Современное состояние и перспективы проекта TAIGA для физики космических лучей, гамма-астрономии и астрофизики элементарных частиц

© Н. Буднев,[1] Л. Кузьмичев,[2] И. Астапов,[3] П. Безъязыков,[5] А. Блинов,[5] Е. Бонвеч,[2] А. Бородин,[5] А. Булан,[2] П. Бусыгин,[1] Н. Волков,[6] П. Волчугов,[1,2] Д. Воронин,[7] А. Гафаров,[1] А. Гармаш,[4,8] Г. Гоман,[2] В. Гребенюк,[5,9] О.А. Гресь,[1] Т.И. Гресь,[1] Е.О. Гресь,[1] А. Гринюк,[5] А. Дячок,[1] Д. Журов,[1] А. Загородников,[1] В. Зиракашвили,[11] А.Д. Иванова,[1] А.Л. Иванова,[1,4] М. Илюшин, Н. Калмыков,[2] В. Киндин,[3] С. Кирюхин,[1] В. Кожин,[2] К. Компаниец,[3] Е. Коростелева,[2] Е. Кравченко,[4,8] А. Крюков,[2] А. Chiavassa,[10] А. Лагутин,[6] Ю. Лемешев,[1] Б.К. Лубсандоржиев,[4,7] Н.Б. Лубсандоржиев,[1,2] С. Малахов,[1] Р. Миргазов,[1] Р. Монхоев,[1] Д. Нкундумукиза,[1] Э. Осипова,[2] А. Пан,[5] А. Панферова,[2] Л. Паньков,[1] А. Пахоруков,[1] А. Петрухин,[3] Д. Подгрудков,[2] И. Поддубный,[1] В. Полещук,[1] Е. Попова,[2] Е. Постников,[2] В. Просин,[1,2] А. Пушнин,[1] Р. Райкин,[6] А. Разумов,[2] Г. Рубцов,[7] Е. Рябов,[1] И. Сатышев,[5] В. Самолига,[1] Л. Свешникова,[2] А. Сидоренков,[7] А. Силаев,[2] А. Силаев (мл.),[2] А. Скурихин,[2] А. Соколов,[4,8] В. Таболенко,[1] М. Терновой,[1,2] Н. Ушаков,[7] А. Шайковский,[5] М. Шульга,[1] Д. Чернов,[2] С. Эрманн,[1] И. Яшин[3]

[1]Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, Россия
[2]Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
119991Москва, Россия
[3]Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
[4]Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
[5]Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская обл., Россия
[6]Алтайский государственный университет,
656049 Барнаул, Россия
[7]Институт ядерных исследований РАН,
117312 Москва, Россия
[8]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
[9]Университет „Дубна“,
141982 Дубна, Московская обл., Россия
[10]University of Torino,
10124 Torino, Italy
[11]Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
108840 Троицк, Московская обл., Россия
e-mail: nbudnev@api.isu.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 15 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Приведены новые результаты исследования энергетического спектра и массового состава космических лучей и потоков гамма-квантов, полученные с помощью гибридного комплекса TAIGA-1. Представлен статус работ по проектированию комплекса TAIGA-100 с гибридной системой детекторов на площади 100 km^2.

Ключевые слова: комплекс TAIGA, космические лучи, гамма-астрономия, энергетический спектр.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64047.307-26

Введение

Десятилетия исследований заряженных космических лучей не дали ответа на главный вопрос — какова природа их источников и механизмов ускорения до высоких и сверхвысоких энергий? Видимо, единственный способ получить ответ на этот вопрос — исследование потоков нейтральных частиц: гамма-квантов и нейтрино, поскольку заряженные частицы „забывают“ направление на источник из-за воздействия магнитных полей на их траектории. С помощью установок H.E.S.S [1], MAGIC [2] и VERITAS [3], удалось обнаружить более 200 источников с энергией выше 1 TeV. Прорыв в изучении астрофизических источников, в которых ча-

