода решения уравнений нуклон-мезонного каскада в атмосфере [7–9] с использованием известной параметризации Кимеля–Мохова [10] (см. также [2, 3]) инклюзивных сечений рождения адронов выполнен расчет вертикальных потоков мюонов на уровне моря в интервале энергий 10–5000 ГэВ для двух параметризаций спектра и состава ПКЛ [11, 12]. Сравнение расчета с последними прямыми измерениями атмосферных мюонов высоких энергий [13–16] не позволяет сделать

достаточно уверенный выбор из двух аппроксимаций первичного спектра – варианта [11] (с высоким содержанием гелия) и спектра Ерлыкина–Крутиковой–Шабельского [12]. Сопоставление с результатами расчетов других авторов для одного и того же первичного спектра, но в рамках различных моделей адронных взаимодействий, позволяет оценить роль этого фактора в неопределенностях расчета мюонных потоков.

Уравнения переноса атмосферных мюонов

Атмосферные мюоны рождаются в распадах пионов $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$, двух- и трехчастичных распадах каонов

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu), K^\pm \rightarrow \pi^0 + \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu),$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu),$$

генерируемых непосредственно при столкновениях космических лучей с атмосферой Земли. Кроме того, мюоны генерируются в цепочках распадов

$$K \rightarrow \pi \rightarrow \mu (K_s^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-, K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0,$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + \ell^\mp + \bar{\nu}_\ell (\nu_\ell), \ell = e, \mu),$$

учет которых приводит к небольшим поправкам.

В одномерном приближении уравнение генерации и переноса мюонов в атмосфере имеет вид:

$$\left[\frac{\partial}{\partial h} + \frac{E_\mu^{\text{cr}}(\theta)}{Eh} \right] \mu(E, h, \theta) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial E} [\beta_\mu(E) \mu(E, h, \theta)] + G_\mu^{\pi, K}(E, h, \theta), \tag{1}$$

где $\mu(E, h, \theta)$ – дифференциальный энергетический спектр мюонов на глубине h , распространяющихся под зенитным углом θ ; E_μ^{cr} – критическая энергия мюона; $\beta_\mu(E) = -dE/dh = a_\mu(E) + b_\mu(E)E$ – непрерывные ионизационные потери (a_μ) и сумма радиационных и фотоядерных энергетических потерь мюона в воздухе ($b_\mu E$); $G_\mu^{\pi, K}(E, h, \theta)$ – функция генерации мюонов в распадах пионов и каонов:

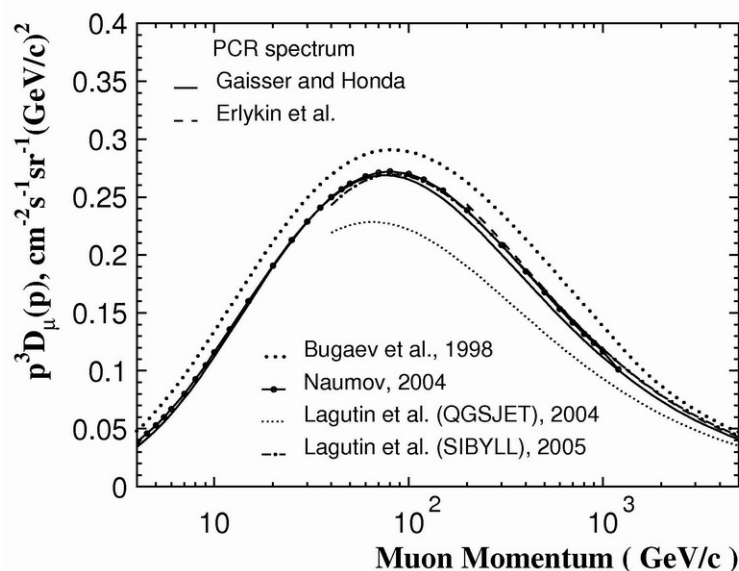


Рис. 1. Сравнение расчетов спектра мюонов вблизи вертикали на уровне моря.

