

Установка Tunka-Grande: статус 2023 года и последние результаты

© А.Л. Иванова,^{1,2} И.И. Астапов,³ П.А. Безьязыков,² Е.А. Бонвеч,⁴ А.Н. Бородин,⁵ Н.М. Буднев,² А.В. Булан,⁴ А. Vaidyanathan,¹ Н.В. Волков,⁶ П.А. Волчугов,⁴ Д.М. Воронин,⁷ А.Р. Гафаров,² А.Ю. Гармаш,^{1,8} В.М. Гребенюк,^{5,9} О.А. Гресь,² Т.И. Гресь,² Е.О. Гресь,² А.А. Гринюк,⁵ О.Г. Гришин,² А.Н. Дячок,² Д.П. Журов,^{2,10} А.В. Загородников,² А.Д. Иванова,^{2,11} М.А. Илюшин,² Н.Н. Калмыков,⁴ В.В. Киндин,³ С.Н. Кирюхин,² В.А. Кожин,⁴ Р.П. Кокоулин,³ Н.И. Колосов,² К.Г. Компаниец,³ Е.Е. Коростелева,⁴ Е.А. Кравченко,^{1,8} А.П. Крюков,⁴ Л.А. Кузьмичев,⁴ А. Chiavassa,¹² М.В. Лаврова,⁵ А.А. Лагутин,⁶ Ю.Е. Лемешев,² Б.К. Лубсандоржиев,⁷ Н.Б. Лубсандоржиев,⁴ С.Д. Малахов,² Р.Р. Миргазов,² Р.Д. Монхоев,² Э.А. Окунева,⁴ Э.А. Осипова,⁴ А. Пан,⁵ А.Д. Панов,⁴ Л.В. Паньков,² А.Л. Пахоруков,² А.А. Петрухин,³ Д.А. Подгрудков,⁴ Е.Г. Попова,⁴ Е.Б. Постников,⁴ В.В. Просин,⁴ В.С. Птускин,¹³ А.А. Пушкин,² Р.И. Райкин,⁶ А.В. Разумов,⁴ Г.И. Рубцов,⁷ Е.В. Рябов,² И. Сатышев,⁵ В.С. Самолига,² Л.Г. Свешникова,⁴ А.Ю. Сидоренков,⁷ А.А. Силаев,⁴ А.А. Силаев (мл.),⁴ А.В. Скурихин,⁴ А.В. Соколов,^{1,8} В.А. Таболенко,² А.Б. Танаев,² М.Ю. Терновой,² Л.Г. Ткачев,^{5,9} Н.А. Ушаков,⁷ Д.В. Чернов,⁴ И.И. Яшин³

¹Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

²Иркутский государственный университет, Научно-исследовательский институт прикладной физики, 664003 Иркутск, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, 115409 Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, 119991 Москва, Россия

⁵Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

⁶Алтайский государственный университет, 656049 Барнаул, Россия

⁷Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия

⁸Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

⁹Университет „Дубна“, 141982 Дубна, Россия

¹⁰Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074 Иркутск, Россия

¹¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

¹²Dipartimento di Fisica Generale Universiteta di Torino and INFN, Турин, Италия

¹³Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 108840 Троицк, Московская обл., Россия
e-mail: annaiv.86@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 23 августа 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Показаны последние результаты за 2016–2022 гг. по исследованию энергетического спектра космических лучей на установке Tunka-Grande, представляющей собой сеть из 19 сцинтилляционных станций, входящих в состав экспериментального комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) в Восточной Сибири, недалеко от озера Байкал, и предназначенной для исследования энергетического спектра и массового состава космических лучей, а также поиска астрофизических гамма-квантов в диапазоне энергий 10–1000 PeV.

