

TAIGA — гибридный комплекс для многоканальной астрономии высоких энергий

© Н. Буднев,¹ Л. Кузьмичев,² И. Астапов,³ П. Безьязыков,¹ Е. Бонвеч,² А. Бородин,⁵ А. Булан,² А. Vaidyanathan,⁴ Н. Волков,⁶ П. Волчугов,^{1,2} Д. Воронин,⁷ А. Гафаров,¹ А. Гармаш,^{4,8} В. Гребенюк,^{5,9} О.А. Гресь,¹ Т.И. Гресь,¹ Е.О. Гресь,¹ А. Гринюк,⁵ О. Гришин,¹ А. Дячок,¹ Д. Журов,^{1,10} А. Загородников,¹ А.Д. Иванова,^{1,11} А.Л. Иванова,^{1,4} М. Илюшин,¹ Н. Калмыков,² В. Киндин,³ С. Кирюхин,¹ В. Кожин,² Р. Кокоулин,³ Н.И. Колосов,² К. Компаниец,³ Е. Коростелева,² Е. Кравченко,^{4,8} А. Крюков,^{1,2} А. Chiavassa,¹² М. Лаврова,⁵ 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 Э. Окунева,^{1,2} Э. Осипова,² А. Пан,⁵ А. Панов,² Л. Паньков,¹¹ А. Пахоруков,¹ А. Петрухин,³ Д. Подгрудков,² Е. Попова,² Е. Постников,² В. Просин,^{1,2} В. Птускин,¹³ А. Пушкин,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 А. Танаев,¹ М. Терновой,¹ Л. Ткачев,^{5,9} Н. Ушаков,⁷ Д. Чернов,² И. Яшин³

¹Иркутский государственный университет,

664003 Иркутск, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,

119991 Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,

115409 Москва, Россия

⁴Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,

630090 Новосибирск, 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

¹²University of Torino,

Турин, Италия

¹³Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,

108840 Троицк, Россия

e-mail: nbudnev@api.isu.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 29 августа 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Гибридный комплекс установок TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) предназначен для решения широкого круга задач в области астрофизики высоких энергий методами многоканальной астрономии. Представлено краткое описание пилотного комплекса TAIGA-1 с гибридной системой детекторов, распределенных на площади 1.1 km², и некоторые уже полученные результаты.

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

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56824.f234-23

Введение

Современная астрофизика движется в сторону организации многокомпонентных исследований, укрупнения

и объединения установок, занимающихся регистрацией различных компонент космического излучения сверхвысоких энергий. Для исследования механизмов, протекающих в космических ускорителях в пределах и за

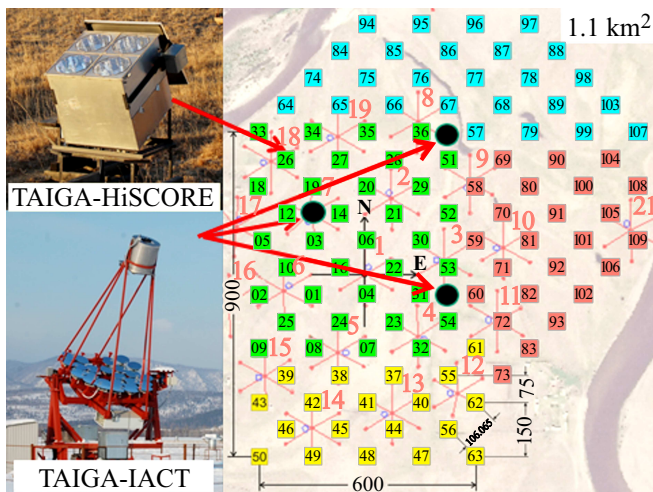


Рис. 1. Взаимное расположение детекторов TAIGA-HiSCORE (квадраты) и АЧТ установки TAIGA-IACT (кружки) астрофизического комплекса TAIGA-1.

