

УДК 524.1

ПРОВЕРКА РАСЧЕТОВ СПЕКТРОВ АТМОСФЕРНЫХ МЮОНОВ И НЕЙТРИНО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2019 г. А. А. Кочанов^{1,2,*}, А. Д. Морозова^{3,4}, Т. С. Синеговская⁵, С. И. Синеговский^{2,3}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования “Иркутский государственный университет”, Иркутск, Россия

³Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

⁵Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования “Иркутский государственный университет путей сообщения”, Иркутск, Россия

*E-mail: kochanov@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Представлены результаты расчетов спектров атмосферных мюонов и мюонных нейтрино для энергий 10 ГэВ–10 ПэВ, выполненных с использованием моделей адрон-ядерных взаимодействий Кимеля–Мохова (КМ), SIBYLL 2.1, EPOS LHC, QGSJET-II и двух известных параметризаций спектра первичных космических лучей – Зацепина–Сокольской и Хилласа–Гайсера. Расчеты для моделей КМ, EPOS LHC и SIBYLL 2.1 в целом хорошо согласуются с измерениями спектра атмосферных мюонов в эксперименте IceCube и IceTop. Расчет потоков атмосферных мюонных нейтрино, выполненный для моделей EPOS LHC, КМ и SIBYLL 2.1 в комбинации со спектром космических лучей Хилласа–Гайсера в целом согласуется с данными измерений в экспериментах IceCube, ANTARES и Super-Kamiokande.

DOI: 10.1134/S0367676519080209

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные мюоны и нейтрино генерируются в распадах мезонов, рождающихся в адронном каскаде при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли. Энергетический спектр и зенитно-угловое распределение атмосферных мюонов и нейтрино чувствительны к деталям рождения и распада пионов, каонов и более тяжелых мезонов. Сравнение расчетных и измеренных характеристик потоков атмосферных мюонов и нейтрино позволяет получать информацию о спектре и составе первичных космических лучей, если задана модель адрон-ядерных взаимодействий. Если энергетический спектр и состав первичных космических лучей (ПКЛ) хорошо изучен для какого-то диапазона энергий, то сопоставление расчета и измерений спектра и зенитно-углового распределения мюонов и нейтрино дает возможность изучения процессов рождения и распада адронов – источников мюонов и нейтрино. В области энергий 0.5–1 ПэВ совместное исследо-

вание энергетического спектра и углового распределения атмосферных мюонов позволит выделить вклад в потоки мюонов от распада очарованных частиц (D^{\pm} , D^0 , D^0 , D_s^{\pm} , Λ_c). В настоящей работе расчеты спектра атмосферных мюонов и нейтрино в интервале энергий 10–10⁸ ГэВ выполнены для ряда моделей адрон-ядерных взаимодействий Кимеля–Мохова [1, 2], QGSJET II [3, 4], SIBYLL 2.1 [5], EPOS LHC [6, 7]. Используемые в расчете параметризации спектра ПКЛ опираются на данные измерений и учитывают излом спектра. Спектр Зацепина–Сокольской (ZS) [8] опирается на данные прямых измерений, полученные в эксперименте ATIC-2 [9] в интервале энергий 10–10⁴ ГэВ, и является экстраполяцией этих данных в область энергий до 100 ПэВ. Модель спектра космических лучей Хилласа–Гайсера [10] учитывает три вида источников: остатки сверхновых, галактические источники, дающие вклад в поток космических лучей между “коленом” (~3 ПэВ) и “лодыжкой” (~4 ЭэВ), и внегалак-

тические объекты – активные ядра галактик, источники гамма-всплесков. В расчете используется версия модели Хилласа–Гайссера со смешанным составом для внегалактических источников (H3a).

СПЕКТР АТМОСФЕРНЫХ МЮОНОВ

Потоки атмосферных мюонов состоят из двух компонент: 1) π -, K -мюоны генерируются в распадах пионов и каонов, имеют мягкий энергетический спектр и анизотропное зенитно-угловое распределение; 2) “прямые” (prompt) мюоны образуются в результате распадов короткоживущих массивных очарованных мезонов и барионов (D, Λ_c), характеризуются жестким спектром и слабой зависимостью от зенитного угла и должны давать заметный вклад при энергиях выше 500 ТэВ. Кроме того, возможно, что распады мезонов $\eta, \eta', \rho, \omega, \phi, \eta_c, J/\psi$ на $\mu^+\mu^-$ пары могут давать вклад, сопоставимый с вкладом очарованных частиц при тех же энергиях [11, 12].