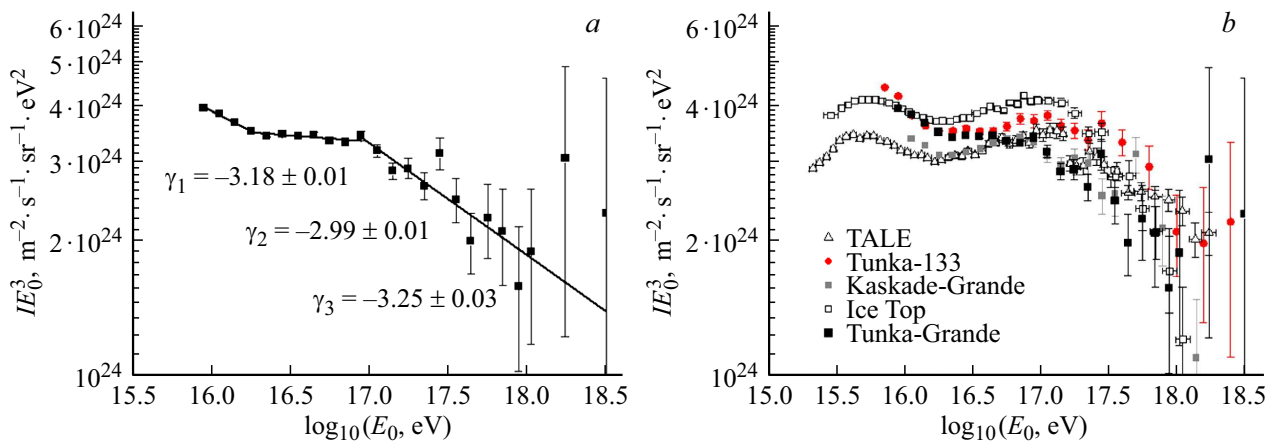
Ключевые слова: космические лучи, широкий атмосферный ливень, сцинтилляционная установка Tunka-Grande, экспериментальный комплекс TAIGA.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56825.f235-23

1. Сцинтилляционная установка Tunka-Grande

Сцинтилляционная установка Tunka-Grande входит в состав гамма-обсерватории TAIGA [1] и представляет собой сеть из распределенных на площади 0.5 km² 19

станций наблюдения. Каждая станция включает в себя наземный детектор заряженной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ) общей площадью ~ 8 m² и подземный мюонный детектор общей площадью ~ 5 m². Расстояние между соседними станциями составляет около 200 м.



a — дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным установки Tunka-Grande за 5 сезонов наблюдения; *b* — сравнение энергетических спектров, полученных на установках Tunka-Grande, TALE [7], Tунка-133, Cascade-Grande [8] и Ice Top [9].

Основными целями установки Tunka-Grande являются исследование космических лучей (КЛ) и поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне первичных энергий 10–1000 PeV. Подробное описание установки Tunka-Grande приводится в работах [2–4].

2. Набор и обработка данных 2016–2022 гг.

Штатные сеансы наблюдений на установке Tunka-Grande были начаты осенью 2016 г. Общее время работы установки в течение шести сезонов составило 13500 h. Из них ~11900 h установка Tunka-Grande вела независимый набор данных. Общее количество зарегистрированных событий составило около 5 700 000. Остальное время установка Tunka-Grande работала под триггером черенковской установки Tунка-133 [5]. За этот период установкой было зарегистрировано порядка 410 500 событий.

По данным первого сезона наблюдений 2016–2017 гг. был выполнен анализ совместных событий установки Tunka-Grande и черенковской установки Tунка-133. В качестве основных результатов анализа совместных событий следует указать получение экспериментальной зависимости между энергией первичной частицы и плотностью заряженных частиц на расстоянии 200 m от оси ШАЛ — параметром ρ_{200} [6], а также оценку качества восстановления параметров ШАЛ и КЛ по данным эксперимента Tunka-Grande [6].

