

УДК 524.1

СПЕКТРЫ АТМОСФЕРНЫХ НЕЙТРИНО: СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СРАВНЕНИЯ РАСЧЕТА С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

© 2021 г. А. А. Кочанов^{1,2,*}, К. С. Кузьмин^{3,4}, А. Д. Морозова^{2,3},
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
Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва, Россия

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

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

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Выполнен статистический анализ сравнения расчетных спектров атмосферных нейтрино с данными измерений в экспериментах Frejus, Super-Kamiokande, AMANDA, ANTARES и IceCube. Расчет спектров атмосферных нейтрино выполнен в рамках одной вычислительной схемы для набора моделей адрон-ядерных взаимодействий, используемых также при моделировании ШАЛ. Для сравнения расчетных энергетических спектров с экспериментом использовался стандартный критерий χ^2 . Анализ позволил оценить уровень статистической значимости различных моделей в контексте соответствия данным разных экспериментов.

DOI: 10.31857/S0367676521040190

ВВЕДЕНИЕ

Нейтрино высоких энергий в атмосферных ливнях представляют интерес как отдельная задача, и как неустранимый фон при детектировании нейтрино от удаленных астрофизических источников. К настоящему времени энергетические спектры атмосферных мюонных и электронных нейтрино измерены в экспериментах Frejus [1], AMANDA-II [2], IceCube [3–7], ANTARES [8], и Super-Kamiokande [9]. К тому моменту, когда на Южном полюсе заработал детектор AMANDA, расчеты потоков атмосферных нейтрино с использованием метода Монте Карло были выполнены до энергий 10 ТэВ [10–12], и затем использовались [9, 13] при обработке экспериментальных данных IceCube и Super-Kamiokande (SK). В эксперименте IceCube референтным расчетом фона атмосферных нейтрино служит расчет Монте Карло [11], результаты которого экстраполируются на область энергий в сотни ТэВ с использо-

ванием параметризации, в которой изначально не был учтен излом спектра космических лучей (КЛ), что потребовало внесения нормировочных поправок [13]. Таким образом, очевидна необходимость расчета спектров атмосферных нейтрино в широком диапазоне энергий в рамках одной вычислительной схемы, применимость которой подтверждалась бы хорошим согласием с экспериментальными данными.

В работе выполнен статистический анализ сравнения расчетных спектров атмосферных нейтрино высоких энергий с данными измерений с использованием стандартного критерия χ^2 . Расчет спектров атмосферных нейтрино был выполнен [14–19] в рамках метода [20–22] для моделей адрон-ядерных взаимодействий QGSJET II-03 [23–25], SIBYLL 2.1 [26] и модели Кимеля–Мохова (КМ) [27, 28], используемых также в моделировании ШАЛ космических лучей.