Наши расчеты выполнены с использованием двух методов решения каскадных уравнений – аналитического метода решения системы интегродифференциальных уравнений (метод $Z(E, h)$ -функций) [13, 14] и метода численного решения дискретных каскадных уравнений MCEq [15–17]. Основная часть расчета сделана в рамках метода $Z(E, h)$ -функций, в котором была решена задача о переносе нуклонов и генерации мезонов в атмосфере без упрощающих предположений о спектре ПКЛ и поведении сечений адрон-ядерных взаимодействий. Метод многократно проверялся нами путем тщательного сравнения эксперимента с расчетами потоков и спектров атмосферных адронов, мюонов в широком интервале энергий для различных зенитных углов [14, 18, 19].

На рис. 1а приведено сравнение расчета спектра атмосферных мюонов с данными совместных измерений детектора IceCube и уставки IceTop по регистрации ШАЛ на поверхности льда (над нейтринным телескопом IceCube) [20] (квадратики). Расчет выполнен для моделей KM, SIBYLL 2.1, QGSJET II-03 и параметризаций спектра ПКЛ Зацепина–Сокольской (ZS) и Хилласа–Гайссера (H3a). На рис. 1б представлены данные измерений IceCube [21] для двух интервалов зенитных углов, $\theta < 60^\circ$ (кружки) и $60^\circ < \theta < 84^\circ$ (квадратики) в сравнении с нашим расчетом. Здесь добавлена кривая расчета с моделью EPOS-LHC (пунктир) и показан (тонкая сплошная линия) вклад “прямых” мюонов, рассчитанный в модели кварк-глюонных струн (QGSM) [22, 23] для спектра ПКЛ Никольского, Стаменова, Ушева (NSU) [24]. Данные других экспериментов взяты из работ [14, 18, 19].

Из рис. 1б видно, что модели Кимеля–Мохова и EPOS LHC в комбинации со спектром Хилла-