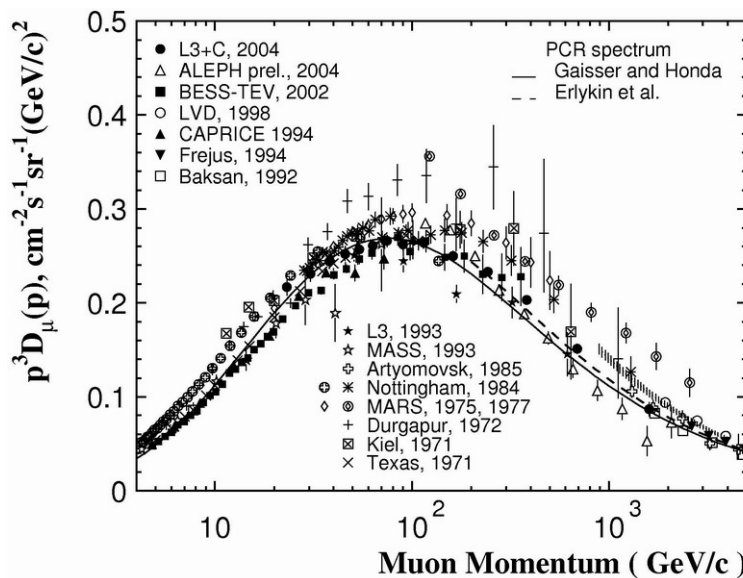


Рис. 2. Дифференциальный энергетический спектр мюонов для вертикали на уровне моря.

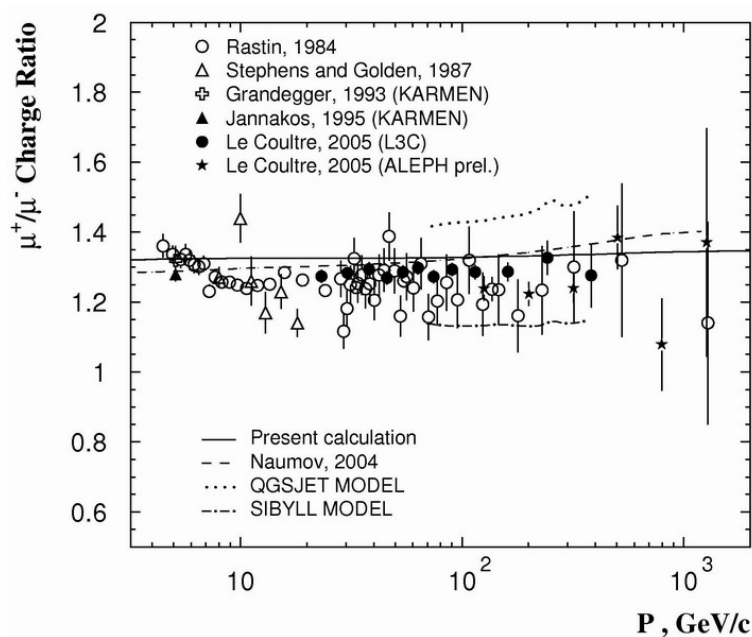


Рис. 3. Зарядовое отношение мюонов на уровне моря: расчет и данные эксперимента.

$$\begin{aligned}
 G_{\mu}^{\pi,K}(E, h, \theta) &= \\
 &= \sum_{M=\pi^{\pm}, K^{\pm}} B(M_{\mu 2}) \frac{m_M}{\tau_M \rho(h, \theta)} \int_{E_{M\mu 2}^{-}}^{E_{M\mu 2}^{+}} \frac{dE_0}{P_0^2} F_{\mu}^{M_{\mu 2}} \times \\
 &\times (E, E_0) M(E_0, h, \theta) + \\
 &+ \sum_{K=K^{\pm}, K_L^0, K_S^0} B(K_{\mu 3}) \frac{m_K}{\tau_K \rho(h, \theta)} \int_{E_{K\mu 3}^{-}}^{E_{K\mu 3}^{+}} \frac{dE_0}{P_0^2} F_{\mu}^{K_{\mu 3}} \times \\
 &\times (E, E_0) K(E_0, h, \theta).
 \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $B(M_{\mu 2})$ и $B(K_{\mu 3})$ – относительные вероятности $\pi_{\mu 2}$, $K_{\mu 2}$ и $K_{\mu 3}$ распадов; $F_{\mu}^{M_{\mu 2}}$ и $F_{\mu}^{K_{\mu 3}}$ – мюонные спектральные функции (спектры мюонов в распадах). В случае двухчастичных распадов мезонов функция $F_{\mu}^{M_{\mu 2}}$ есть $F_{\mu}^{M_{\mu 2}} = (1 - m_{\mu}^2 / m_M^2)^{-1}$. Явный вид спектральных функций для трехчастичных (полулептонных) мод распада каонов представлен в работе [17]. Пределы интегрирования в (2) равны:

$$\begin{aligned}
 E_{M_{\mu 2}}^{\pm} &= \frac{(m_M^2 + m_{\mu}^2)E \pm (m_M^2 - m_{\mu}^2)p}{2m_{\mu}^2} \\
 E_{K_{\mu 3}}^{\pm} &= \frac{(m_K^2 + m_{\mu}^2 - m_{\pi}^2)E \pm p \sqrt{(m_K^2 + m_{\mu}^2 - m_{\pi}^2)^2 - 4m_K^2 m_{\mu}^2}}{2m_{\mu}^2}.
 \end{aligned}$$

Решение уравнения (1) дается выражением:

$$\mu(E, h, \theta) = \int_0^h W_{\mu}(E, h, t, \theta) G_{\mu}^{\pi,K}(\varepsilon(E, h - t), t, \theta) dt, \quad (3)$$

в котором

$$\begin{aligned}
 W_{\mu}(E, h, t, \theta) &= \frac{\beta_{\mu}(\varepsilon(E, h - t))}{\beta_{\mu}(E)} \times \\
 &\times \exp \left[- \int_t^h \frac{m_{\mu}}{\tau_{\mu} \rho(h, \theta) \varepsilon(E, h - y)} dy \right]
 \end{aligned}$$

– вероятность выживания мюона при прохождении слоя воздуха от t до h в направлении θ ; а $\varepsilon(E, h)$ – корень уравнения

$$\int_E^{\varepsilon} \frac{dE}{\beta_{\mu}(E)} = h. \quad (4)$$

Результаты расчета

Результат нашего расчета дифференциального спектра мюонов на уровне моря (вертикаль) представлен на рис. 1 сплошной линией (спектр ПКЛ [11]) и штриховой (спектр ПКЛ [12], для которого расчет выполнен с 200 ГэВ). Вклады трехчастичных распадов K -мезонов, а также цепочек распадов $K \rightarrow \pi \rightarrow \mu$ учтены в виде поправок, которые составляют $\sim 2\text{--}3\%$ от потока спектра мюонов в этой области энергий.

Для сравнения на рис. 1 показаны также расчеты других авторов: [1] – верхняя пунктирная кри-

вая, [3] – кривая с символами, [6] – нижняя пунктирная кривая, [18] – штрихпунктир. Недавний расчет Нумова (частное сообщение; см. также [3]) согласуется с нашим расчетом в пределах $\sim 3\%$. Расчеты А.А. Лагутина и др. [6, 18] выполнены (код CORSIKA) для спектра ПКЛ [11] с использованием модели адрон-ядерных взаимодействий QGSJET01 (пунктир) и модели SIBYLL2.1 (штрихпунктирная кривая) (Лагутин, частное сообщение; см. также [18]). Обратим внимание на значительное различие двух последних расчетов: при одном и том же спектре ПКЛ модель QGSJET01 приводит к потоку мюонов, на $\sim 30\%$ ниже, чем модель SIBYLL2.1. Вероятная причина этого – заниженный выход пионов в pA -взаимодействиях модели QGSJET01 (см. [Юшков, Лагутин, доклад на ВККЛ]).