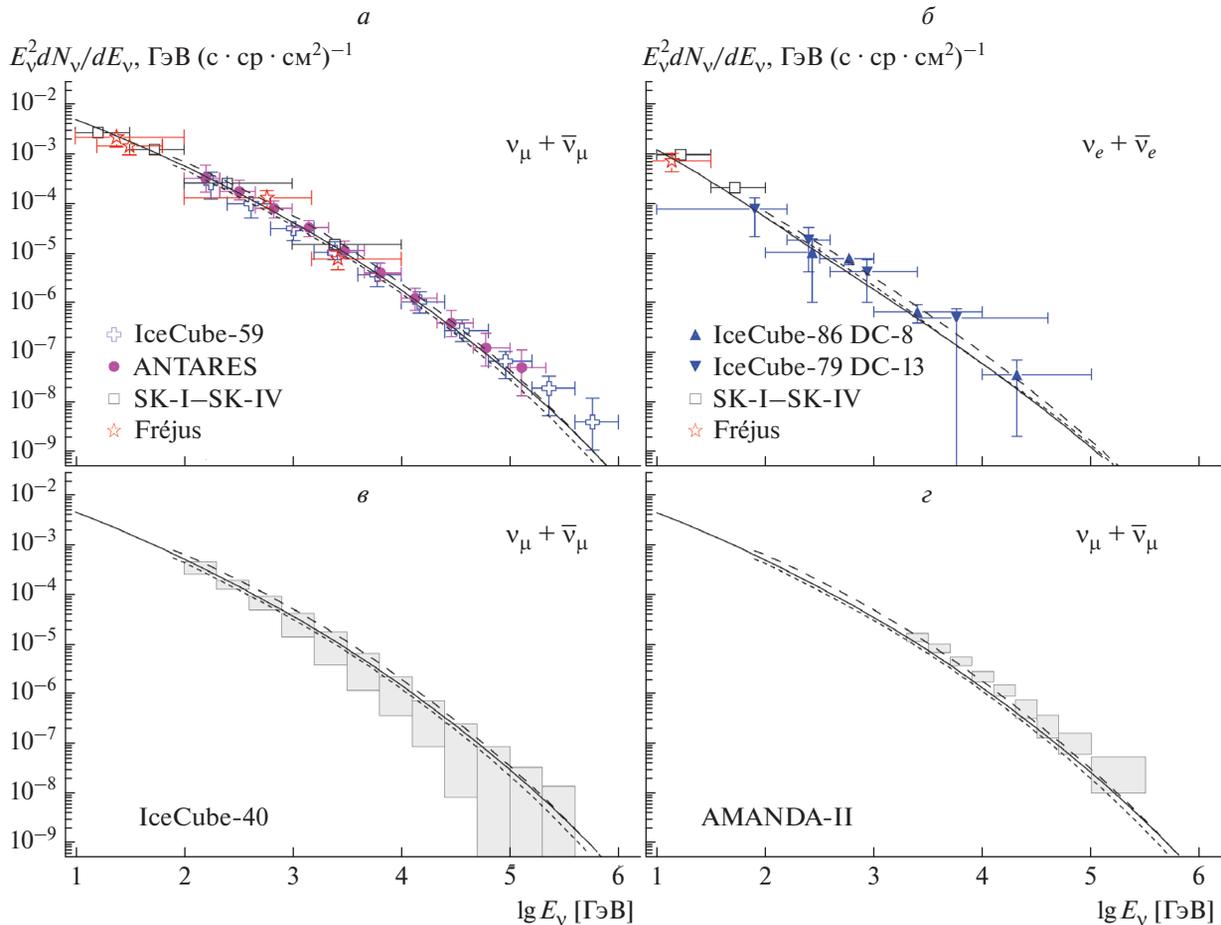


Рис. 1. Спектры атмосферных нейтрино ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) (а) и ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) (б), измеренные в экспериментах Frejus [1], IceCube-59 [4, 5], IceCube-79 [7], IceCube-86 [6], ANTARES [8], Super-Kamiokande [9] для интервала zenithных углов 90° – 180° . На панелях (в) и (г) представлены спектры ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$), измеренные в экспериментах IceCube-40 [3] и AMANDA-II [2] для интервалов zenithных углов 97° – 180° и 100° – 180° соответственно. Кривые – спектры нейтрино, рассчитанные для моделей адрон-ядерных взаимодействий КМ (сплошные линии), SIBYLL 2.1 (верхняя штриховая линия) и QGSJET II-03 (нижняя штриховая линия, короткие штрихи) в комбинации со спектром космических лучей Хилласа–Гайссера (H3a) [30].

РАСЧЕТ СПЕКТРОВ АТМОСФЕРНЫХ НЕЙТРИНО

Расчет энергетических спектров атмосферных электронных и мюонных нейтрино в интервале энергий ~ 100 ГэВ– 10 ПэВ выполнен с использованием двух параметризаций спектра космических лучей – Зацепина–Сокольской (ZS) [29] и Хилласа–Гайссера (H3a) [30]. Спектр ZS опирается на данные прямых измерений, полученные в эксперименте АТИС-2 [31, 32] в интервале энергий 10 – 10^4 ГэВ, и является экстраполяцией этих данных на область энергий до 100 ПэВ. В модели Хилласа–Гайссера используется версия со смешанным составом для внегалактической компоненты (H3a). В данной работе используется расчет для обычных источников нейтрино (π -, K-распады) в области энергий ниже 600 ТэВ, без учета вклада от

распадов очарованных частиц (“прямые” нейтрино), поскольку в этой области по данным эксперимента IceCube “прямые” нейтрино не обнаружены [33] (расчет спектра “прямых” нейтрино см. в [34]).