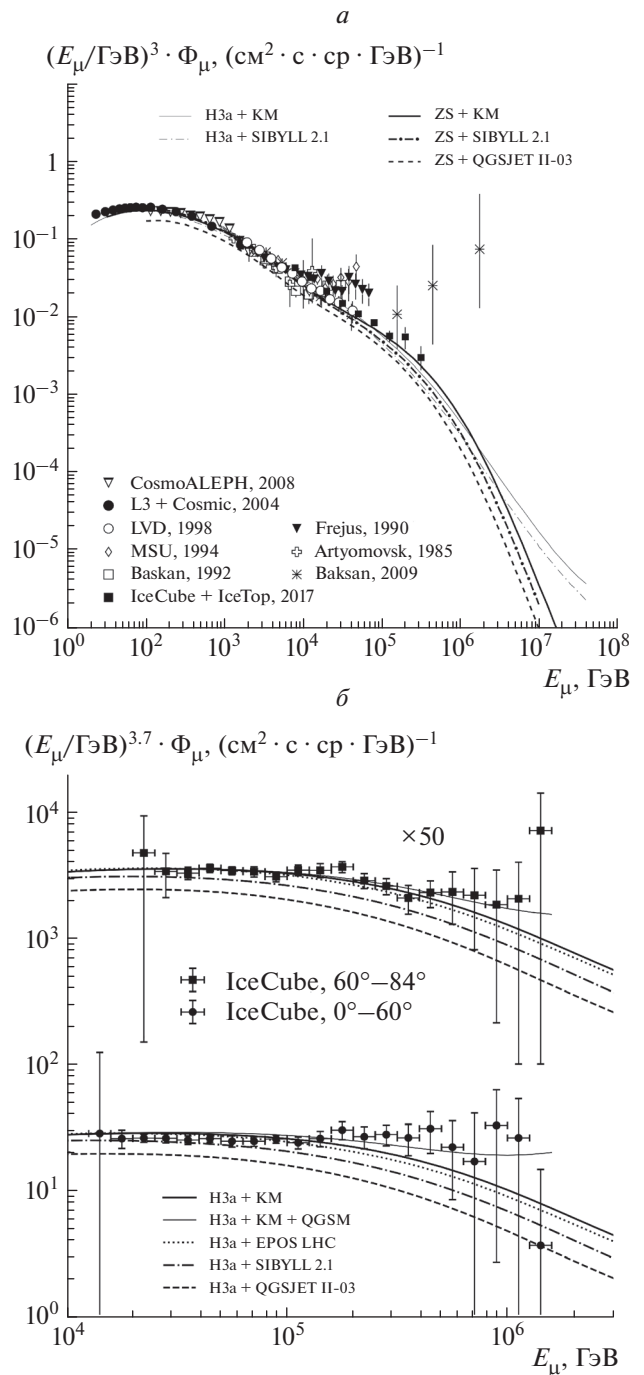


Рис. 1. а – Сравнение расчетного спектра атмосферных мюонов для $\cos\theta = 0.9$ с данными совместных измерений IceCube и IceTop [20] (квадратики). Расчет выполнен для моделей KM, SIBYLL 2.1, QGSJET II-03 и параметризаций спектра ПКЛ Зацепина–Сокольской (ZS) и Хилласа–Гайссера (H3a); б – Данные измерений IceCube для двух интервалов зенитных углов, $\theta < 60^\circ$ (кружки) и $60^\circ < \theta < 84^\circ$ (квадратики) в сравнении с расчетом. Здесь добавлена кривая расчета с моделью EPOS-LHC (пунктир) и показан (тонкая сплошная линия) вклад “прямых” мюонов в модели кварк-глюонных струн [23].

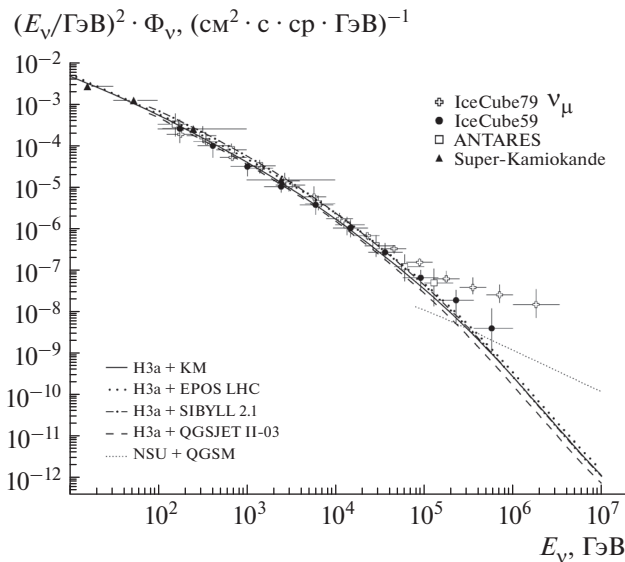


Рис. 2. Спектр мюонных нейтрино, усредненный по интервалу зенитных углов 90° – 180° . Кривые – расчет для моделей адронных взаимодействий Кимеля–Мохова, EPOS LHC, SIBYLL 2.1 и QGSJET II-03 в комбинации с моделью спектра ПКЛ Хилласа–Гайссера. Вклад “прямых” нейтрино (тонкая пунктирная кривая) рассчитан для модели кварк-глюонных струн (QGSM). Символы – измерения IceCube, ANTARES и Super-Kamiokande.

са–Гайссера (H3a) дают близкие по величине и форме спектры мюонов. Результат для модели SIBYLL 2.1 + H3a до ~ 10 ТэВ довольно близок к спектру, рассчитанному с моделями KM и EPOS LHC, но при более высоких энергиях различие возрастает. В области энергий ($E_\mu \geq 100$ ТэВ) расчет для модели EPOS LHC практически совпадает с расчетом для модели Кимеля–Мохова. Наибольшее отклонение расчетного потока мюонов от экспериментального дает модель QGSJET II-03, которая приводит к заниженному потоку мюонов, как на вертикали (рис. 1а), так и при усреднении спектра по двум интервалам зенитных углов (рис. 1б). Таким образом, модели EPOS LHC и KM выделены с точки зрения соответствия расчета данным эксперимента. Данные эксперимента IceCube [21], как видно из рис. 1б, недвусмысленно свидетельствуют о наличии мюонной компоненты с более жестким спектром при энергиях > 500 ТэВ – т.е. о вкладе “прямых” мюонов. Расчет спектра с учетом вклада “прямых” мюонов в рамках модели QGSM [23] практически воспроизводит результат измерений IceCube.