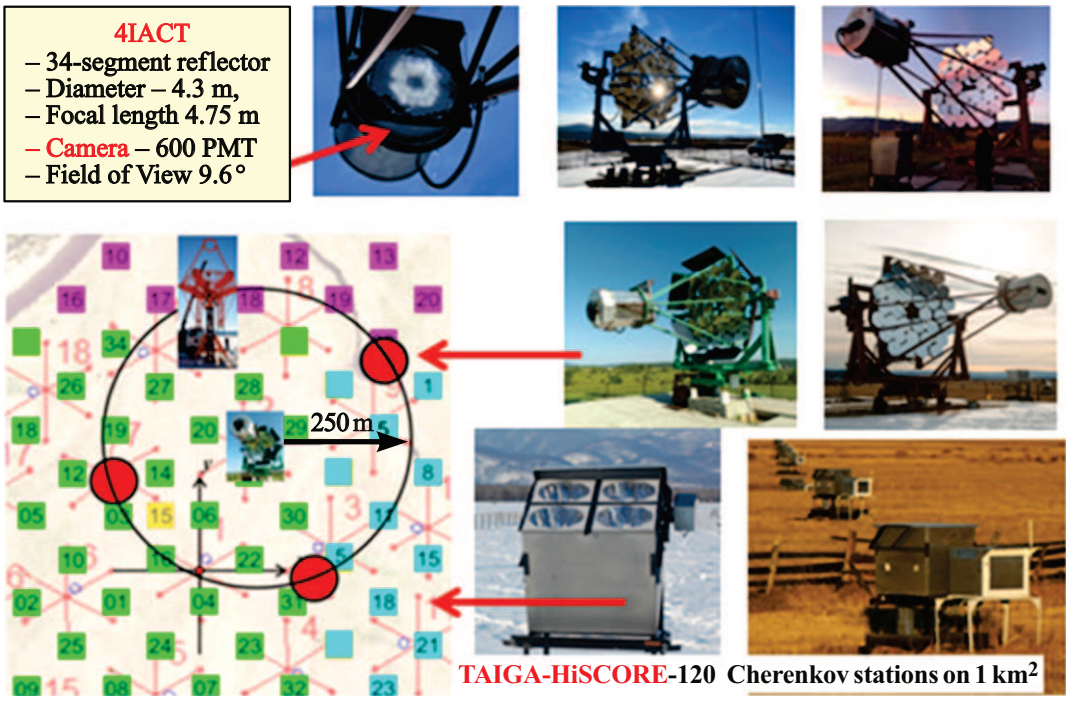


Рис. 1. Установки TAIGA-HiSCORE и TAIGA-IACT в составе комплекса TAIGA-1.

стицы ускоряются до энергий порядка и выше 1 PeV, произошел с началом работы высокогорных установок, регистрирующих заряженные частицы широких атмосферных ливней (ШАЛ): Tibet-ASgamma [4], HAWC [5] и LHAASO [6]. Первый каталог LHAASO [7] содержит сведения о 43 галактических источниках гамма-квантов с энергией выше 100 TeV, ее эффективная площадь $\sim 1\,\mathrm{km}^2$, а для исследования потоков гамма-квантов с энергиями выше 1 PeV нужны установки с площадью, измеряемой десятками квадратных километров.

В Тункинской долине в 50 km от озера Байкал продолжается развитие комплекса TAIGA-1 [8] с гибридной системой детекторов на площади $1\,\mathrm{km}^2$ (рис. 1). В проекте TAIGA энергия, направление и положение оси ШАЛ от первичных гамма-квантов с энергиями более 50 TeV определяются по данным широкоугольной черенковской установки TAIGA-HiSCORE, 120 оптических станций которой распределены на площади $1\,\mathrm{km}^2$, а выделение порожденных гамма-квантами ШАЛ из адронного фона осуществляется по характеристикам изображений ШАЛ в черенковском свете в камерах 4 атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) установки TAIGA-IACT. В настоящее время начаты работы по проектированию комплекса TAIGA-100 с гибридной системой детекторов на площади 100 km^2 [9,10], его создание предусматривается в проекте Перспективной Федеральной Программы по Физике Фундаментальных Свойств Материи.

1. Исследования потоков первичных космических лучей

Для восстановления энергии порождающих ШАЛ первичных космических лучей (ПКЛ) по данным установки TAIGA-HiSCORE [11] используется величина плотности потока черенковских фотонов на расстоянии 200 m от оси ШАЛ (параметр Q(200)) при энергиях выше 1 PeV и 100 m (параметр Q(100)) при более низких энергиях. Дифференциальный энергетический спектр всех частиц, умноженный на энергию в степени 2.7, построенный по данным за 902 h наблюдений в хорошую погоду в 2021–2025 гг., приведен на рис. 2, *a*. При энергии 3 PeV спектр становится круче, а выше 20 PeV показатель наклона уменьшается. В диапазоне энергий 3–20 PeV он равен (3.12 ± 0.01), а в диапазоне энергий 20–100 PeV составляет (2.97 ± 0.01).