Спектр атмосферных мюонных нейтрино ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) измерен для диапазонов энергии, указанных в таблицах ниже. Статистические и систематические неопределенности потока мюонных нейтрино изменяются в пределах 18 – 30% для относительно невысоких энергий и до 60 – 250% для высоких энергий (IceCube-59). Ошибки в измерениях спектров ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) в IceCube [4, 6] – 25 – 100% , в эксперименте Super-Kamiokande сравнительно небольшие ошибки 15 – 21% , Frejus – 26 – 55% для ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) и ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$).

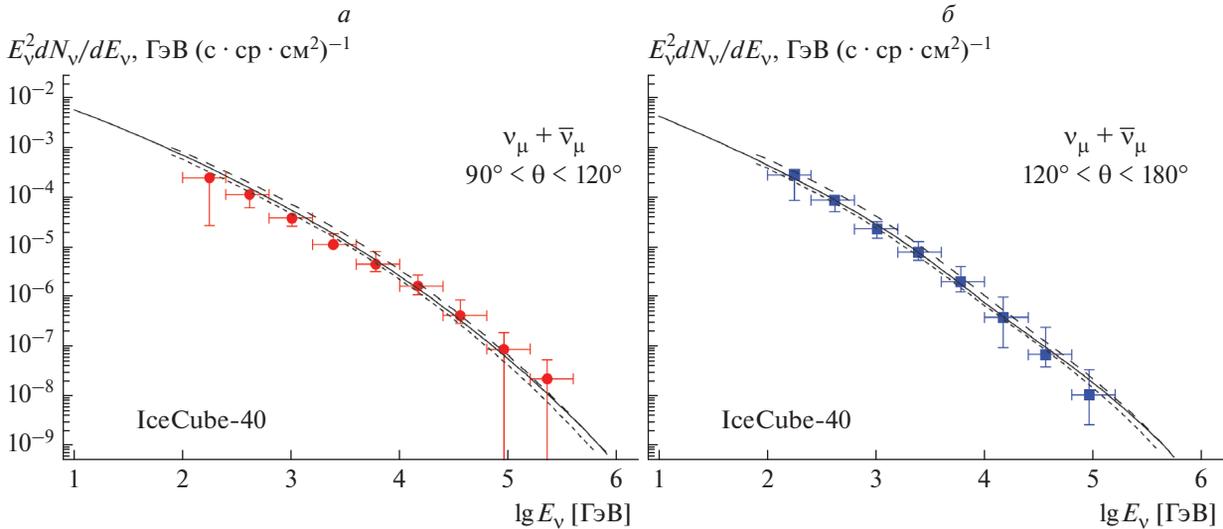


Рис. 2. Спектры атмосферных мюонных нейтрино ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$), измеренные в эксперименте IceCube-59 [5] в двух интервалах зенитных углов: 90° – 120° (а) и 120° – 180° (б). Кривые – расчет для моделей КМ, SIBYLL 2.1, QGSJET II-03 и спектра космических лучей НЗа (обозначения те же, что и на рис. 1).

Для сравнения расчетных энергетических спектров с измерениями использовался стандартный критерий χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{ndf} \frac{(\Phi_i^{\text{exp}} - \Phi_i^{\text{calc}})^2}{(\Delta\Phi_i^{\text{exp}})^2}.$$

Здесь $\Phi_i(E_\nu) \equiv \langle dN_\nu/dE_\nu \rangle_\theta$ – дифференциальный спектр нейтрино, усредненный по зенитному углу, $\Delta\Phi_i^{\text{exp}}$ – неопределенность измерений потока в i -ом бине, ndf – число экспериментальных энергетических бинов.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Спектры атмосферных нейтрино, измеренные в экспериментах Frejus [1], AMANDA-II [2], IC40 [3], IC59 [4–7], ANTARES [8], SK [9], показаны на рис. 1: ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) (а, в, з) и ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) (б). Кривые – спектры нейтрино, усредненные по зенитным углам, рассчитанные для моделей КМ, QGSJET II-03 и SIBYLL 2.1. На рис. 2 показаны спектры ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$), измеренные в эксперименте IC59 [5] в интервалах углов 90° – 120° и 120° – 180° , и рассчитанные для тех же моделей и спектра космических лучей НЗа.

Результаты проведенного анализа показаны в табл. 1 и 2, где приведены значения χ^2 и χ^2/ndf , полученные для данных, вошедших в расчет. Расчеты выполнены с использованием параметризаций НЗа и ZS спектра КЛ. В табл. 1 представлены три группы результатов: 1) анализ данных двух

конфигураций детектора IC40, IC59); 2) анализ экспериментов ANTARES, AMANDA-II, Frejus и SK по отдельности; 3) совместный анализ всех экспериментальных данных. С данными IC40 очень хорошо согласуются расчетные спектры моделей QGSJET II-03 ($\chi^2/ndf = 0.05$) и КМ (0.10), чуть хуже SIBYLL 2.1 (1.24). Также в табл. 1 приведены два набора значений χ^2 для данных IceCube [5]: 1) набор получен из совместного анализа данных IC59 для зенитных углов $90^\circ < \theta < 120^\circ$ и $120^\circ < \theta < 180^\circ$; 2) набор χ^2 получен из данных IC59, объединенных авторами эксперимента в один интервал $90^\circ < \theta < 180^\circ$. Данные, полученные в интервале углов $90^\circ < \theta < 120^\circ$, описываются расчетными потоками заметно хуже данных для углов $120^\circ < \theta < 180^\circ$. Это может указывать на неточность в анализе событий от нейтрино, приходящих в детектор под углами вблизи горизонта. Расчеты дают некоторое указание на то, что параметризация НЗа спектра КЛ предпочтительнее ZS: во всех случаях наблюдается χ^2 (НЗа) $<$ χ^2 (ZS). Модель КМ приводит к очень близким значениям χ^2 для параметризаций спектра КЛ НЗа и ZS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчитанные спектры атмосферных нейтрино хорошо согласуются с данными измерений, полученными к настоящему времени в экспериментах Frejus, AMANDA, IceCube и ANTARES. Данные IceCube-59 для ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) лучше всего описываются моделью QGSJET II-03; для ANTARES, как и для полного набора данных, более предпочтительной

Таблица 1. Значения χ^2/ndf , полученные для расчетных спектров ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) и экспериментальных данных Frejus [1], AMANDA [2], IceCube-40 [3], IceCube-59 [5], ANTARES [8], Super-Kamiokande [9]. Указаны модели, интервалы зенитных углов и диапазоны восстановленных энергий нейтрино

	Н3а, КМ (ZS, КМ)	Н3а, QGSJET-II-03 (ZS, QGSJET-II-03)	Н3а, SIBYLL-2.1 (ZS, SIBYLL-2.1)
IceCube-40 [3] $10^2 < E_\nu < 10^6$ ГэВ, $97^\circ < \theta < 180^\circ$	0.78/12 = 0.06	0.64/12 = 0.05	14.94/12 = 1.24
IceCube-59 [5] $10^2 < E_\nu < 10^6$ ГэВ, $90^\circ < \theta < 120^\circ$	10.96/9 = 1.22 (12.66/9 = 1.41)	4.60/9 = 0.51 (4.79/9 = 0.53)	35.05/9 = 3.89 (36.15/9 = 4.02)
IceCube-59 [5] $10^2 < E_\nu < 10^6$ ГэВ, $120^\circ < \theta < 180^\circ$	0.97/8 = 0.12 (1.22/8 = 0.15)	0.41/8 = 0.05 (0.52/8 = 0.07)	10.63/8 = 1.33 (11.49/8 = 1.44)
IceCube-59 [5] $10^2 < E_\nu < 10^6$ ГэВ, $90^\circ < \theta < 180^\circ$	11.93/17 = 0.70 (13.88/17 = 0.82)	5.01/17 = 0.30 (5.31/17 = 0.31)	45.68/17 = 2.69 (47.64/17 = 2.80)
IceCube-59 [5] $10^2 < E_\nu < 10^6$ ГэВ, $90^\circ < \theta < 180^\circ$	4.79/10 = 0.48	3.58/10 = 0.36	17.98/10 = 1.80
Совместный анализ данных IceCube	13.08/29 = 0.45 (13.88/17 = 0.82)	5.57/29 = 0.19 (5.31/17 = 0.31)	60.62/29 = 2.09 (47.64/17 = 2.80)
ANTARES [8] $10^2 < E_\nu < 10^6$ ГэВ, $90^\circ < \theta < 180^\circ$	4.46/10 = 0.45	7.17/10 = 0.72	1.58/10 = 0.16
AMANDA-II [2] $10^3 < E_\nu < 10^6$ ГэВ, $100^\circ < \theta < 180^\circ$	21.4/9 = 2.38	31.4/9 = 3.49	6.52/9 = 0.72
Frejus [1] $0.25 < E_\nu < 10^3$ ГэВ	2.28/4 = 0.57	0.23/2 = 0.11	6.78/2 = 3.39
SK-I – SK-IV [9] $0.25 < E_\nu < 10^4$ ГэВ	3.65/4 = 0.91	4.01/2 = 2.01	1.38/2 = 0.6
Совместный анализ всех данных	35.08/56 = 0.63	37.39/52 = 0.72	74.47/52 = 1.43

является модель Кимеля–Мохова. Совместный анализ данных IceCube-79 и IceCube-86 по спектрам ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) дает наименьшее значение χ^2 для модели SIBYLL 2.1. Параметризации спектра КЛ Зацепина–Сокольской и Хилласа–Гайссера приводят к близким значениям χ^2 .

Выполненный анализ показал, что расчет потоков атмосферных нейтрино в рамках одной вычислительной схемы [14–22] является достаточно надежным для использования этих результатов в моделировании событий в детекторах нейтрин-

ных телескопов и восстановлении спектра атмосферных нейтрино.

В дальнейшем предполагается уточнить анализ с учетом возможного вклада нейтрино от распадов очарованных частиц. Экспериментально этот вклад до сих пор не обнаружен [7, 33, 34], хотя обработка данных IceCube-79 [33] позволила восстановить суммарный спектр мюонных нейтрино (включающий и вклад диффузного потока астрофизических нейтрино) в интервале энергий 125 ГэВ–3.2 ПэВ. Здесь “фоном” для “прямых”

Таблица 2. Значения χ^2/ndf , полученные для расчетных спектров ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) и данных экспериментов IceCube-79 [4], IceCube-86 [6] и Super-Kamiokande [9]

	Н3а, КМ (ZS, КМ)	Н3а, QGSJET-II-03 (ZS, QGSJET-II-03)	Н3а, SIBYLL-2.1 (ZS, SIBYLL-2.1)
IceCube-79 [4] $10 < E_\nu < 10^5$ ГэВ, $97^\circ < \theta < 180^\circ$	2.21/4 = 0.55 (2.30/4 = 0.58)	0.97/3 = 0.32 (1.05/3 = 0.35)	0.65/3 = 0.22 (0.82/3 = 0.27)
IceCube-86 [6] $10^2 < E_\nu < 10^5$ ГэВ, $97^\circ < \theta < 180^\circ$	5.55/4 = 1/39 (5.73/4 = 1.43)	4.89/4 = 1.22 (5.10/4 = 1.27)	10.7/4 = 2.66 (11.4/4 = 2.85)
Совместный анализ данных IceCube	9.34/8 = 1.17 (9.27/8 = 1.16)	6.37/7 = 0.91 (6.63/7 = 0.95)	6.25/7 = 0.89 (6.77/7 = 0.97)
SK-I – SK-IV [9] $0.25 < E_\nu < 10^4$ ГэВ	8.44/2 = 4.22 (7.21/2 = 3.61)	–	–
Совместный анализ данных	17.78/10 = 1.78 (16.48/10 = 1.65)	6.37/7 = 0.91 (6.63/7 = 0.95)	6.25/7 = 0.89 (6.77/7 = 0.97)

атмосферных нейтрино уже является поток астрофизических нейтрино.

Авторы благодарят Д.В. Наумова за консультации и полезные дискуссии. Исследование поддержано Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука”, грант № 075-15-2020-778 и проекта FZZE-2020-0017. Работа А.А. Кочанова выполнена в рамках проекта П.16 в ИСЗФ СО РАН. Работа А.Д. Морозовой выполнена при финансовой поддержке гранта Иркутского государственного университета для молодых ученых № 091-20-306.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daum K, Rhode W, Bareyre P et al.* // Z. Phys. C. 1995. V. 66. P. 417.
2. *Abbasi R, Abdou Y, Abu-Zayyad T et al.* // Astropart. Phys. 2010. V. 34. P. 48.
3. *Abbasi R, Abdou Y, Abu-Zayyad T et al.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. Art. No. 01200.
4. *Aartsen M.G., Abbasi R., Abdou Y. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. Art. No. 151105.
5. *Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. P. 116.
6. *Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al.* // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. Art. No. 122004.
7. *Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2017. V. 77. P. 692.
8. *Adrian-Martine S., Albert A., Al Samarai I. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. P. 2606.
9. *Richard E., Okumura K., Abe K. et al.* // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. Art. No. 052001.
10. *Barr G., Gaisser T., Lipari P. et al.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 70. Art. No. 023006.
11. *Honda M., Kajita T., Kasahara K. et al.* // Phys. Rev. D. 2007. V. 75. Art. No. 043006.
12. *Honda M., Kajita T., Kasahara K., Midorikawa S.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. Art. No. 123001.
13. *Aartsen M.G., Abbasi R., Ackermann M. et al.* // Phys. Rev. D. 2014. V. 89. Art. No. 062007.
14. *Sinegovskaya T.S., Morozova A.D., Sinegovsky S.I.* // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. Art. No. 063011.
15. *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., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I.* // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 4. P. 516.
16. *Кочанов А.А., Морозова А.Д., Синеговская Т.С., Синеговский С.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1030; *Kochanov A.A., Morozova A.D., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 933.
17. *Морозова А.Д., Кочанов А.А., Синеговская Т.С., Синеговский С.И.* // ЯФ. 2019. Т. 82. С. 411; *Morozova A.D., Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I.* // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. P. 491.
18. *Morozova A.D., Kochanov A.A., Sinegovsky S.I., Sinegovskaya T.S.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. Art. No. 012101.
19. *Morozova A.D., Kochanov A.A., Sinegovsky S.I., Sinegovskaya T.S.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 934. Art. No. 012008.
20. *Наумов В.А., Синеговская Т.С.* // ЯФ. 2000. Т. 63. С. 2020; *Naumov V.A., Sinegovskaya T.S.* // Phys. Atom. Nucl. 2000. V. 63. P. 1927.
21. *Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I.* // Astropart. Phys. 2008. V. 30. P. 219.
22. *Кочанов А.А., Синеговская Т.С., Синеговский С.И.* // ЖЭТФ. 2013. V. 143. С. 459; *Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I.* // JETP. 2013. V. 116. P. 395.
23. *Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I.* // Nucl. Phys. B. 1997. V. 52. P. 17.

24. *Ostapchenko S.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2006. V. 151. P. 143.
25. *Ostapchenko S.* // Nucl. Phys. B. 2008. V. 175–176. P. 73.
26. *Ahn E.-J., Engel R., Gaisser T.K. et al.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. Art. No. 094003.
27. *Кимель Л.Р., Мохов Н.В.* // Изв. вузов. Физ. 1974. № 10. С. 17.
28. *Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П.* Прхождение частиц высоких энергий через вещество. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
29. *Zatsepin V.I., Sokolskaya N.V.* // Astron. Astrophys. 2006. V. 458. P. 1.
30. *Gaisser T.K.* // Astropart. Phys. 2012. V. 35. P. 801.
31. *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.
32. *Панов А.Д., Адамс Дж.Х., Ан Х.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. С. 602; *Panov A.D., Adams J.H., Ahn H.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. P. 564.
33. *Aartsen M.G., Abraham K., Ackermann M. et al.* // Astrophys. J. 2016. V. 833. P. 3.
34. *Sinegovsky S.I., Sorokovikov M.N.* // Eur. Phys. J. C. 2020. V. 80. Art. No. 34.

Atmospheric neutrinos spectra: statistical analysis of comparison of calculations with experiment

A. A. Kochanov^{a, b, *}, K. S. Kuzmin^{c, d}, A. D. Morozova^{b, c}, T. S. Sinegovskaya^e, S. I. Sinegovsky^{b, c}

^a*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

^b*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

^c*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia*

^d*Institute for Theoretical and Experimental Physics named after A.I. Alikhanov of SRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

^e*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

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

We present a comparative statistical analysis of the high-energy atmospheric neutrinos spectra calculations with the data of Frejus, AMANDA-II, IceCube ANTARES, and Super-Kamiokande experiments. The calculations are performed within the framework of certain computational scheme using hadronic models QGSJET-II, SIBYLL 2.1 and the model by Kimel & Mikhov in combination with well-known parameterizations of the primary cosmic rays spectrum by Zatsepin & Sokolskaya, and Hillas & Gaisser. The models themselves are widely used in EAS modeling and extensively tested. We apply the χ^2 criterion to quantify the comparison results of the calculated energy spectra with the data. The analysis makes possible to estimate the statistical significance of various combinations of hadronic models and the cosmic rays spectrum in the context of their consistency with measurements of the high-energy atmospheric neutrino spectra.