

## Эксперимент TAIGA — новые результаты и перспективы развития

© Н. Буднев,<sup>1</sup> Л. Кузьмичев,<sup>2</sup> И. Астапов,<sup>3</sup> П. Безъязыков,<sup>5</sup> А. Блинов,<sup>5</sup> А. Бородин,<sup>5</sup> А. Булан,<sup>2</sup> П. Бусыгин,<sup>1</sup> Н. Волков,<sup>6</sup> П. Волчугов,<sup>1,2</sup> Д. Воронин,<sup>7</sup> А. Гафаров,<sup>1</sup> А. Гармаш,<sup>4,8</sup> Г.С. Гоман,<sup>2</sup> В. Гребенюк,<sup>5,7</sup> О. Гресь,<sup>1</sup> Т. Гресь,<sup>1</sup> Е. Гресь,<sup>1</sup> А. Гринюк,<sup>5</sup> О. Гришин,<sup>1</sup> А. Дячок,<sup>1</sup> Д. Журов,<sup>1</sup> А. Загородников,<sup>1</sup> В. Зиракашвили,<sup>12</sup> А.Д. Иванова,<sup>1,10</sup> А.Л. Иванова,<sup>1,4</sup> М. Илюшин,<sup>1</sup> Н. Калмыков,<sup>2</sup> В. Киндин,<sup>3</sup> С. Кирюхин,<sup>2</sup> В. Кожин,<sup>2</sup> К. Компаниец,<sup>3</sup> Е. Коростелева,<sup>2</sup> Е. Кравченко,<sup>4,8</sup> А. Крюков,<sup>2</sup> А. Киавасса,<sup>11</sup> А. Лагутин,<sup>6</sup> Ю. Лемешев,<sup>1</sup> Б. Лубсандоржиев,<sup>7</sup> Н. Лубсандоржиев,<sup>1,2</sup> С. Малахов,<sup>1</sup> Р. Миргазов,<sup>1</sup> Р. Монхоев,<sup>1</sup> Э. Окунева,<sup>1,2</sup> Э. Осипова,<sup>2</sup> А. Пан,<sup>5</sup> А. Панов,<sup>2</sup> Л. Паньков,<sup>1</sup> А. Пахоруков,<sup>1</sup> А. Петрухин,<sup>3</sup> В. Полещук,<sup>1</sup> Е. Попова,<sup>2</sup> Е. Постников,<sup>2</sup> В. Просин,<sup>1,2</sup> А. Пушкин,<sup>1</sup> Р. Райкин,<sup>6</sup> А. Разумов,<sup>2</sup> Г. Рубцов,<sup>7</sup> Е. Рябов,<sup>1</sup> И. Сатышев,<sup>5</sup> В. Самолига,<sup>1</sup> Л. Свешникова,<sup>2</sup> А. Сидоренков,<sup>7</sup> А. Силаев,<sup>2</sup> А. Силаев (мл.),<sup>2</sup> А. Скурихин,<sup>2</sup> А. Соколов,<sup>4,8</sup> В. Таболенко,<sup>1</sup> М. Терновой,<sup>1</sup> Н. Ушаков,<sup>7</sup> А. Шайковский,<sup>5</sup> М. Шульга,<sup>1</sup> И. Яшин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет,  
664003 Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,  
119991 Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,  
115409 Москва, Россия

<sup>4</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>5</sup>Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская обл., Россия

<sup>6</sup>Алтайский государственный университет,  
656049 Барнаул, Россия

<sup>7</sup>Институт ядерных исследований РАН,  
117312 Москва, Россия

<sup>8</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>9</sup>Государственный университет „Дубна“,  
141980 Дубна, Московская обл., Россия

<sup>10</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
117303 Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>11</sup>University of Torino,  
Турин, Италия

<sup>12</sup>Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН,  
142190 Троицк, Московская обл., Россия  
e-mail: nbudnev@api.isu.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 14 июля 2025 г.

Принято к публикации 14 июля 2025 г.

Представлены некоторые из последних результатов исследований потоков космических лучей и гамма-квантов, полученных с помощью гибридного комплекса TAIGA-1, и предложения по созданию комплекса TAIGA-100 площадью порядка 100 km<sup>2</sup>.

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

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61793.237-25

## Введение

Большое значение для изучения природы источников первичных космических лучей (ПКЛ) высоких энергий имеет исследование потоков нейтральных частиц — гамма-квантов и нейтрино. На первом этапе развития наземной гамма-астрономии высоких энергий основные результаты были получены с помощью установок H.E.S.S., MAGIC и VERITAS, в состав которых входит от 2 до 5 так называемых IACT (Imaging Atmospheric

Cherenkov Telescopes). Однако ограниченный размер эффективной площади (менее 0.1 km<sup>2</sup>) этих установок не позволяет регистрировать гамма-кванты с энергией выше 100 TeV со значимой статистикой. Прорыв в изучении астрофизических источников, в которых частицы ускоряются до энергий порядка и выше 1 PeV (ПэВатронов) произошел с началом работы высокогорных установок, регистрирующих заряженные частицы ШАЛ (широких атмосферных ливней): Tibet-ASgamma, HAWC и LHAASO. С их помощью были зарегистрированы

гамма-кванты с энергией выше 100 TeV от более сорока галактических источников, от двух источников (Крабовидная туманность и J2032+4102) зарегистрированы гамма-кванты с энергией более 1 PeV [1].