Массовый состав ПКЛ оценивается по глубине максимума развития ливня Xmax, для определения которого по данным установки TAIGA-HiSCORE разработаны 2 метода [12]: (1) для энергий выше 1 PeV в P-методе используется параметр $P = \mathrm{Q}(80)/\mathrm{Q}(200)$ — отношение плотностей потока черенковского света на расстояниях 80 и 200 m от оси ШАЛ, (2) в τ-методе используется параметр $\tau\,(350)$ — длительность на полувысоте (FWHM) импульса черенковского света расстоянии 305 m оси ШАЛ. Связь измеряемых параметров и $X_{\max}$ получена в результате моделирования с использованием пакета CORSIKA с моделями адронных взаимодействий QGSJET-II-04 и Sibyll2.3. На рис. 2, *b* приведен средний логарифм массы ПКЛ $\langle \ln \mathrm{A} \rangle$, пересчитанный из данных о глубине максимума ШАЛ $X_{\max}$, полученных с помощью установки TAIGA-HiSCORE. Наши результаты хорошо согласуются с результатами эксперимента LHAASO, полученными по данным о заряженных частицах ШАЛ [13].

Новые возможности для измерения не только интегрального спектра, но и парциальных спектров ПКЛ для

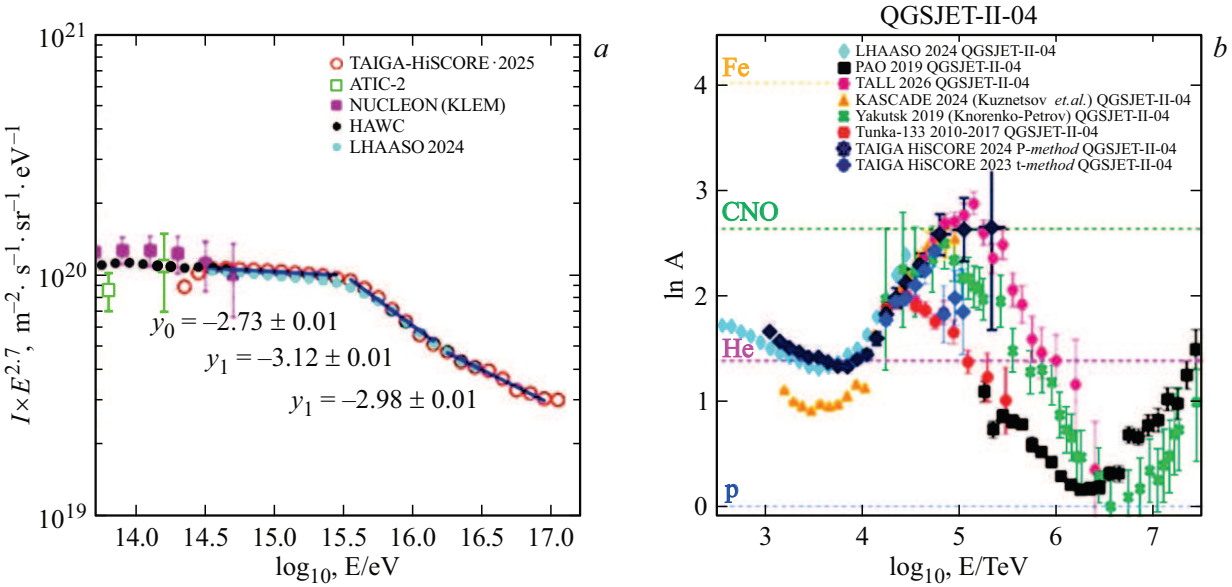


Рис. 2. *a* — дифференциальный энергетический спектр космических лучей, полученный в результате обработки экспериментальных данных установки TAIGA-HiSCORE в сезоны измерений 2021–2025 гг.; *b* — экспериментальная зависимость среднего логарифма массы ПКЛ ⟨ln A⟩ от энергии, породившей ШАЛ частицы.