Методика обработки экспериментальных данных установки Tunka-Grande описана в работах [2,6]. Напомним, что в ходе реконструкции в каждом событии ШАЛ восстанавливаются направление прихода и положение оси ливня, полное число заряженных частиц и мюонов в ШАЛ, параметр s , определяющий возраст ливня, а также параметр ρ_{200} . Энергия ливня E_0 определяется по параметру ρ_{200} с использованием формулы связи, полученной при анализе совместных событий „Tunka-

Grande — Tунка-133“ [2,6]:

$$E_0 = 10^b \cdot (\rho_{200}(0))^a, \quad (1)$$

где $\rho_{200}(0)$ — масштабированный к вертикальному направлению относительно измеренного зенитного угла θ параметр ρ_{200} [2], $a = 0.84$, $b = 15.99$.

Для независимой оценки качества восстановления параметров ШАЛ и КЛ установкой Tunka-Grande был выполнен поиск и анализ совместных событий установки Tunka-Grande и черенковской установкой TAIGA-NiSCORE [1]. Полученные значения практически совпали с результатами анализа совместных событий с черенковской установкой Tунка-133: для событий с энергией выше 10 PeV угловое разрешение Tunka-Grande — не хуже 2.0° , точность восстановления положения оси — 26 m, энергетическое разрешение — 36%, в том числе с точностью до 0.01 совпали значения коэффициентов в формуле связи первичной энергии и параметра ρ_{200} : $a = 0.83 \pm 0.01$, $b = 16.00 \pm 0.01$.

3. Энергетический спектр по данным 2017–2022 гг.

Для построения энергетического спектра по данным сцинтилляционной установки Tunka-Grande было отобрано около 1 226 500 событий с зенитным углом $\theta \leq 35^\circ$ и положением оси в круге радиусом 350 m. Из них ~312 200 событий имеют энергию более 10 PeV, ~2 500 событий — более 100 PeV.

Дифференциальный энергетический спектр, построенный по данным 5 сезонов наблюдений, представлен на рис. 1, *a*. Начальный участок спектра (8–20 PeV) может быть аппроксимирован степенным законом с показателем $\gamma = 3.18 \pm 0.01$. Первый излом наблюдается при энергии 20 PeV. В интервале энергий 20–100 PeV энергетический спектр подчиняется степенному закону с показателем степени $\gamma = 2.99 \pm 0.01$. При энергии

100 PeV наблюдается второй излом, после которого происходит укрупнение энергетического спектра до значения показателя $\gamma = 3.25 \pm 0.03$.

Сравнение энергетического спектра, восстановленного в эксперименте Tunka-Grande, с энергетическими спектрами, построенными по данным TALE [7], KASCADE-Grande [8], Ice Top [9] и Тунка-133, показало хорошее согласие с результатами установок, работающих в диапазоне энергий от 10^{15} до 10^{18} eV (см. рисунок *b*).

Заключение

В работе представлен энергетический спектр по данным установки Tunka-Grande, накопленным за 5 сезонов наблюдения. Энергетический спектр всех частиц подчиняется степенному закону с индексом 3.18 в диапазоне энергий 8–20 PeV, 2.99 в диапазоне энергий 20–100 PeV и 3.25 при энергии выше 100 PeV и демонстрирует хорошее соответствие с данными экспериментов TALE, KASCADE-Grande, Ice Top и Тунка-133.