пределами Млечного Пути, в дополнение к классической оптической астрономии в настоящее время активно развиваются несколько каналов получения информации о Вселенной, строятся установки для регистрации всего спектра электромагнитного излучения, космических лучей (заряженных частиц), нейтрино и гравитационных волн. Физически это определяется тем, что заряженная и нейтральная компоненты космического излучения от внеземных источников генетически тесно связаны, совместное исследование потоков ядер, гамма-квантов и нейтрино высоких энергий представляют особую ценность и могут дать важную информацию для решения многих фундаментальных проблем астрофизики и физики высоких энергий.

В 2022 г. в Тункинской долине в 50 km от озера Байкал завершено развертывание первой очереди гибридного комплекса TAIGA-1 (рис. 1) [1]. Он предназначен для исследования потоков гамма-излучения в диапазоне энергий 3–300 TeV и заряженных космических лучей с энергией от 100 TeV до 1000 PeV путем регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), порождаемых при взаимодействии частиц высоких энергий с атмосферой. Уникальность комплекса состоит в совместном использовании детекторов разных типов для регистрации как черенковского излучения, так и заряженных частиц ШАЛ. Для регистрации черенковского излучения ШАЛ используются атмосферные черенковские телескопы (АЧТ) установки TAIGA-IACT [2], а также широкоугольные установки TAIGA-HiSCORE [3] и Тунка-133 [4]. Для регистрации заряженной компоненты ШАЛ, в том числе мюонов, используются установки Tunka-Grande и TAIGA-Muon [5].

Высокая плотность детекторов установки TAIGA-HiSCORE (120 оптических станций с шагом 106 m на площади 1.1 km²) позволяет восстанавливать энергию ШАЛ с точностью 10–15% и направление оси ШАЛ с точностью: 0.4–0.5° для событий с 4–5

сработавшими станциями и около 0.1° для событий с более чем 10 сработавшими станциями [6,7]. Тип породившей ШАЛ частицы (адрон/гамма) определяется по характеристикам черенковского изображения ШАЛ в камерах АЧТ установки TAIGA-IACT, способных регистрировать ШАЛ с расстояния до 600 m, что позволило разместить их на достаточно большом расстоянии друг от друга.

На данный момент TAIGA — самая северная гамма-обсерватория мирового уровня. В программу наблюдения обсерватории входят источники, время наблюдения которых достаточно велико для северного расположения обсерватории: Крабовидная туманность, Dragonfly, остатки сверхновых Тихо Браге, СТА-1, G106.3+2.7, источники в туманности Sygnus Coosop, блазары Mrk501, Mrk421 и др. Круг задач комплекса включает:

1. Исследование энергетического спектра гамма-квантов от Галактических источников и поиск новых источников гамма-квантов с энергией выше 2 TeV.
2. Мониторинг потока гамма-квантов от близких внегалактических источников.
3. Поиск гамма-квантов TeV-диапазона от гамма-всплесков.
4. Поиск гамма-квантов, ассоциированных с энергичными нейтрино.
5. Поиск астрофизических наносекундных оптических транзиентов.
6. Исследование энергетического спектра и массового состава заряженных космических лучей.

Основные результаты по исследованию заряженных космических лучей с помощью установок комплекса TAIGA приведены, например, в работах [8,9]. Далее представлены некоторые последние результаты в области гамма-астрономии.

1. Детектирование гамма-квантов от астрофизических источников

В течение двух сезонов 2019–2020 гг. и 2020–2021 гг. гамма-источник в Крабовидной туманности наблюдался первым АЧТ в течение 150 h. Выделено 618 событий от гамма-квантов в энергетическом диапазоне 5–100 TeV. Уровень значимости такого числа событий над фоном заряженных космических лучей составляет 12σ (рис. 2, a). Для восстановления энергии гамма-квантов по данным только одного АЧТ использовалась оригинальная методика, основанная на результатах Монте-Карло расчетов, ее точность около 30%. Также найдено 6 гамма-квантов с энергией выше 100 TeV в рамках гибридного подхода по данным АЧТ1 и первого кластера установки TAIGA-HiSCORE. Полученный энергетический спектр хорошо совпадает с мировыми данными в области выше 5 TeV (рис. 2, b).

Для событий, зарегистрированных двумя и более АЧТ, использовались новые методы выделения событий от гамма-квантов и новые подходы к восстановлению

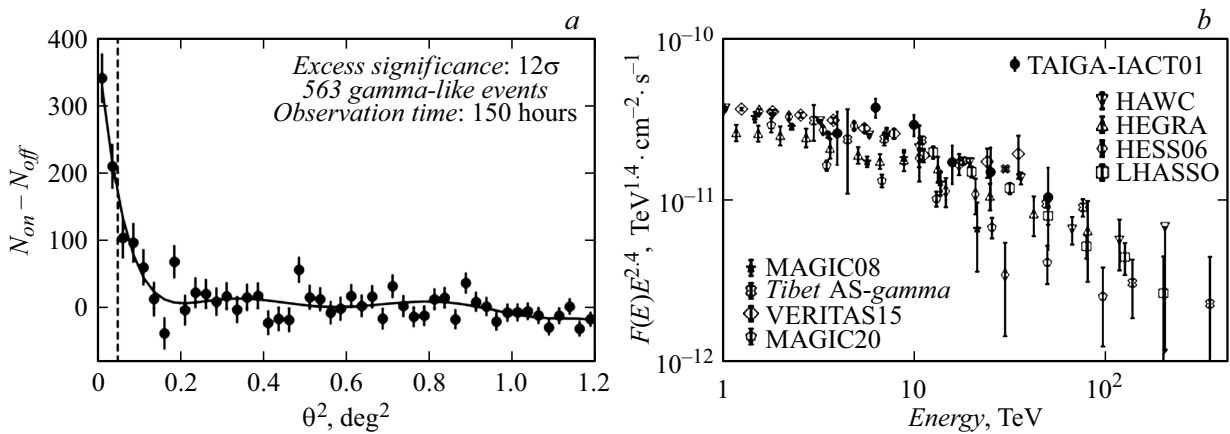


Рис. 2. *a* — распределение по параметру Θ^2 (Θ — угол между направлением на источник и направлением прихода данного события); *b* — спектр гамма-излучения от Крабовидной туманности по данным одного АЧТ за 150 h наблюдения.

направления прихода и энергии события, которые улучшают гамма-адронное разделение по сравнению с регистрацией одним телескопом. Разработанные на основе Монте-Карло расчеты подходы были применены к событиям, зарегистрированным двумя телескопами в течение сезона 2020–2021 гг. За 36 h наблюдения был получен сигнал со значимостью на уровне 5σ и восстановлен энергетический спектр, находящийся в хорошем согласии с результатами высокогорных установок HAWC и LHAASO.

2. Наблюдение гамма-всплесков

Одной из важных задач для комплекса TAIGA-1 является поиск высокоэнергетической части излучения гамма-всплесков. Программное обеспечение для управления телескопами установки TAIGA-IACT [10] реализовано с использованием пакета EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System). Наблюдение источников происходит в режиме wobble [11], что позволяет по одному и тому же набору данных оценивать поток гамма-квантов от источника и фон космических лучей. В декабре 2022 г. в программное обеспечение для управления телескопами добавлена функция планировщика, который позволяет автоматически выполнять задачи планового наблюдения источников и программ наблюдений по оповещениям (alerts) от международной сети General Coordinates Network (GCN) NASA's [12]. Программа на данном этапе автоматически получает, анализирует и добавляет в базу данных информацию о гамма-всплесках, регистрируемых космическими аппаратами SWIFT BAT и FERMI. В последующем планируется включить в число обрабатываемых оповещений сообщения от нейтринных телескопов IceCube, Baikal-GVD, наземных гамма-обсерваторий и т.д. При получении оповещения соответствующая задача наведения телескопов автоматически добавляется в планировщик с повышенным приоритетом и автоматически запускается на выполнение с остановкой задачи плановых наблюдений.

По результатам тестирования максимальное время перенаведения на гамма-всплеск (если телескопу необходимо выполнить полный оборот по азимуту) от момента получения оповещения от GCN до начала набора данных составляет 160 s. В настоящее время ведутся работы по улучшению этого показателя и созданию программ для обработки оповещений от других экспериментов.

После 21 декабря 2022 г. с помощью АЧТ установки TAIGA-IACT было выполнено 5 наведений на реальные источники гамма-всплесков, в том числе: радиогалактику NGC 1275, длинные гамма-всплески GRB 221226A, GRB 230321B и GRB230116575, двойной пульсар Be/X-ray LS V +44 17. Процесс обработки оповещений и перенаведения занял от 8 до 61 s. Полученные экспериментальные данные обрабатываются.

Заключение

Первые полученные с помощью комплекса TAIGA-1 результаты подтверждают эффективность гибридного подхода для исследования потока гамма-квантов сверхвысоких энергий и решения задач многоканальной астрономии. Экспериментально доказана возможность выделения гамма-квантов с энергией выше 100 TeV с помощью АЧТ и широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE. Эффективная площадь комплекса TAIGA-1 в рамках гибридного подхода составляет величину порядка 1 km^2 , что, как минимум, на порядок больше, чем у других черенковских гамма-телескопов (H.E.S.S., VERITAS, MAGIC) и порядка таковой у установки LHAASO. Чувствительность комплекса TAIGA-1 для регистрации гамма-квантов с энергией 30–300 TeV от локальных источников — $2.5 \cdot 10^{-13} \text{ TeV/cm}^2$ с за 300 h наблюдений. Этот результат имеет важное значение, в том числе, для подготовки проекта будущей установки TAIGA-10 с гибридной системой детекторов на площади 10 km^2 , которая позволит исследовать потоки гамма-квантов от локальных источников до PeV-энергий.

В ближайшие годы комплекс TAIGA-1 будет дополнен еще двумя АЧТ.

Благодарности

Работа выполнена на УНУ „Астрофизический комплекс МГУ–ИГУ“ (соглашение ЕВ-075-15-2021-675).

Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом — грант 23-72-00019 (раздел „Детектирование гамма-квантов от астрофизических источников“) и Минобрнауки России (FZZE-2023-0004, FZZE-2020-0024).

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] N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonech, V. Boreyko, A. Borodin, M. Brückner, A. Bulan, D. Chernov, D. Chernykh, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, D. Horns, A. Ivanova, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, S. Kiryuhin1, R. Kokoulin, K. Kompaniets, D. Kostunin, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, Yu. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, D. Podgrudkov, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Petrukhin, A. Pushnin, R. Raikin, E. Rjabov, G. Rubtsov, Y. Sagan, V. Samoliga, A. Sidorenkov, A. Silaev, A. Silaev (junior), A. Skurikhin, M. Slunicka, A. Sokolov, L. Sveshnikova, Y. Suvorkin, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashansky, L.M.Ternovoy, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Tluczykont, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, D. Voronin, R. Wischnewski, I. Yashin, A. Zagorodnikov, D. Zhurov. *J. Instrum.*, **15** (9), C09031 (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/C09031
- [3] O. Gress, I. Astapov, N. Budnev, P. Bezyazeev, A. Bogdanov, V. Boreyko, M. Brückner, A. Chiavassa, O. Chvalaev, A. Dyachok, T. Gress, S. Epimakhov, E. Fedoseev, A. Gafarov, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, A. Grinyuk, O. Grishin, D. Horns, A. Ivanova, A. Kalinin, N. Karpov, N. Kalmykov, Yu. Kazarina, N. Kirichkov, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, M. Kunnas, L. Kuzmichev, V. Lenok, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, R. Nachtigall, A. Pakhorukov, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Platonov, V. Poleschuk, E. Popova, A. Porelli, V. Prosin, G. Rubtsov, A. Pushnin, V. Samoliga, A. Saunkin, Yu. Semeny, B. Shaibonov(ju), A. Silaev, A. Silaev(ju), A. Skurikhin, V. Slucka, C. Spiering, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashchansky, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Tluczykont, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, V. Zurbanov, I. Yashin. *Nucl. Instrum. Methods A*, **845**, 367 (2017). DOI: 10.1016/j.nima.2016.08.031
- [4] 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. Semeny, A.A. Silaev, A.A. Silaev (junior), A.V. Skurikhin, C. Spiering, L.G. Sveshnikova, A.V. Zagorodnikov. *Astroparticle Phys.*, **117**, 102406 (2020). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2019.102406
- [5] A. Ivanova, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Grinyuk, D. Horns, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, I. Kotovschikov, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, E. Popova, A. Porelli1, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, G. Rubtsov, E. Rybov, Y. Sagan, V. Samoliga, A. Silaev, A. Silaev Jr, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, C. Slunicka, A. Sokolov, Y. Suvorkin, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashansky, M. Ternovoy, L. Tkachev, M. Tluczykont, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. *J. Phys.: Conf. Series*, **1690**, 012014 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1690/1/012014
- [6] L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko, A. Borodin, M. Brückner, N. Budnev, A. Chiavassa, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Dyachok, S. Epimakhov, O. Fedorov, A. Gafarov, V. Grebenyuk, A. Grinyuk, A. Haungs, D. Horns, T. Huege, A. Ivanova, D. Jurov, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, V. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, D. Kostunin, V. Kozhin, E. Kravchenko, M. Kunnas, V. Lenok, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, R. Nachtiga, E. Osipova, A. Pakharukov, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, F.G. Schröder, Yu. Semeny, A. Silaev, A. Silaev (junior), A. Sidorenko, A. Skurikhin, V. Slunicka, A. Sokolov, C. Spiering, L. Sveshnikova, V. Sulakov, V. Tabolenko, B. Tarashansky, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Tluczykont, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, V. Zurbanov, I. Yashin. *EPJ Web Conf.*, **145**, 01001 (2017). DOI: 10.1051/epjconf/201614501001
- [7] M. Tluczykont, I.I. Astapov, A.K. Awad, P.A. Bezyazeev, M. Blank, E.A. Bonech, A.N. Borodin, A.V. Bulan, M. Brückner, N.M. Budnev, A. Chiavassa, D.V. Chernov, A.N. Dyachok, A.R. Gafarov, A.Yu. Garmash, V.M. Grebenyuk, O.A. Gress, E. Gress, T.I. Gress, O.G. Grishin, A.A. Grinyuk, D. Horns, A.L. Ivanova, N.N. Kalmykov, V.V. Kindin, S.N. Kiryuhin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva,