различных групп ядер появились с началом работы АЧТ установки TAIGA-IACT. Для исследования ПКЛ, также как и для решения задач гамма-астрономии, возможны три подхода для анализа данных, которые имеют различные пороги по энергии и различные возможности по выделению отдельных групп ядер. (1) Автономный (моно) режим — параметры ШАЛ и доля различных групп ядер определяются по данным одного АЧТ, порог ~ 6 TeV. (2) Стереоскопический режим — по данным двух и более АЧТ, порог ~ 12 TeV. (3) Гибридный режим — совместный анализ данных установки TAIGA-HiSCORE и АЧТ, порог $\sim 100-200$ TeV. На рис. 3, *a* представлен спектр легкой компоненты ПКЛ (протоны и ядра гелия), полученный по данным гибридных событий [15]. В спектре наблюдается ярко выраженный излом в области „классического колена“ при энергии 3 PeV. Можно утверждать, что излом компонент ПКЛ происходит по жесткости частиц, и определяется именно легкой компонентой, как наиболее представленной в спектре до энергии излома.

2. Гамма-астрономия высоких энергий в проекте TAIGA-1

Важнейшей особенностью проекта TAIGA является возможность исследования потоков гамма-квантов высоких энергий не только традиционными методами с помощью АЧТ установки TAIGA-IACT, но и в рамках гибридного подхода по данным установок TAIGA-IACT и TAIGA-HiSCORE. В 2025 г. наблюдался ряд галактических ПэВатронов: Dragonfly Nebula, Boomerang, Крабовидная туманность и CTA-1. Источники Boomerang, Крабовидная туманность наблюдали при зенитных углах до 60°. Также наблюдалась двойная звездная система LSI+61 и для поиска темной материи карликовая галактика Ursa Major I. Наибольший объем данных получен при наблюдении Крабовидной туманности. В монорежиме сигнал от Крабовидной туманности выделен на уровне значимости 12σ, при этом энергетический спектр восстановлен в диапазоне 4–80 TeV. В стереорежиме по данным 2 и 3 АЧТ спектр восстановлен в энергетическом диапазоне 6–200 TeV [24] (рис. 3, *b*) Данные, приведенные на рис. 3, *b*, получены за 186 h наблюдения за период с 2020 по 2023 гг.

3. От TAIGA-1 к TAIGA-100 — установке для гамма-астрономии в области энергий выше 1 PeV

Проект комплекса TAIGA-100 [9,10] основан как на опыте, полученном при создании комплекса TAIGA-1, так и проекта LHAASO [25]. Основным типом детекторов комплекса TAIGA-100 будут так называемые суперстанции (СС) в составе: подземный водный черенковский детектор, широкоугольный детектор черенковского излучения ШАЛ, 2–3 сцинтилляционных детектора площадью 1 m^2 и детектор радиоизлучения ШАЛ. В состав комплекса также будут входить АЧТ, с диаметром зеркал 4 и 10 m, для проведения исследований в области энергий выше 1 TeV и флюоресцентные телескопы для проведения исследований в области физики космических лучей с энергиями выше 500 PeV и калибровки метода восстановления энергии по данным сцинтилляционных детекторов в области предельно высоких энергий.