Финансирование работы

Работа выполнена на базе УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“ (соглашение ЕВ-075-15-2021-675). Поддержана Российским научным фондом (гранты 23-72-00016 (раздел 3), 23-72-00054 (раздел 2)) и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2020-0024, FZZE-2023-0004, FSUS-2020-0039, FSUS-2022-0015).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonech, A. Borodin, A. Bulan, A. Chiavassa, D. Chernov, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, E. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A.D. Ivanova, A.L. Ivanova, N. Kalmykov, I. Yashin. Nucl. Instrum. Meth. A, **1039**, 167047 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047
- [2] A. Ivanova, M. Brueckner, V. Ptuskin, R. Monkhoev, I. Astapov, P. Bezyazeev, M. Blank, E.A. Bonvech, A. Borodin, M. Brückner, N.M. Budnev, A. Bulan, D.V. Chernov, A. Chiavassa, A.N. Dyachok, A.R. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, E. Gress, O. Gress, T.I. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, D. Horns, A. Igoshin, A. D. Ivanova, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V.A. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, A. Lukanov, D. Lukyantsev, S. Malakhov, R.R. Mirgazov, R. Mirzoyan, E. Osipova, A. Pakhorukov, L.A. Panasenko, L. Pankov, A. Panov, A. Petrukhin, I. Poddubnyi, D.A. Podgrudkov, V. Poleschuk, V. Ponomareva, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, G. Rubtsov, E.V. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, B. Sabirov, A. Silaev, A.S. (junior), A. Sidorenkov, A.V. Skurikhin, V. Slunicka, A. Sokolov, V. Sulakov, Y. Suvorkin, L. Sveshnikova, V.A. Tabolenko, B. Tarashchansky, L. Tkachev, M. Tluczykont, A. Tanaev, M. Ternovoy, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, A. Zhaglova, D. Zhurov, I. Yashin. PoS ICRC2021, **395**, 361 (2021). DOI: 10.22323/1.395.0361
- [3] R.D. Monkhoev, N.M. Budnev, D.M. Voronin, A.R. Gafarov, O.A. Gress, T.I. Gress, O.G. Grishin, A.N. Dyachok, S.N. Epimakhov, D.P. Zhurov, A.V. Zagorodnikov, V.L. Zurbanov, A.L. Ivanova, N.N. Kalmykov, Yu.A. Kazarina, S.N. Kiryuhin, E.E. Korosteleva, V.A. Kozhin, L. Kuzmichev, V.V. Lenok, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, R.R. Mirgazov, R.Mirzoyan, E.A. Osipova, A.L. Pakhorukov, M.I. Panasyuk, L.V. Pankov, V. A. Poleschuk, E.G. Popova, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, V.S. Samoliga, Y.A. Semenev, L.G. Sveshnikova, A.A. Silaev, A.A. Silaev Jr., A.V. Skurikhin, V.P. Sulakov, V.A. Tabolenko, O.L. Fedorov, Yu.A. Fomin, A. Chiavassa, C. Spiering. Bull. Russ. Acad. Sci., **81** (4), 468 (2017). DOI: 10.3103/S1062873817040311.
- [4] R. Monkhoev, I. Astapov, P. Bezyazeev, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, V. Chernykh, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, D. Horns, A. Igoshin, A. Ivanova, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, B. Sabirov, A. Silaev, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, V. Slunicka, A. Sokolov, Y. Suvorkin, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashchansky, L. Tkachev, M. Tluczykont, A. Tanaev, M. Ternovoy, N. Ushakov, K. Ustinov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. J. Phys. Conf. Ser., **1697** (1), 012026 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012026
- [5] N.M. Budnev, A. Chiavassa, O.A. Gress, T.I. Gress, A.N. Dyachok, N.I. Karpov, N.N. Kalmykov, E.E. Korosteleva, V.A. Kozhin, L.A. Kuzmichev, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, R.R. Mirgazov, E.A. Osipova, M.I. Panasyuk, L.V. Pankov, E.G. Popova, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, Yu.A. Semenev, A.A. Silaev, A.A. Silaev (junior), A.V. Skurikhin, C. Spiering, L.G. Sveshnikova, A.V. Zagorodnikov. Astropart. Phys., **117**, 102406 (2020). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2019.102406
- [6] A.L. Ivanova, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonvech, A. Borodin, N. Budnev, A. Bulan, D. Chernov, A. Chiavassa, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, E. Gress, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A.D. Ivanova, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, A. Lukanov, D. Lukyantsev, S. Malakhov,

