Оценка возможности применения гибридного подхода к поиску астрофизических гамма-квантов по данным черенковской и сцинтилляционной установок астрофизического комплекса TAIGA

© В.С. Самолига,[1,2] И.И. Астапов,[3] П.А. Безъязыков,[1] Е.А. Бонвеч,[4] А. Блинов,[5] А.Н. Бородин,[5] Н.М. Буднев,[1] А.В. Булан,[4] П.В. Бусыгин,[1] П.В. Волков,[6] П.А. Волчугов,[1,4] Д.М. Воронин,[7] А.Р. Гафаров,[1] А.Ю. Гармаш,[2,8] В.М. Гребенюк,[5,9] О.А. Гресь,[1] Т.И. Гресь,[1] Е.О. Гресь,[1] А.А. Гринюк,[5] О.Г. Гришин,[1] А.Н. Дячок,[1] В.А. Ерофеева,[1] Д.П. Журов,[1] А.В. Загородников,[1] В. Зиракашвили,[10] А.Д. Иванова,[1,11] А.Л. Иванова,[1,2] М.А. Илюшин,[1] И.А. Кабанник,[2] Н.Н. Калмыков,[4] В.В. Киндин,[3] С.Н. Кирюхин,[1] В.А. Кожин,[4] Р.П. Кокоулин,[3] К.Г. Компаниец,[3] Е.Е. Коростелева,[4] Е.А. Кравченко,[2,8] А.П. Крюков,[4] Л.А. Кузьмичев,[4] А. Кьявасса,[12] М.В. Лаврова,[5] А.А. Лагутин,[6] Ю.Е. Лемешев,[1] Б.К. Лубсандоржиев,[7] Н.Б. Лубсандоржиев,[1,4] А. Луканов,[7] С.Д. Малахов,[1] Р.Р. Миргазов,[1] Р.Д. Монхоев,[1,2] Э.А. Окунева,[1,4] Э.А. Осипова,[4] А. Пан,[5] А.Д. Панов,[4] Л.В. Паньков,[1] А.Л. Пахоруков,[1] А.А. Петрухин,[3] Д.А. Подгрудков,[4] И. Поддубный,[1] Е.Г. Попова,[4] Е.Б. Постников,[4] В.В. Просин,[4] А.А. Пушнин,[1] Р.И. Райкин,[6] А.В. Разумов,[1,4] Г.И. Рубцов,[7] Е.В. Рябов,[1] А.К. Сагдеева,[1] И. Сатышев,[5] Л.Г. Свешникова,[4] А.Ю. Сидоренков,[7] А.А. Силаев,[4] А.А. Силаев (мл.),[4] А.В. Скурихин,[4] А.В. Соколов,[2,8] В.А. Таболенко,[1] А.Б. Танаев,[1] М.Ю. Терновой,[1] Л.Г. Ткачев,[5,9] Н.А. Ушаков,[7] Д.В. Чернов,[4] А. Шайковский,[5] И.И. Яшин[3]

[1] Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, Россия
[2] Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
[3] Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
105043 Москва, Россия
[4] Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119234 Москва, 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] Государственный университет „Дубна“,
141982 Дубна, Московская обл., Россия
[10] Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
142191 Троицк, Москва, Россия
[11] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
[12] Dipartimento di Fisica Generale Universiteta di Torino and INFN,
Torino, Italy
e-mail: vladimir.samoliga@yandex.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.
В окончательной редакции 6 августа 2024 г.
Принято к публикации 30 августа 2024 г.

Представлены результаты анализа экспериментальных данных черенковской и сцинтилляционной установок астрофизического комплекса TAIGA. Приведены оценки количества космических гамма-квантов от Крабовидной туманности с энергией выше 100 TeV, которые могут быть зарегистрированы при совместной работе установок за один сезон измерений.

Ключевые слова: гамма-астрономия, космические лучи, широкие атмосферные ливни, установка Tunka-Grande, установка TAIGA-HiSCORE.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59250.348-24

Введение

Исследование гамма-излучения с энергией выше 100 TeV является одной из важнейших задач современной астрофизики. Регистрация такого излучения осуществляется наземными установками путем детектирования различных компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ). При этом сам процесс выделения гамма-

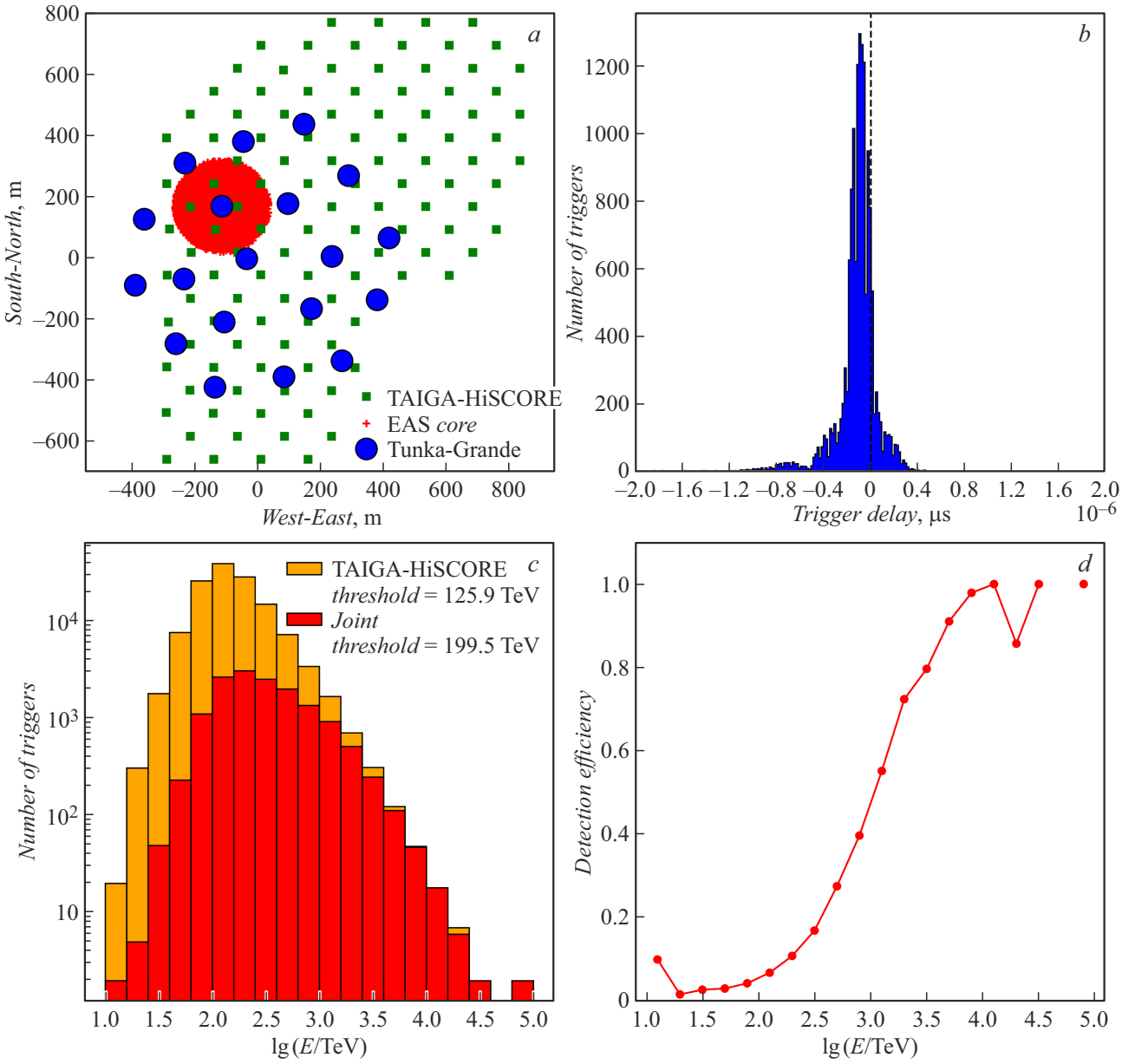


Рис. 1. Пример совместных событий одной из станций установки Tunka-Grande и оптических детекторов установки TAIGA-HiSCORE: *a* — схема расположения станций, оптических детекторов и осей ШАЛ при радиусе отбора событий $Rs = 150$ m; *b* — гистограмма разности времен регистрации ШАЛ; *c* — количество ШАЛ по данным установки TAIGA-HiSCORE и совместных событий в зависимости от энергии ПКИ; *d* — эффективность совместной регистрации.

квантов из фона заряженных космических частиц является весьма нетривиальным и требует применения различных экспериментальных подходов.

В настоящей работе проводится анализ экспериментальных данных двух установок астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) [1] в гибридном режиме их работы. Установка TAIGA-HiSCORE [2] — сеть из 120 оптических детекторов, размещенных на площади $1\,\text{km}^2$ с пространственным шагом ~ 106 m. Установка Tunka-Grande [3] — массив сцинтилляционных счетчиков, объединенных в 19 станций с шагом ~ 200 m на площади $0.5\,\text{km}^2$ (рис. 1, *a*). Установки предназначены для исследования первичного космического излучения (ПКИ) методом регистрации черенковского излучения, а также электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ соответственно.

1. Гибридный подход к выделению первичных гамма-квантов

Основная идея гибридного подхода состоит в том, что по данным сцинтилляционных счетчиков возможно

проводить гамма-адронную сепарацию ПКИ на основе анализа мюонной компоненты ШАЛ. При этом высокая точность восстановления параметров ПКИ по данным установки TAIGA-HiSCORE позволяет провести построение карты событий в экваториальной и галактической системах координат для ассоциации этих событий с известными гамма-источниками и оценки значимости сигнала от них.

Энергетический порог регистрации ПКИ для установки TAIGA-HiSCORE при минимально необходимом срабатывании четырех оптических детекторов составляет 100 TeV. При условии регистрации ШАЛ тремя и более станциями установки Tunka-Grande, ее порог 10 PeV. С целью понижения энергетического порога установки Tunka-Grande на ~ 2 порядка было предложено использовать режим работы ее отдельных станций. Так, на рис. 1, *c* показано, что при таком режиме порог составляет ~ 200 TeV. В этом случае станции установки Tunka-Grande предполагается рассматривать как дополнительные детекторы в составе установки TAIGA-HiSCORE, которые позволяют выделять гамма-кандидаты среди всех зарегистрированных событий. Остальные параметры, такие как положение оси ШАЛ, углы прихода первичных частиц и их энергия, с высокой экспериментально подтвержденной точностью [4,5] возможно восстанавливать по данным детекторов установки TAIGA-HiSCORE.

2. Поиск и анализ совместных событий установок Tunka-Grande и TAIGA-HiSCORE

Для поиска совместных событий по экспериментальным данным отдельных станций установки Tunka-Grande в первую очередь был проведен отбор ШАЛ, которые совпадают по времени регистрации с установкой TAIGA-HiSCORE в пределах окна $\pm 10\,\mu$s. Для этого анализа был выбран сеанс 17 декабря 2022 г. длительностью 7.5 h. На рис. 1, *b* показана гистограмма разности времен прихода ШАЛ на отдельно рассматриваемую станцию и оптические детекторы в пределах $\pm 2\,\mu$s. Среднее значение при этом составило $-0.11\,\mu$s. Затем было введено ограничение на расстояние от станций до осей ШАЛ, восстановленных с помощью установки TAIGA-HiSCORE (рис. 1, *a*). С одной стороны, это исключает случайные совпадения с ШАЛ, отдаленными от станций на расстояния порядка нескольких межстанционных шагов. С другой стороны, позволяет получить соотношение числа совместных событий к числу ШАЛ, зарегистрированных установкой TAIGA-HiSCORE, при разных радиусах отбора событий Rs. Зависимость этого соотношения от восстановленной энергии ПКИ представляет собой график эффективности совместной регистрации ШАЛ (рис. 1, *d*).

Для нескольких значений Rs (50, 75, 100, 125 и 150 m) была проведена аппроксимация средней эффективности

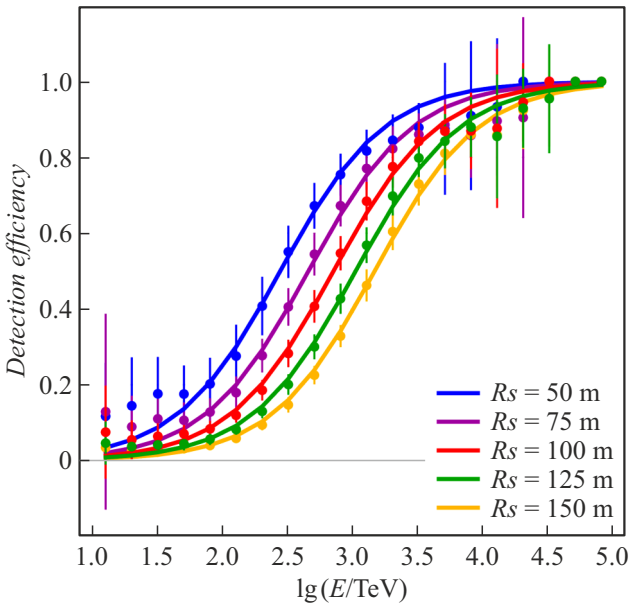


Рис. 2. Средняя эффективность совместной регистрации ШАЛ отдельными станциями Tunka-Grande при разных радиусах отбора Rs.

регистрации отдельных станций Tunka-Grande с использованием следующей функции:

$$f(E) = \left(1 + \exp\left(\frac{a - \log_{10}(E/\text{TeV})}{b}\right)\right)^{-1}, \qquad (1)$$

где параметры a и b подбираются при каждом Rs. При уменьшении Rs эффективность совместной регистрации возрастает (рис. 2). Однако при этом снижается общая площадь отбора событий установки, что уменьшает вероятность обнаружения гамма-квантов. С увеличением Rs площади отбора событий отдельных станций начинают перекрываться (при $Rs > 100$ m), а при $Rs \approx 150$ m охватывают всю площадь установки Tunka-Grande. В этом случае для каждого ШАЛ необходимо учитывать максимальную эффективность регистрации среди соседних станций. Было получено, что при $Rs > 100$ m эффективность регистрации установки Tunka-Grande равна средней эффективности регистрации ее отдельных станций при $Rs = 100$ m.

Полученные характеристики используются для оценки потока регистрируемых гамма-квантов. В качестве источника космических гамма-квантов в настоящей работе рассматривается „стандартная свеча“ гамма-астрономии — Крабовидная туманность. В статье [6] было показано, что время наблюдения этого источника с помощью установки TAIGA-HiSCORE составило 204 h за 2 сезона измерений (2019–2022 гг). Это связано с тем, что оптические детекторы работают только в ясные безлунные ночи. В качестве энергетического спектра Крабовидной туманности, согласно работе [7], взято

Плотность потока гамма-квантов и их количество, доступное для совместной регистрации установками TAIGA-HiSCORE и Tunka-Grande за 1 сезон наблюдений

Радиус отбора событий станции Tunka-Grande Rs, m	Площадь отбора событий установки Tunka-Grande S, km^2	Плотность потока гамма-квантов Fg, $km^{-2} \cdot h^{-1}$	Количество гамма-квантов Ng
50	0.15	$5.23 \cdot 10^{-2}$	0.8
75	0.34	$3.92 \cdot 10^{-2}$	1.3
100	0.6	$2.91 \cdot 10^{-2}$	1.8
125	0.8	$2.91 \cdot 10^{-2}$	2.3
150	0.88	$2.91 \cdot 10^{-2}$	2.6

выражение:

$$\frac{dN}{dE} = (8.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-14} (E/10\,\text{TeV})^{-\Gamma}\,\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{TeV}^{-1},$$

$$\Gamma = (2.90 \pm 0.01) + (0.19 \pm 0.02) \log_{10}(E/10\,\text{TeV}). \quad (2)$$

Плотность потока гамма-квантов от Крабовидной туманности с энергиями выше 100 TeV составляет $0.1\,\text{km}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, что дает 10.2 гамма-кванта за сезон измерений на установке TAIGA-HiSCORE. С помощью выражений (1) и (2) были получены оценки плотности потока гамма-квантов Fg и их количества Ng, которые можно зарегистрировать с энергией выше 100 TeV при совместной работе установок за один сезон измерений ($\sim 100\,\text{h}$) при разных Rs (см. таблицу).

Заключение

При текущей конфигурации установки Tunka-Grande доступна регистрация 2.6 гамма-квантов за сезон измерений ($\sim 100\,\text{h}$) на площади $0.88\,\text{km}^2$ при совместной работе с установкой TAIGA-HiSCORE. Данное количество составляет 29.1% от доступного для установки TAIGA-HiSCORE на той же площади. Для повышения частоты регистрации необходимо более плотное расположение станций. Так, для наблюдения потока $Fg = 5.23 \cdot 10^{-2}\,\text{km}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ требуется межстанционное расстояние порядка 100 m.

В дополнение к установке Tunka-Grande в 2019 г. началось развертывание сцинтилляционной установки TAIGA-Muon [8] с энергетическим порогом регистрации ПКИ ниже 1 PeV. Первая очередь строительства включает в себя детекторы электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ общей площадью $\sim 200\,\text{m}^2$. Межстанционное расстояние при этом составляет $\sim 100\,\text{m}$. Ожидается, что введение в состав астрофизического комплекса TAIGA новой установки значительно повысит эффективность регистрации гамма-квантов в гибридном режиме работы и позволит приступить к детальному изучению локальных источников гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий.

Финансирование работы

Работа выполнена на УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“. Поддержана Министерством науки и высшего образования (проекты FZZE-2024-0005, FZZE-2023-0004, FSUS-2022-0015) и Российским научным фондом (проекты 23-72-00019 (раздел 2), 23-72-00054 (раздел 3)).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] I. Astapov, P. Bezyazeekov, 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, A.L. Ivanova, M. Iliushin, 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. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Okuneva, E. Osipova, A. Pakhorukov, L. Pankov, A. Pan, A. Panov, A. Petrukhin, D. Podgrudkov, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, V. Samoliga, I. Satyshev, A. Silaev, A. Silaev (junior), A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashchansky, L. Tkachev, A. Tanaev, M. Ternovoy, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. Phys. Atom. Nucl., **86** (4), 471 (2023). DOI: 10.1134/S1063778823040051

[2] L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeekov, A. Borodin, M. Brückner, N. Budnev, A. Chiavassa, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, A. Grinyuk, D. Horns, N. Kalmykov, Y. Kazarina, V. Kindin, V. Kiryuhin, P. Kirilenko, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, A. Lagutin, V. Lenok, B. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakharukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popesku, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov,

V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, Yu. Semeney, A. Silaev, A. Silaev Jr., A. Sidorenkov, A. Skurikhin, M. Slunecka, A. Sokolov, C. Spiering, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashansky, A. Tkachenko, L. Tkachev, M. Tluczykont, N. Ushakov, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, V. Zurbanov, I. Yashin. Instrum. Meth. A, **952**, 161830 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2019.01.056

[3] R.D. Monkhoev. Phys. Part. Nucl. Lett., **20** (5), 1002 (2023). DOI: 10.1134/S1547477123050552

[4] V.V. Prosin, I. Astapov, P. Bezyazeekov, E. Bonvech, 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, 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. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, D. Lukyantsev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Okuneva, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, L. Panasenko, L. Pankov, A.D. Panov, A. Petrukhin, I. Poddubny, D. Podgrudkov, V. Poleschuk, V. Ponomareva, E. Popova, E. Postnikov, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, A. Silaev, A. Silaev, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashchansky, M.Y. Ternovoy, L. Tkachev, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, A. Zhaglova, D. Zhurov, I. Yashin. Sci. Post. Phys. Proc. **13**, 037 (2023). DOI: 10.21468/SciPostPhysProc.13.037

[5] A. Porelli et al. (TAIGA collaboration), PoS, ICRC2021, 876 (2021). DOI: 10.22323/1.395.0876

[6] В.С. Самолига. ЖТФ, **93** (12), 1787 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56822.f215-23

[7] Zhen Cao et al. (LHAASO collaboration), Science, **373**, 425 (2021). DOI: 10.1126/science.abg5137

[8] A.L. Ivanova, I. Astapov, P. Bezyazeekov, 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, M. Iliushin, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, M. Lavrova, A. Lagutin, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Okuneva, E. Osipova, A. Pakhorukov, L. Pankov, A. Pan, A. Panov, A. Petrukhin, D. Podgrudkov, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, V. Samoliga, I. Satyshev, A. Silaev (junior), A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashchansky, L. Tkachev, A. Tanaev, M. Ternovoy, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. Phys. Atom. Nucl., **86** (4), 478 (2023). DOI: 10.1134/S1063778823040221