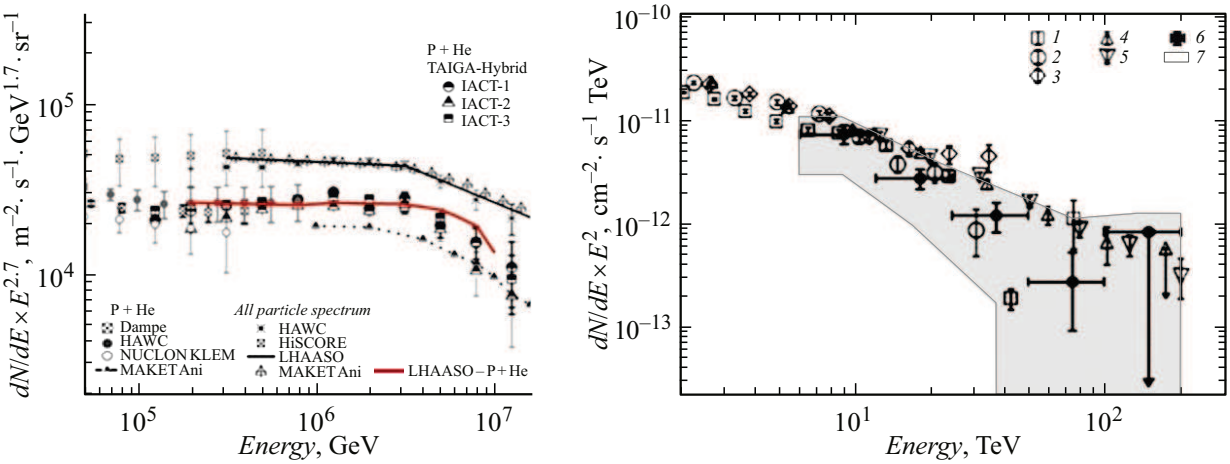


Рис. 3. *a* — спектры всех частиц, восстановленные по данным экспериментов: TAIGA-HiSCORE [11], LHAASO [13], HAWC [14]. Спектры легкой компоненты (протоны и гелий) по данным: TAIGA-HiSCORE + IACTs (числа — номера телескопов) [15], DAMPE [16], NUCLON-KLEM [17], LHAASO [18]; *b* — спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности на основе данных наземных гамма-обсерваторий. *1* — HEGRA 2004 [19], *2* — HESS 2006 [20], *3* — VERITAS [21], *4* — HAWC [22], *5* — LHAASO-KM2A [23], *6* — TAIGA-1 [24]. Последняя точка представляет собой верхний предел потока гамма-излучения с доверительным интервалом 2σ. Горизонтальная планка погрешности указывает ширину энергетического бина. *7* — доверительный интервал 3σ для потока гамма-излучения [24].

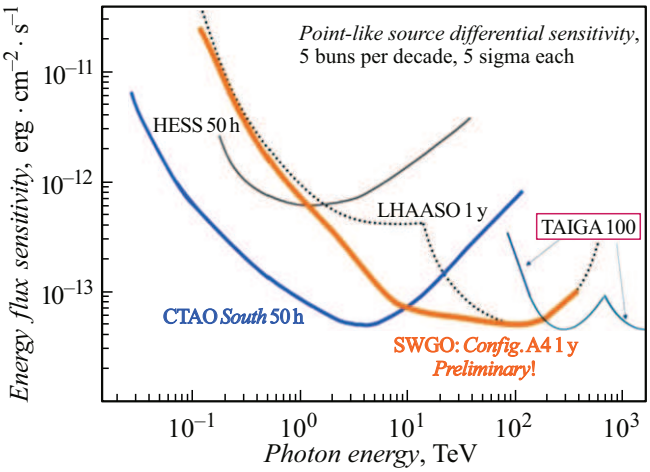


Рис. 4. Сравнение дифференциальной чувствительности к точечным гамма-источникам будущих установок TAIGA-100, CTAO [27], SWGO [28] с существующими инструментами HESS [1] и LHAASO [6].

В настоящее время структура будущей установки и место ее развертывания находится в стадии обсуждения. Дифференциальная чувствительность комплекса TAIGA-100 для конфигурации включающей 3500 СС, распределенных с шагом 100–200 m на площади 100 km^2 [10] в сравнении с другими установками приведена на рис. 4. Дифференциальная чувствительность системы из пяти АЧТ установки TAIGA-IACT в энергетическом интервале 10–100 TeV за 100 h наблюдения приблизительно равна $2.5 \cdot 10^{-12}$ erg·cm^{-2}·s^{-1} и приближается к $5 \cdot 10^{-12}$ erg·cm^{-2}·s^{-1} при 200 TeV [26], что почти на 2 порядка меньше, чем чувствительность установки TAIGA-100 при такой энергии.

Научная программа проекта TAIGA-100 включает широкий круг задач в области гамма-астрономии от сотен GeV до десятков PeV, физики космических лучей в диапазоне энергий от 0.1 PeV до 10 EeV, астрофизики элементарных частиц (поиск проявлений Новой Физики, выходящих за пределы Стандартной Модели), а также атмосферного электричества и ряда других сопутствующих направлений. Планируется исследовать энергетические спектры гамма-излучения с энергией выше 0.2–0.3 PeV от остатков сверхновых звезд (SNR), пульсарных туманностей (PWN), пульсаров в двойных системах, из областей активного звездообразования, миркоквазаров и т. д. В задачу комплекса будет входить поиск гамма-квантов с энергиями ниже и выше 1 TeV от тразиентных событий от гамма-всплесков и тесных двойных систем. Планируется осуществить поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий от 10^{15} до 10^{19} eV. Еще одной важной задачей является поиск радиосигналов от почти горизонтальных ШАЛ и ассоциация этих ливней с астрофизическими нейтрино. Планируется в деталях исследовать парциальные энергетические спектры различных ядер, что имеет важнейшее значение для понимания природы ПКЛ высоких энергий. Ожидается, что за один календарный год будет зарегистрировано 10^6 и 10^2 ШАЛ от ПКЛ с энергиями выше 100 PeV и 10 EeV соответственно.