СПЕКТР АТМОСФЕРНЫХ МЮОННЫХ НЕЙТРИНО

Обработка данных IceCube в конфигурации с 79 стрингами (IC79) [25] позволила увидеть изме-

нение показателя спектра мюонных нейтрино, обусловленное вкладом астрофизических нейтрино; последние доминируют при энергиях выше 500 ТэВ. Расчет усредненного по зенитному углу спектра ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) выполнен для адронных моделей Кимеля–Мохова, QGSJET II-03, SIBYLL 2.1 и EPOS LHC с использованием спектра Хилласа–Гайссера (H3a). В области энергий ($E_\nu \leq 100$ ГэВ) расчет с моделью Кимеля–Мохова (сплошная линия на рис. 2) практически совпадает с расчетом для модели EPOS LHC [6, 7] (жирный пунктир). Для энергий выше 10 ТэВ кривая расчета с моделью KM близка к модели SIBYLL 2.1 (штрихпунктирная линия). Результаты измерений спектра атмосферных нейтрино ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) в экспериментах IceCube с конфигурацией 59 и 79 стрингов [25, 26], ANTARES [27] и Super-Kamiokande [28] в сравнении с расчетом также показаны на рис. 2.

Новая обработка данных IceCube (79 стрингов) [25] позволила восстановить спектр мюонных нейтрино, простирающийся от 125 ГэВ до 3.2 ПэВ. Доминирование астрофизических нейтрино над атмосферными начинается с энергий ~ 500 ТэВ, и, казалось бы, здесь нет места “прямым” нейтрино. Однако сравнение расчета с данными измерения спектра атмосферных нейтрино IceCube-59 (черные кружки) показывает, что добавление вклада “прямых” нейтрино (пунктирная линия на рис. 2), рассчитанного для модели QGSM [23] (см. также [29, 30]), не только не противоречит данным IceCube, но и улучшает согласие настоящего расчета с экспериментом.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты спектра атмосферных мюонов, выполненные для набора моделей адрон-ядерных взаимодействий Кимеля–Мохова, EPOS LHC и SIBYLL 2.1 в комбинации со спектрами ПКЛ Хилласа–Гайссера и Зацепина–Сокольской, находятся в хорошем согласии как с данными прежних экспериментов, так и с недавними результатами, полученными в экспериментах IceCube и IceTop [20, 21]. Модель QGSJET II-03 приводит к заниженному потоку мюонов для всех доступных наборов зенитных углов и используемых нами спектров ПКЛ. Новые спектры мюонов вблизи вертикали, полученные на установках IceCube и IceTop, хорошо согласуются с данными прошлых экспериментов, продолжая на область выше 100 ТэВ условную линию, выстроенную измерениями L3 + Cosmic, АСД (Артемовск) и LVD (рис. 1а).

Данные о высокоэнергетических спектрах атмосферных мюонов для двух диапазонов зенитных углов, полученные в эксперименте IceCube, свидетельствуют в пользу вклада прямых мюонов:

экспериментальное наблюдение уменьшения модуля спектрального индекса мюонов при энергиях выше 500 ТэВ — там, где поток обычных мюонов должен уменьшаться в силу излома спектра космических лучей. Этот эффект сильнее проявляется для зенитных углов вблизи вертикали, что также подтверждается в эксперименте (см. рис. 1б). Экспериментальные точки новых измерений IceCube на фоне расчетного потока обычных атмосферных мюонов обнаруживают присутствие “прямых” мюонов, более отчетливо проявляющееся для зенитных углов $\theta < 60^\circ$ при энергиях выше 500 ТэВ. Нельзя исключить, однако, что поток “прямых” мюонов, состоит не только из мюонов, возникающих в распадах очарованных частиц, но также включает мюоны от редких распадов мезонов η , η' , ρ , ω , ϕ [11, 12]. Вклады этих двух групп источников невозможно будет разделить, поскольку их спектральные индексы практически совпадают.