Сравнение настоящего расчета с экспериментом представлено на рис. 2 (обозначения те же, что и на рис. 1). Данные прямых измерений L3C, Cosmo-ALEPH, BESS-TeV и CAPRICE взяты из работ [13–16], данные 1971–1993 гг. – из работы [1]. Косвенные данные, т. е. результаты подземных измерений, пересчитанные к уровню моря, представлены экспериментами MACRO [19] (штрихованная область), LVD [20], Frejus [21], Баксан [22] и АСД [23]. Как видно, расчеты для двух параметризаций спектра ПКЛ [11] и [12] неплохо описывают новые измерения L3C, Cosmo-ALEPH, BESS-TeV и CAPRICE.

Зарядовое отношение мюонов (μ^+ / μ^-) на уровне моря очень чувствительно как к химическому составу первичных КЛ, так и к модели адронного каскада, что позволяет косвенно изучать взаимодействия адронов с ядрами. На рис. 3 сплошной линией показан наш расчет зарядового отношения мюонов на уровне моря в сравнении с экспериментальными данными [24–25] и расчетами других авторов, выполненных в рамках различных моделей адрон-ядерных взаимодействий [13].

Заключение

Сопоставление результатов расчета с недавними измерениями потоков атмосферных мюонов с энергиями до 5 ТэВ позволяет заключить, что вывод [4–6] о недооценке измеренного потока нуклонов, основанный на расчетах с помощью пакета CORSIKA, связан исключительно с моделью QGSJET01, тогда как расчет в модели SIBYLL2.1 тех же авторов [18] дает результат, как видно из рис. 1, близкий к нашей кривой, рассчитанной с сечениями Кимеля–Мохова.

Аппроксимация первичного спектра Гайссера–Хонды [11] дает в интервале 0.1–5 ТэВ близкие результаты (3–5 % отличия) в трех разных расчетах, отличающихся моделями адронных взаимодействий, (Кимель–Мохов и SIBYLL2.1) – данная работа, [3] и [18]. В нашем расчете два варианта первичного спектра – Ерлыкина–Крутиковой–Шабельского [12] и Гайссера–Хонды [11] – приводят к результатам, различающимся на те же $\sim 5\%$. Таким образом, неопределенности расчета, обусловленные сечениями адронных процессов, достигают $\sim 20\%$, тогда как первичный спектр в нашем расчете вносит неопределенность порядка 5 %.

Наш расчет зарядового отношения мюонов для уровня моря неплохо согласуется с экспериментом, а также расчетом работы [3]. Для сравнения – расчет [13] адронного каскада в рамках моделей QGSJET01 и SIBYLL2.1 дает кривые, лежащие выше и ниже основного массива экспериментальных данных.