Для отработки всех методических и технических вопросов и демонстрации эффективности комплекса TAIGA-100 планируется создать в 2027–2028 гг. действующий прототип, площадью 0.5 km^2 на площадке комплекса TAIGA-1.

Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом: грант 23-72-016 (раздел „Исследования потоков первичных космических лучей“, грант 23-72-00019 (раздел „Гамма-астрономия высоких энергий в проекте TAIGA-1“) и Минобрнауки России (FZZE-2026-0006, FZZE-2024-0005).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] F. Aharonian et al. (HECC Collab.). Astron. Astrophys., **457**, 899 (2006). DOI: 10.1051/0004-6361:20065351
[2] C. Baixeras et al. (MAGIC Collab.). NIM A, **518**, 188 (2004). DOI: 10.1016/j.nima.2003.10.057
[3] T.C. Weekes et al. Astropart. Phys., **17**, 221 (2002). DOI: 10.1016/S0927-6505(01)00152-9
[4] M. Amenomori et al. (Tibet Collab.). Phys. Rev. Lett., **123**, 051101 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.051101
[5] A. Albert et al. (HAWC Collab.). ApJ, **905**, 76 (2002). DOI: 10.3847/1538-4357/abc2d8
[6] Zhen Cao et al. (LHAASO Collab.). Nature, **594**, 33 (2021). DOI: 10.1038/s41586-021-03498-z
[7] Zhen Cao et al. (LHAASO Collab.). ApJ, **271**, 25 (2024). DOI: 10.3847/1538-4365/acfd29
[8] N. Budnev et al. (TAIGA Collab.). Phys. Particles Nuclei, **56**, 604 (2025). DOI: 10.1134/S106377882570036X
[9] L.A. Kuzmichev. Phys. Part. Nuclei, **56**, 297 (2025).
[10] R. Monkhoev et al. (TAIGA Collab.). Phys. Atomic Nuclei, **89** (1), 11 (2026).
[11] V.V. Prosin et al. (TAIGA Collab.). Bul. RAS: Phys., **89** (6), 907 (2025).
[12] N.M. Budnev et al. (TAIGA Collab.). PoS (ICRC2025), **206** (2025).
[13] Zhen Cao et al. (LHAASO Collab.). Phys. Rev. Lett., **132**, 131002 (2024).
[14] R. Alfaro et al. (HAWC Collab.). Phys. Rev. D, **96**, 122001 (2017).
[15] L. Sveshnikova et al. (TAIGA Collab.). Bul. RAS: Phys., **89** (6), 899 (2025).
[16] A. Pareti et al. (DAMPE Collab.). Int. J. Mod. Phys. Conf., **51**, 2361001 (2023).
[17] D. Podorozhny et al. (NUCLEON Collab.). Adv. Space Res., **70**, 1529 (2022).
[18] Zhen Cao et al. (LHAASO Collab.). arXiv: 2511.05013
[19] F. Aharonian et al. (HEGRA Collab.). Astrophys. J., **614**, 897 (2004).
[20] F. Aharonian et al. (H.E.S.S. Collab.). Astron. Astrophys., **457**, 899 (2006).
[21] K. Meagher. PoS ICRC 2015, **792** (2016).
[22] A.U. Abeysekara et al. (HAWC Collab.). Astrophys. J., **881**, 134 (2019).
[23] Zhen Cao et al. (LHAASO Collab.). Science, **373** (6553), 425 (2021).
[24] P. Volchugov et al. (TAIGA Collab.). Phys. Atomic Nuclei, **88**, 871 (2025).
[25] Xin-Hua Ma et al. Chinese Phys. C, **46** (3), 030001 (2022).
[26] P. Volchugov et al. (TAIGA Collab.). Bul. RAS: Physics, **89** (6), 889 (2025).
[27] B.S. Acharya et al. Astropart. Phys., **43**, 3 (2013).
[28] P. Abreu et al. arXiv: 2506.01786