Сравнение рассчитанных спектров мюонных нейтрино с данными измерений IceCube, ANTARES и Super-Kamiokande в целом подтверждают теоретические представления о механизмах генерации нейтрино в атмосфере Земли и надежность выполненных расчетов. Спектры мюонных нейтрино, рассчитанные с использованием адронных моделей Кимеля—Мохова, SIBYLL 2.1 и EPOS LHC, в целом согласуются с данными измерений. Расчеты с использованием адронных моделей EPOS LHC, Кимеля—Мохова и спектра ПКЛ Хилласа—Гайссера лучше описывают экспериментальные данные по спектрам атмосферных мюонов и мюонных нейтрино в области энергий ниже 1 ПэВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы базового финансирования ФНИ П.16 и поддержке Минобрнауки Российской Федерации (гос.задания 3.9678.2017/БЧ, 3.904.2017/ПЧ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кимель Л.Р., Мохов Н.В. // Изв. вузов. Физика. 1974. № 10. С. 17.
2. Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П. Прохождение частиц высоких энергий через вещество. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
3. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // Nucl. Phys. B. 1997. V. 52. P. 17.
4. Ostapchenko S. // Nucl. Phys. B. 2008. V. 175–176. P. 73.
5. Ahn E.-J., Engel R., Gaisser T.K. et al. // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. Art. № 094003.
6. Pierog T., Karpenko Iu., Katzy J.M. et al. // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. Art. № 034906.
7. Pierog T. // EPJ Web Conf. 2017. V. 145. Art. № 18002.
8. Zatsepin V.I., Sokolskaya N. V. // Astron. Astrophys. 2006. V. 458. P. 1.
9. Панов А.Д., Адамс Дж.Х., Ан Х.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. С. 512; Panov A.D., Adams J.H., Ahn H.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2007. V. 71. P. 494.
10. Gaisser T.K. // Astropart. Phys. 2012. V. 35. P. 801.
11. Волкова Л.В. // ЯФ. 2011. Т. 74. С. 336.
12. Illana J.I., Lipari P., Masip M., Meloni D. // Astropart. Phys. 2011. V. 34. P. 663.
13. Наумов В.А., Синеговская Т.С. // ЯФ. 2000. Т. 63. № 11. С. 2020.
14. Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. // Astropart. Phys. 2008. V. 30. P. 219.
15. Fedynitch A., Engel R., Gaisser T.K. et al. // EPJ Web Conf. 2015. V. 99. Art. № 08001.
16. Fedynitch A., Engel R., Gaisser T.K. et al. // Proc. 34th ICRC. (Hague, 2015). P. 1129.
17. <https://github.com/afedynitch/>
18. Sinegovsky S.I., Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S. et al. // Int. J. Mod. Phys. A. 2010. V. 25. P. 3733.
19. Кочанов А.А., Синеговская Т.С., Синеговский С.И. // ЖЭТФ. 2013. Т. 143. № 3. С. 459; Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. // JETP. 2013. V. 116. № 3. P. 395.
20. Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al. // arXiv: 1710.01194. 2017.
21. Aartsen M.G., Abraham K., Ackermann M. et al. // Astropart. Phys. 2016. V. 78. P. 1.
22. Кайдалов А.Б., Пискунова О.И. // ЯФ. 1986. Т. 43. С. 1545; Kaidalov A.B., Piskunova O.I. // Sov. J. Nucl. Phys. 1985. V. 41. P. 816.
23. Bugaev E.V., Naumov V.A., Sinegovsky S.I., Zaslavskaya E.S. // Nuovo Cim. C. 1989. V. 12. P. 41.
24. Никольский С.И., Стаменов Й.Н., Ушев С.З. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. С. 18; Nikolsky S.I., Stamenov J.N., Ushev S. Z. // Sov. Phys. JETP 1984. V. 60. P. 10.
25. Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al. // Eur. Phys. J. C. 2017. V. 77. P. 692.
26. Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al. // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. P. 116.
27. Adrian-Martinez S., Albert A., Samarai I.A. et al. // Eur. Phys. J. C. 2013 V. 73. P. 2606.
28. Richard E., Okumura K., Abe K. et al. // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. Art. № 052001.
29. Sinegovskaya T.S., Morozova A.D., Sinegovsky S.I. // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. Art. № 063011.
30. Морозова А.Д., Кочанов А.А., Синеговская Т.С., Синеговский С.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 555; Morozova A.D., Kochanov A.A., Sinegovsky S.I., Sinegovskaya T.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 4. P. 516.