- R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakhorukov, L. Pankov, A. Pan, A. Panov, A. Petrukhin, I. Poddubnyi, D. Podgrudkov, V. Poleschuk, V. Ponomareva, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, A. Satyshev, A. Silaev, A. Silaev (junior), A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, L. Tkachev, A. Tanaev, M. Ternovoy, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. ISVHECRI 2022, e-Print: 2207.09680 [astro-ph.IM], <https://arxiv.org/pdf/2207.09680.pdf>
- [7] 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, M. Fukushima, G. Furlich, T. Goto, W. Hanlon, M. Hayashi, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Honda, D. Ikeda, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, H. Ito, D. Ivanov, H.M. Jeong, S.M. Jeong, C.C.H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, K. Kawata, E. Kido, H.B. Kim, J.H. Kim, J.H. Kim, S. Kishigami, S. Kitamura, Y. Kitamura, V. Kuzmin, M. Kuznetsov, Y.J. Kwon, K.H. Lee, B. Lubsandorzhiiev, J.P. Lundquist, K. Machida, K. Martens, T. Matsuyama, J.N. Matthews, R. Mayta, M. Minamino, K. Mukai, I. Myers, K. Nagasawa, S. Nagataki, R. Nakamura, T. Nakamura, T. Nonaka, A. Nozato, H. Oda, S. Ogio, J. Ogura, M. Ohnishi, H. Ohoka, T. Okuda, Y. Omura, M. Ono, R. Onogi, A. Oshima, S. Ozawa, I.H. Park, M.S. Pshirkov, D.C. Rodriguez, G. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, R. Sahara, K. Saito, Y. Saito, N. Sakaki, N. Sakurai, L.M. Scott, T. Seki, K. Sekino, P.D. Shah, F. Shibata, T. Shibata, H. Shimodaira, B.K. Shin, H.S. Shin, J.D. Smith, P. Sokolsky, B.T. Stokes, S.R. Stratton, T.A. Stroman, T. Suzawa, Y. Takagi, Y. Takahashi, M. Takamura, M. Takeda, R. Takeishi, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, S.B. Thomas, G.B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Uchihori, S. Udo, F. Urban, T. Wong, M. Yamamoto, R. Yamane, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, K. Yashiro, Y. Yoneda, S. Yoshida, H. Yoshii, Y. Zhezher, Z. Zundell, Telescope Array Collaboration. *Astrophys. J.*, **865**, 74 (2018). DOI: 10.3847/1538-4357/aada05
- [8] W.D. Apel, J.C. Arteaga-Velazquez, K. Bekk, M. Bertaina, J. Bluemer, H. Bozdog, I.M. Brancus, P. Buchholz, E. Cantoni, A. Chiavassa, F. Cossavella, K. Daumiller, V. de Souza, F. Di Pierro, P. Doll, R. Engel, J. Engler, M. Finger, D. Fuhrmann, P.L. Ghia, H.J. Gils, R. Glasstetter, C. Grupen, A. Haungs, D. Heck, J.R. Hoerandel, D. Huber, T. Huege, K.H. Kampert, D. Kang, D. Kickelbick, H.O. Klages, K. Link, P. Luczak, M. Ludwig, H.J. Mathes, H.J. Mayer, M. Melissas, J. Milke, B. Mitrica, C. Morello, G. Navarra, J. Oehlschlaeger, S. Ostapchenko, S. Over, N. Palmieri, M. Petcu, T. Pierog, H. Rebel, M. Roth, H. Schieler, F.G. Schroeder, O. Sima, G. Toma, G.C. Trinchero, H. Ulrich, A. Weindl, J. Wochele, M. Wommer, J. Zabierowski. *Astropart. Phys.*, **36**, 183 (2012). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2012.05.023
- [9] K. Rawlins for the Ice Cube Collaboration. *J. Phys. Conf. Ser.*, **718** (5), 052033 (2016). DOI: 10.1088/1742-6596/718/5/052033