Авторы благодарят В.А. Наумова, А.А. Лагутина и О.Г. Рязскую за полезные обсуждения настоящей работы. А.А. Кочанов благодарит Иркутский государственный университет за дополнительную поддержку работы грантом № 111-02-000/05.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bugaev E.V., Misaki A., Naumov V.A., et al. Atmospheric muon flux at sea level, underground, and underwater // Phys. Rev. D. 1998. V. 58, 054001; hep-ph/9803488.
2. Fiorentini G., Naumov V.A., Villante F.L. Atmospheric neutrino flux supported by recent muon experiments // Phys. Lett. B. 2001. V. 510. P. 173–188.
3. Naumov V.A. Atmospheric muons and neutrinos // Proc. 2nd Workshop on neutrino telescopes. Hamburg, 2001; hep-ph/0201310.
4. Лагутин А.А., Тюменцев А.Г., Юшков А.В. О причинах возникновения дефицита расчетного потока мюонов на уровне моря для $E_{\mu} \geq 100$ ГэВ // Изв. АГУ. 2004. № 5. С. 32–43.
5. Lagutin A.A., Tyumentsev A.G., Yushkov A.V. On inconsistency of experimental data on primary nuclei spectra with sea level muon intensity measurements // J. Phys. G. 2004. V. 30. P. 573–596.
6. Лагутин А.А., Тюменцев А.Г., Юшков А.В. Дефицит расчетного потока мюонов на уровне моря для ГэВ: Анализ возможных причин // ЯФ. 2006. Т. 69. P. 293–302.
7. Наумов В.А. Синеговская Т.С. Элементарный метод решения уравнений переноса нуклонов космических лучей в атмосфере // ЯФ. 2000. Т. 63. С. 2020–2028.
8. Naumov V.A., Sinegovskaya T.S. Atmospheric proton and neutron spectra at energies above 1 GeV // Proc. 27 ICRC. Hamburg, 2001. V. 1. P. 4173–4176; hep-ph/0106015.
9. Кочанов А.А., Синеговская Т.С., Синеговский С.И. Генерация пионов в адронных каскадах, инициируемых космическими лучами высоких энергий в атмосфере Земли // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды VIII конф. молодых ученых «Астрофизика и физика околоземного космического пространства». Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2005. С. 202–204.
10. Кимель Л.Р., Мохов Н.В. Распределения частиц в диапазоне энергий 10^{-2} – 10^{12} эВ, инициированные в плотных средах высокоэнергетическими адронами // Изв. вузов. Физика. 1974. Вып. 10. С. 17.
11. Gaisser T.K., Honda M. Flux of atmospheric neutrinos // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2002. V. 52. P. 153–199; hep-ph/0203272.
12. Ерлыкин А.Д., Крутикова Н.П., Шабельский Ю.М. Прохождение космических лучей через атмосферу в модели кварк-глюонных струн // ЯФ. 1987. Т. 45. С. 1075–1084.
13. Le Coultre P. Cosmic ray observations and results from experiments using LEP detectors at CERN // Proc. 29th ICRC. Pune, 2005. V. 10. P. 137–150.
14. Achard P. et al. Measurement of the atmospheric muon spectrum from 20 to 3000 GeV // Phys. Lett. B. 2004. V. 598. P. 15–32.
15. Haino S. et al. Measurements of primary and atmospheric cosmic-ray spectra with the BESS-TeV spectrometer // Phys. Lett. B. 2004. V. 594. P. 35–46; astro-ph/0403704.
16. Kremer J. et al. Measurements of ground-level muons at two geomagnetic locations // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83, N. 21. P. 4241.
17. Наумов В.А., Синеговская Т.С., Синеговский С.И. Спектры вторичных частиц в $K_{\tau 3}$ распадах // Байкальская школа по фундаментальной физике «Астрофизика и физика микромира». Иркутск: изд-во ИГУ, 1998. С. 211–226.
18. Lagutin A.A., Tyumentsev A.G., Yushkov A.V. Primary proton spectrum in the energy range 5 – 10^3 TeV from the sea level muon spectrum // Proc. 29th ICRC. Pune, 2005. V. 6. P. 77–80; astro-ph/0507017.
19. Ambrosio M., Antolini R., Auriemma G., et al. Vertical muon intensity measured with MACRO at the Gran Sasso laboratory // Phys. Rev. D. 1995. V. 52, N 7. P. 3793–3802.
20. Aglietta M., Alpat B., Aleya E.D., et al. Muon “depth-intensity” relation measured by LVD underground experiment and cosmic-ray muon spectrum at sea level // Phys. Rev. D. 1998. V. 58. 092005.
21. Rhode W. Measurements of the muon-flux with Frejus-detector // Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.) 1994. V. 35. P. 250–253.
22. Бакатанов В.Н., Новосельцев Ю.Ф., Новосельцева Р.В. и др. Интенсивность мюонов космических лучей и первичные нуклоны по данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа // ЯФ. 1992. Т. 55. С. 2107–2116.
23. Еникеев Р.И., Зацепин Г.Т., Королькова Е.В. и др. Изучение мюонного спектра на глубине 570 м. в. э. под землей с помощью 100-тонного сцинтилляционного детектора // ЯФ. 1998. Т. 47. С. 1044–1053.
24. Rastin B.C. A study of the muon charge ratio at sea level within the momentum range 4 to 2000 GeV/c // J. Phys. G. 1984. V. 10. P. 1629–1638.
25. Stephens S.A., Golden R.L. // Proc. 20th ICRC. Moscow, 1987. V. 6. P. 173.
26. Jannakos T.E. Muon capture reactions on C-12 and C-13 in the KARMEN detector // FZKA Report 5520, Forschungszentrum Karlsruhe, 1995.

¹Иркутский государственный университет, Иркутск

²Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск