

# РЕЗУЛЬТАТЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ТЯНЬ-ШАНСКОЙ УСТАНОВКИ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ СПЕКТРУ ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЭНЕРГИЯХ $2 \times 10^{13} - 3 \times 10^{17}$ эВ

© 2020 г. Е. Н. Гудкова<sup>1)\*</sup>, Н. М. Нестерова<sup>1)\*\*</sup>

Поступила в редакцию 20.11.2019 г.; после доработки 27.12.2019 г.; принята к публикации 27.12.2019 г.

Энергетический спектр первичного космического излучения при энергиях  $2 \times 10^{13} - 3 \times 10^{17}$  эВ представлен по данным Тянь-Шанской установки на основании регистрации числа электронов в широких атмосферных ливнях. При энергиях  $5 \times 10^{15} - 3 \times 10^{17}$  эВ спектр получен на установке АДРОН и расширен на область низких энергий от  $2 \times 10^{13}$  эВ по результатам отдельного эксперимента. Детально проанализированы и описаны изменения наклона в области энергий  $10^{16} - 3 \times 10^{17}$  эВ и особенность спектра около  $10^{17}$  эВ. Спектр сравнивается с результатами ряда других установок.

DOI: 10.31857/S0044002720030101

## ВВЕДЕНИЕ

По экспериментальным данным Тянь-Шанской ( $690 \text{ г см}^{-2}$ ) установки [1–4] был получен энергетический спектр первичного космического излучения (ПКИ) в широком диапазоне первичной энергии  $E_0 = 2 \times 10^{13} - 3 \times 10^{17}$  эВ, основанный на спектре широких атмосферных ливней (ШАЛ) по числу электронов  $N_e$ . Величина  $N_e$  определялась по показаниям системы сцинтилляционных детекторов с учетом их калибровки по газоразрядным счетчикам. В диапазоне энергий  $E_0 = 2 \times 10^{13} - 10^{15}$  эВ спектр был получен в отдельном эксперименте, предназначенном специально для регистрации ШАЛ низких энергий [5, 6].

## ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании спектра ШАЛ по числу электронов  $N_e$  был рассчитан энергетический спектр ПКИ. Переход от  $N_e$  к первичной энергии  $E_0$  осуществлялся методом розыгрыша “искусственных” ШАЛ по модели  $MQ1$  А.М. Дунаевского [7].

Так же, как в публикации [8] (2017 г.), но в отличие от [4] (1995 г.), для данных установки АДРОН спектр по  $E_0$  был пересчитан от спектра ливней по числу электронов  $N_e$  с использованием

нового, уточненного алгоритма определения параметра функции пространственного распределения электронов  $S$  (“возраст” ШАЛ).

В обработку отбирались ливни в пределах зенитного угла  $\theta < 30^\circ$ . На основании моделирования регистрации и отбора ШАЛ установкой для ливней разной энергии определено расстояние  $R$  от центра, где эффективность регистрации ливня равна 100% (для событий с  $E_0 = 2 \times 10^{13} - 10^{15}$  эВ — радиус  $R < 10$  м, для  $E_0 = 3 \times 10^{15} - 10^{16}$  эВ — радиус  $R < 20$  м и для  $E_0 = 10^{16} - 3 \times 10^{17}$  эВ — радиус  $R < 55$  м).

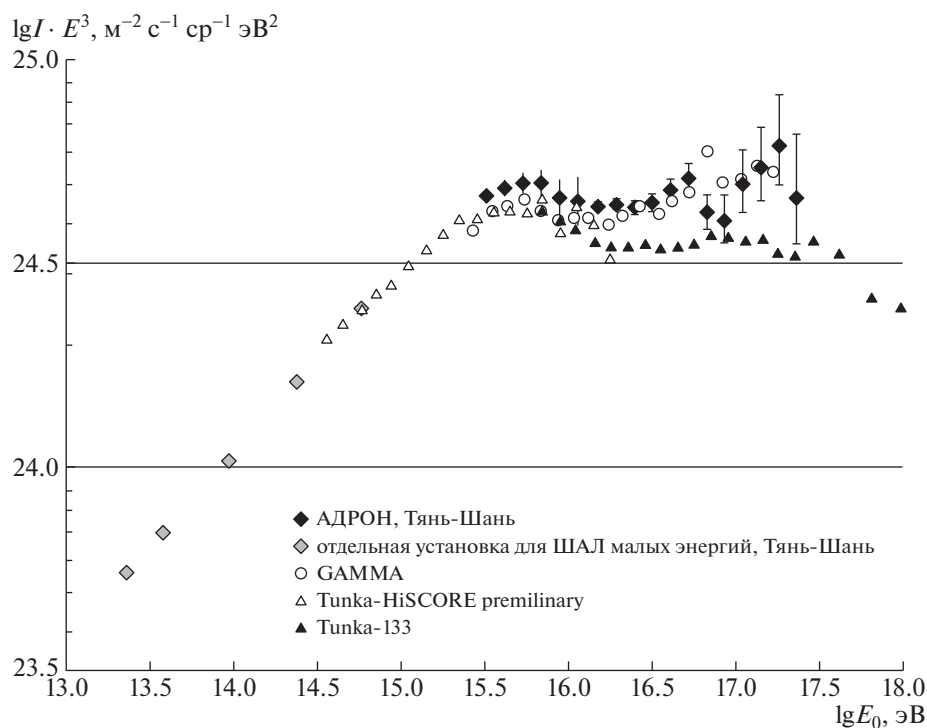
В отличие от [3, 4] в настоящей работе анализ данных АДРОН был проведен по последнему периоду эксплуатации установки с наиболее надежной регистрацией ливней. Кроме того, исключен ряд излишних для данного анализа критериев отбраковки кадров в исходном банке данных ШАЛ. В частности, это привело к некоторому увеличению интенсивности ПКИ при  $E_0 > 5 \times 10^{15}$  эВ по сравнению с [8].

Относительно химического состава ПКИ: наши измерения на установке АДРОН [8] показали изменение доли разных ядер в диапазоне  $E_0 = 10^{15} - 3 \times 10^{17}$  эВ с ростом энергии. Наблюдается существенное увеличение роли “тяжелых” ядер в ПКИ при росте  $E_0$  от  $5 \times 10^{15}$  эВ к  $E_0 \sim 10^{17}$  эВ: доля ШАЛ с пологой функцией пространственного распределения электронов (с большим значением “возраста”  $S$ ) растет на несколько порядков. На увеличение этой доли указывают и результаты

<sup>1)</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия.

\*E-mail: gudkovaen@lebedev.ru

\*\*E-mail: nesterovanm@lebedev.ru



**Рис. 1.** Дифференциальный энергетический спектр первичного космического излучения  $I \cdot E_0^3$  по данным различных установок. Точки:  $\blacklozenge$  — АДРОН (Тянь-Шань),  $\diamond$  — отдельная установка для ШАЛ малых энергий (Тянь-Шань),  $\circ$  — ГАММА (Арагац),  $\triangle$  — Tunka-HiSCORE Preliminary (Прибайкалье),  $\blacktriangle$  — Tunka-133 (Прибайкалье).

других экспериментов. При  $E_0 = 10^{16} - 3 \times 10^{17}$  эВ одновременно наблюдается некоторое увеличение количества ШАЛ с малыми  $S$ , образуемых “легкими” ядрами [8].

Надо отметить, что для уровня гор соотношение между  $N_e$  и  $E_0$  слабее зависит от ядерного состава ПККИ, чем для высот вблизи уровня моря.

#### СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ДАННЫМИ ДРУГИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 для сравнения со спектром АДРОН представлены спектры, полученные на установках ГАММА [9] в диапазоне энергий  $E_0 = 10^{15} - 3 \times 10^{17}$  эВ, и Tunka [10, 11] при  $E_0 = 3 \times 10^{14} - 10^{18}$  эВ. На рис. 2, кроме того, показаны спектры установок HiRes [12], Ice-TOР [13], TALE [14] и Yakutsk [15] в разных диапазонах от  $10^{15}$  до  $10^{18}$  эВ. На рис. 3 приведено сравнение нашего спектра с четырьмя вариантами спектра, полученного KASCADE-Grande Collaboration [16] при использовании моделей SIBYLL, EPOS и EPOS-LHC, где видна существенная зависимость результата от примененной модели.

В спектре АДРОН первое изменение показателя происходит в области известного “колена” при  $E_0 \sim 3 \times 10^{15}$  эВ. Далее, в области энергий свыше

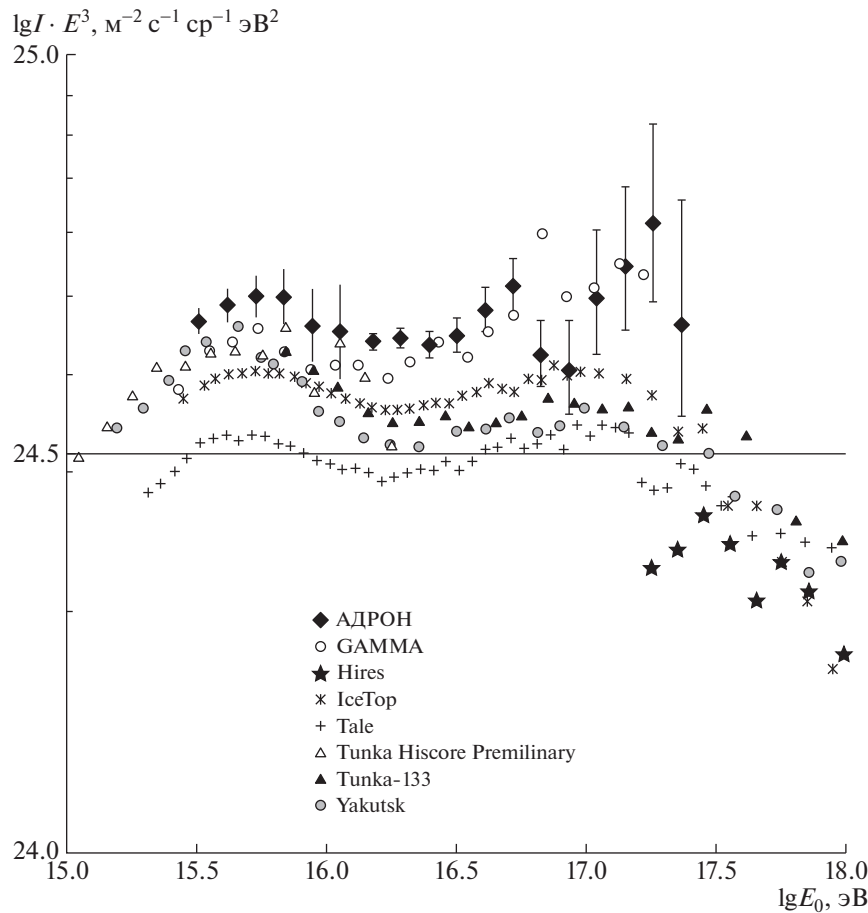
$2 \times 10^{16}$  эВ (на рис. 1–3 — в единицах  $I \cdot E_0^3$ , где  $I$  — интенсивность ПККИ) спектр становится более пологим. Затем при  $E_0 = (5-8) \times 10^{16}$  эВ зарегистрирован некоторый подъем со следующим спуском. В районе  $E_0 \sim 10^{17}$  эВ наблюдается скачок спектра. Этот скачок сохраняется при разных выборках данных: при варьируемых объеме выборки, ширине шага, границах анализируемых интервалов и проч., что усиливает его статистическую достоверность.

Кроме АДРОНа похожие изменения спектра в диапазоне  $E_0 = 10^{15} - 5 \times 10^{17}$  эВ наблюдаются и на большинстве других установок: при  $E_0 \sim 3 \times 10^{15}$  эВ — “колени”, затем, при  $E_0 \sim 2 \times 10^{16}$  эВ, начинается более пологая область, а в районе от  $6 \times 10^{16}$  до  $10^{17}$  эВ происходит подъем разной величины с последующим падением.

Надо отметить, что на установке ГАММА, которая расположена примерно на той же высоте над уровнем моря, что и Тянь-Шанская, зарегистрирован скачок спектра при  $E_0 \sim 10^{17}$  эВ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дифференциальный энергетический спектр первичного космического излучения получен на



**Рис. 2.** Дифференциальный энергетический спектр первичного космического излучения  $I \cdot E_0^3$  по данным различных установок. Точки:  $\blacklozenge$  — АДРОН (Тянь-Шань),  $\circ$  — ГАММА,  $\star$  — Hires,  $\ast$  — Ice-TOP,  $+$  — TALE,  $\triangle$  — Tunka-HiSCORE Preliminary,  $\blacktriangle$  — Tunka-133,  $\bullet$  — Yakutsk.

Тянь-Шане в широком диапазоне энергий  $E_0 = 2 \times 10^{13} - 3 \times 10^{17}$  эВ. Спектр показан в сравнении со спектрами ряда других установок: для  $E_0$  от  $2 \times 10^{13}$  эВ (рис. 1) и  $E_0$  от  $10^{15}$  эВ (рис. 2, 3). В исследуемом диапазоне наклон спектра претерпевает несколько изменений, описанных в разделе “Сравнение результатов с данными других экспериментов”. В областях  $E_0 = (5-8) \times 10^{16}$  эВ и  $E_0 \sim 10^{17}$  эВ наблюдаются скачки спектра.

Подобное поведение спектра регистрируется также на других установках и описано в целом ряде публикаций. В разных экспериментах начало и величина подъема спектра при  $E_0 \sim 10^{17}$  эВ различны, что может объясняться использованием разных моделей пересчета измеряемой величины ШАЛ к  $E_0$  и способов анализа данных. Так, протестированные KASCADE-Grande Collaboration модели: SIBYLL, EPOS, EPOS-LHC, QGSJETII-04, QGSJETII-02 [16] показали отличие интенсивности до 2 раз. На рис. 3 дано сравнение четырех из этих спектров с нашими данными.

Данные Тянь-Шанской установки [17] о росте неупругого сечения взаимодействия протонов в воздухе до 10 ПэВ ПККИ, полученные по энергетическому спектру адронов с энергией свыше 1 ТэВ, соответствуют модели QGSJETII-04. В дальнейшем можно пересчитать энергетический спектр ПККИ от числа  $N_e$  по этой модели.

В области, близкой к  $E_0 \sim 10^{17}$  эВ, необходимо предположить изменение доли разных ядер в химическом составе [8] (особенно увеличение доли “тяжелых” ядер) по сравнению с более низкими энергиями.

Поскольку, кроме АДРОНа, изменения наклона спектра в диапазоне  $E_0 = 3 \times 10^{15} - 10^{18}$  эВ наблюдаются на многих установках: GAMMA, HiRes II, Ice-TOP, KASCADE-Grande, TALE, TIBET, Yakutsk и др., то эти изменения могут быть следствием влияния новых физических процессов в ПККИ и нуждаются в детальном изучении и истолковании. Для их объяснения предложен ряд гипотез в работах [9, 16, 18, 19] и др.

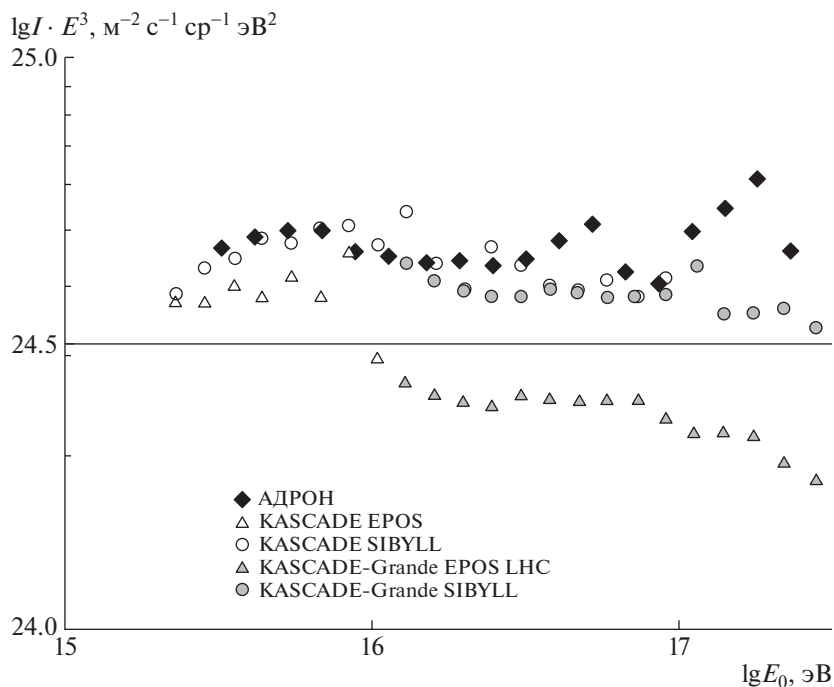


Рис. 3. Дифференциальный энергетический спектр первичного космического излучения  $I \cdot E_0^3$  по данным различных установок. Точки:  $\blacklozenge$  — АДРОН (Тянь-Шань),  $\triangle$  — KASCADE EPOS,  $\circ$  — KASCADE SIBYLL,  $\blacktriangle$  — KASCADE-Grande EPOS LHC,  $\bullet$  — KASCADE-Grande SIBYLL.

Авторы благодарят большой коллектив сотрудников [1–4], а также всех, принимавших участие в создании Тянь-Шанской установки и проведении измерений, получении банка данных, разработке алгоритмов обработки и анализе результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. S. Adamov, V. V. Arabkin, K. V. Barkalov, N. G. Vildanov, A. G. Dubovy, A. D. Erlykin, B. B. Kadyrsisov, S. K. Machavariani, R. A. Nam, N. M. Nesterova, S. I. Nikolsky, V. P. Pavluchenko, V. P. Stavrev, K. V. Cherdyntseva, A. P. Chubenko, and S. B. Shaulov, in *Proceedings of the 20th International Cosmic Ray Conference, Moscow, USSR, 1987*, HE. 6, p. 144.
2. Д. С. Адамов, В. В. Арабкин, Н. Г. Вильданов, Л. И. Вильданова, П. А. Дятлов, Н. С. Коновалова, С. К. Мачавариани, Н. М. Нестерова, С. И. Никольский, В. В. Пискаль, С. А. Полищук, К. В. Чердынцева, А. П. Чубенко, А. Л. Щепетов, С. Б. Шаулов, Изв. АН СССР. Сер. физ. **55**, 703 (1991).
3. Л. И. Вильданова, Н. М. Нестерова, А. П. Чубенко, ЯФ **57**, 2231 (1994) [*Phys. At. Nucl.* **57**, 2145 (1994)].
4. N. M. Nesterova, A. P. Chubenko, P. A. Djatlov, and L. I. Vildanova, in *Proceedings of the 24th International Cosmic Ray Conference, Roma, Italy, 1995*, Vol. 2, p. 748.
5. V. S. Aseikin, S. K. Machavariani, S. I. Nikolsky, and E. I. Turkish, in *Proceedings of the 18th International Cosmic Ray Conference, Bangalore, India, 1983*, Vol. 8, p. 71.
6. S. K. Machavariani, N. M. Nesterova, S. I. Nikolsky, V. A. Romakhin, and E. I. Turkish, in *Proceedings of the 17th International Cosmic Ray Conference, Paris, France, 1981*, Vol. 6, p. 193.
7. A. M. Dunaevsky *et al.*, AIP Conf. Proc. **276**, 136 (1995).
8. E. N. Gudkova, N. M. Nesterova, N. M. Nikolskaya, and V. P. Pavlyuchenko, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **81**, 457 (2017).
9. R. M. Martirosov, A. P. Garyaka, H. S. Vardanyan, A. D. Erlykin, N. M. Nikolskaya, Y. A. Gallant, L. W. Jones, H. A. Babayan, *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **409**, 12081 (2012), arXiv: 1201.0235.
10. V. V. Prosin, S. F. Berezhnev, N. M. Budnev, M. Brückner, A. Chiavassa, O. A. Chvalaev, A. V. Dyachok, S. N. Epimakhov, A. V. Gafarov, O. A. Gress, T. I. Gress, D. Horns, N. N. Kalmykov, N. I. Karpov, S. N. Kiryuhin, E. N. Konstantinov, *et al.*, EPJ Web Conf. **99**, 04002 (2015).
11. V. V. Prosin, S. F. Berezhnev, N. M. Budnev, A. Chiavassa, O. A. Chvalaev, A. V. Dyachok, S. N. Epimakhov, O. A. Gress, T. I. Gress, N. N. Kalmykov, N. I. Karpov, E. N. Konstantinov, A. V. Korobchenko, E. E. Korosteleva, L. A. Kuzmichev, *et al.*, EPJ Web Conf. **121**, 03004 (2016).

12. P. Sokolsky and G. B. Thomson, *J. Phys. G* **34**, R401 (2007), arXiv: 0706.1248 [astro-ph].
13. Ice Cube–Gen2 Collab., *PoS (ICRC2015)* 694.
14. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, A. Di Matteo, T. Fujii, K. Fujita, *et al.*, arXiv: 1803.01288v1 [astro-ph.HE].
15. S. Knurenko, I. Petrov, Z. Petrov, and I. Sleptsov, *PoS (ICRC2015)* 252.
16. M. Bertaina, W. D. Apel, J. C. Arteaga-Velázquez, K. Bekk, J. Blümer, H. Bozdog, I. M. Brancus, E. Cantoni, A. Chiavassa, F. Cossavella, K. Daumiller, V. de Souza, F. Di Piero, P. Doll, R. Engel, D. Fuhrmann, *et al.*, *PoS (ICRC2015)* 359.
17. N. M. Nesterova, *EPJ Web Conf.* **145**, 19001 (2017).
18. A. D. Erlykin and A. W. Wolfendale, *J. Phys. G* **23**, 979 (1997).
19. S. B. Shaulov and S. P. Bezshapov, *EPJ Web Conf.* **52**, 04010 (2013).

## RESULTS OF THE FURTHER ANALYSIS OF TIEN-SHAN ARRAY DATA ON THE ENERGY SPECTRUM OF PRIMARY COSMIC RAYS AT $2 \times 10^{13} - 3 \times 10^{17}$ eV

E. N. Gudkova<sup>1)</sup>, N. M. Nesterova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The primary cosmic ray energy spectrum at  $2 \times 10^{13} - 3 \times 10^{17}$  eV is presented by Tien-Shan array data based on the registration of the number of electrons of extensive air showers. At  $5 \times 10^{15} - 3 \times 10^{17}$  eV the spectrum was obtained by means of the HADRON array and was extended to the low energies from  $2 \times 10^{13}$  eV by data of the separate experiment. This spectrum was analyzed in detail at  $10^{16} - 3 \times 10^{17}$  eV range and some features of the spectrum slope above  $10^{17}$  eV were observed. The spectrum is compared with results of some other arrays.