- V.A. Kozhin, E.A. Kravchenko, A.P. Kryukov, L.A. Kuzmichev, A.A. Lagutin, M.Lavrova, Yu.E. Lemeshev, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, A.D. Lukanov, D.S. Lukyantsev, R.R. Mirgazov, R.Mirzoyan, R.D. Monkhoev, E.A. Osipova, A.L. Pakhorukov, A.Pan, L.A. Panasenko, L.V. Pankov, A.D. Panov, A.A. Petrukhin, D.A. Podgrudkov, V.A. Poleschuk, E.G. Popova, A.Porelli, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, R.I. Raikin, A.Y. Razumov, G.I. Rubtsov, E.V. Ryabov, Y.I. Sagan, V.S. Samoliga, Yu.A. Semeny, A.A. Silaev, A.A. Silaev Jr., A.Yu. Sidorenkov, A.V. Skurikhin, M. Slunicka, A.V. Sokolov, Y. Suvorkin, L.G. Sveshnikova, V.A. Tabolenko, A.B. Tanaev, B.A. Tarashansky, M. Ternovoy, L.G. Tkachev, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P.A. Volchugov, N.V. Volkov, D. Voronin, R. Wischnewski, I.I. Yashin, A.V. Zagorodnikov, D.P. Zhurov, (TAIGA Collaboration). *Phys. At. Nucl.*, 84 (6), 1045 (2021). DOI: 10.1134/S1063778821130378
- [8] I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, M. Blank, E.A. Bonvech, A.N. Borodin, M. Brückner, N.M. Budnev, A.V. Bulan, A. Vaidyanathan, R. Vishnevsky, N.V. Volkov, P. A. Volchugov, D.M. Voronin, A.R. Gafarov, O.A. Gress, T.I. Gress, O.G. Grishin, A.Yu. Garmash, V.M. Grebenyuk, A.A. Grinyuk, A.N. Dyachok, D.P. Zhurov, A.V. Zagorodnikov, A.L. Ivanova, N.N. Kalmykov, V.V. Kindin, S.N. Kiryukhin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, V.A. Kozhin, E.A. Kravchenko, A.P. Kryukov, L.A. Kuzmichev, A. Chiavassa, A.A. Lagutin, M.V. Lavrova, Yu.E. Lemeshev, B.K. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, R.R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R.D. Monkhoev, E.A. Osipova, A.L. Pakhorukov, A. Pan, M.I. Panasyuk, L.V. Pankov, A.A. Petrukhin, D.A. Podgrudkov, V.A. Poleschuk, E.G. Popova, A. Porelli, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, A.V. Razumov, R.I. Raikin, G.I. Rubtsov, E.V. Ryabov, Ya.I. Sagan, V.S. Samoliga, I. Satyshev, A.A. Silaev, A.A. Silaev Jr., A.Yu. Sidorenkov, A.V. Skurikhin, A.V. Sokolov, L.G. Sveshnikova, Ya.V. Suvorkin, V.A. Tabolenko, A.B. Tanaev, B.A. Tarashchansky, M.Yu. Ternovoi, L.G. Tkachev, M. Tluczykont, N.A. Ushakov, D. Horns, D.V. Chernov, I.I. Yashin. *J. Exp.Theor. Phys.*, 134 (4), 469 (2022). DOI: 10.1134/S1063776122040136
- [9] A.L. Ivanova, R. Monkhoev, I. Astapov, P. Bezyazeev, M. Blank, E. Bonvech, A. Borodin, M. Brückner, 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, D. Horns, 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. Mirzoyan, E. Osipova, A. Pakhorukov, L. Pankov, A. Pan, A. Panov, A. Petrukhin, I. Poddubnyi, D. Podgrudkov, V. Poleschuk, V. Ponomareva, E. Popova, A. Porelli, 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, S. Sinegovsky, A. Skurikhin, A. Sokolov, V. Sulakov, L. Sveshnikova, V. 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. *J. Phys.: Conf. Series*, 2156, 012196 (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2156/1/012196
- [10] D. Zhurov, O. Gress, D. Sidorov, I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko, A. Borodin, N. Budnev, M. Brueckner, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, T. Gress, O. Grishin, A. Grinyuk, D. Horns, A. Ivanova, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, P. Kirilenko, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, M. Kunnas, L. Kuzmichev, Yu. Lemeshev, V. Lenok, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, R. Nachtigall, E. Osipova, A. Pakhorukov, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, E. Rjabov, G. Rubtsov, A. Pushnin, Y. Sagan, B. Sabirov, V. Samoliga, Yu. Semeny, A. Silaev, A. Silaev junior, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, V. Slunicka, A. Sokolov, C. Spiering, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashansky, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Tluczykont, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, V. Zurbanov, I. Yashin. *J. Phys.: Conf. Series*, 1181 (1), 012045 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1181/1/012045
- [11] D. Zhurov, O.A. Gress, I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko, A. Borodin, M. Brueckner, N.M. Budnev, A. Chiavassa, A.N. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, T.I. Gress, O. Grishin, A. Grinyuk, D. Horns, A. Ivanova, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, P. Kirilenko, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V.V. Kozhin, E. Kravchenko, M. Kunnas, L. Kuzmichev, Y. Lemeshev, V. Lenok, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, R. Nachtigall, E. Osipova, A. Pakhorukov, M.I. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, E. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, E.V. Rjabov, G. Rubtsov, A. Pushnin, Y. Sagan, B. Sabirov, V. Samoliga, Y. Semeny, A. Silaev, A. Silaev(junior), A. Sidorenkov, A.V. Skurihin, V. Slunicka, A.V. Sokolov, C. Spiering, L. Sveshnikova, V.A. Tabolenko, B. Tarashansky, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Tluczykont, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, V. Zurbanov, I. Yashin. *PoS ICRC2017*, 785 (2018). DOI: 10.22323/1.301.0785
- [12] L. Singer, J. Racusin. *Bull. American Astronom. Society*, 55 (2), (2023). <https://baas.aas.org/pub/2023n2i108p02/release/1>