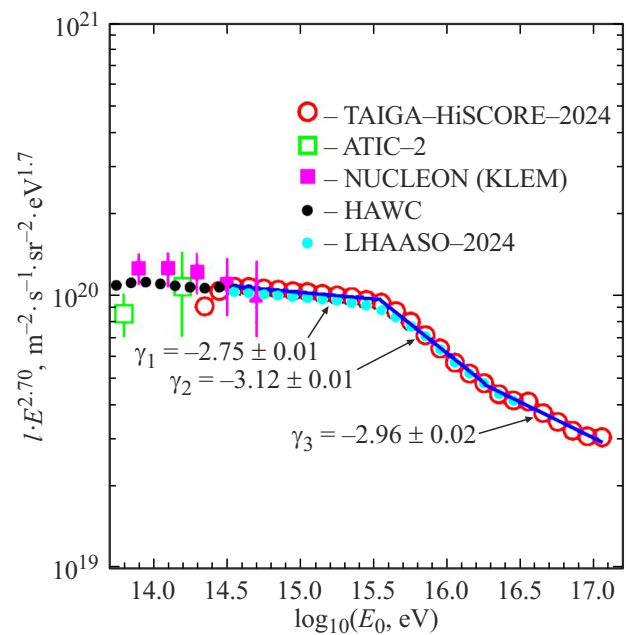
В последние годы в Тункинской долине в 50 km от озера Байкал начал набор данных комплекс TAIGA-1 [2]. Его эффективная площадь для регистрации гамма-квантов с энергией выше 100 TeV порядка 1 km<sup>2</sup>, что позволило впервые начать исследование ПэВатронов методом регистрации черенковского излучения ШАЛ. В настоящей работе представлены некоторые из последних результатов, полученных с помощью комплекса TAIGA-1 и предложения по созданию комплекса TAIGA-100 площадью порядка 100 km<sup>2</sup>.

## 1. Исследования потоков ПКЛ

Исследования энергетического спектра и массового состава ПКЛ ведутся с помощью всех установок комплекса TAIGA в диапазоне энергий от 10 TeV до 1000 PeV. Особый интерес представляют исследования природы излома энергетического спектра ПКЛ в области „классического колена“ при энергии 3 PeV, которая до сих пор не ясна, уменьшения наклона спектра при энергии 20–30 PeV и вопроса о том, действительно ли возрастание крутизны спектра при энергии 100 PeV говорит о переходе от галактических к внегалактическим ПКЛ?

При обработке данных введенной в строй в 2009 г. установки Тунка-133, энергетический порог которой около 8 PeV, для восстановления энергии ШАЛ основным параметром является поток фотонов на расстоянии 200 m от оси ШАЛ  $Q(200)$  [3]. Широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE [2] имеет более низкий порог (порядка 200 TeV) для регистрации ПКЛ. При таких энергиях поток фотонов от ШАЛ существенно меньше, поэтому разработан новый метод восстановления энергии, в котором наряду с параметром  $Q(200)$  используется плотность потока черенковских фотонов на расстоянии 100 m от оси ШАЛ  $Q(100)$ .

На рис. 1 представлен энергетический спектр ПКЛ, построенный в результате обработки новых экспериментальных данных, полученных при синхронной работе всех четырех кластеров установки TAIGA-HiSCORE за сезоны 2022–2024 гг. и переобработки полученных ранее. Обработка данных выполнена с использованием в том числе нового параметра  $Q(100)$ . Эффективность регистрации более 95% начинается для энергий выше 300 TeV. Энергетический спектр имеет степенной характер  $E^\gamma$  и содержит около 18 миллионов событий. В спектре хорошо видно возрастание крутизны при энергии 3 PeV и снижение крутизны при энергии 20 PeV. Показатель наклона спектра  $\gamma = (3.12 \pm 0.01)$  в диапазоне 3–20 PeV,  $\gamma = (2.97 \pm 0.03)$  в диапазоне 20–100 PeV и  $\gamma = (3.3 \pm 0.2)$  после 100 PeV. Наши новые спектры



**Рис. 1.** Энергетический спектр космических лучей по данным установки TAIGA-HiSCORE в сравнении с результатами других установок. Аппроксимация данных степенным законом  $E^\gamma$  с соответствующими значениями показателя наклона энергетического спектра  $\gamma$ .

близки к спектрам, полученным на установке LHAASO другой методикой [4].

Результаты определения средней глубины максимума ШАЛ  $X_{\max}$  по данным установки TAIGA-HiSCORE для вертикального направления оптических станций за сезоны измерений 2022–2024 гг. приведены на рис. 2, а. Величина  $X_{\max}$  однозначно связана с крутизной функции пространственного распределения (ФПР) и длительностью импульсов черенковского света на больших расстояниях от оси. Для определения крутизны ФПР использовался параметр  $P$  — „отношение плотности потока черенковского света на расстоянии 80 m от оси к плотности потока света на расстоянии 200 m“,  $P = Q(80)/Q(200)$ . На этом же рисунке новые результаты по данным установки TAIGA-HiSCORE сравниваются с результатами установки Тунка-133, пересчитанными по этой же методике, и с результатами экспериментов РАО [5] и ТА [6], полученными путем наблюдения флуоресцентного света ШАЛ. На рис. 2, б приведен средний логарифм массы первичных космических лучей  $\langle \ln A \rangle$ , пересчитанный по данным о  $X_{\max}$  методом линейной интерполяции между расчетными зависимостями глубины максимума ШАЛ, от энергии для первичных протонов и ядер железа. При этом использованы расчетные кривые для модели QGSJET-II-04 [7]. В области „колена“ наши данные о массовом составе ПКЛ (рис. 2, б) также близки к результатам LHAASO. До энергии 3 PeV наблюдается некоторое облегчение состава, а после — утяжеление.

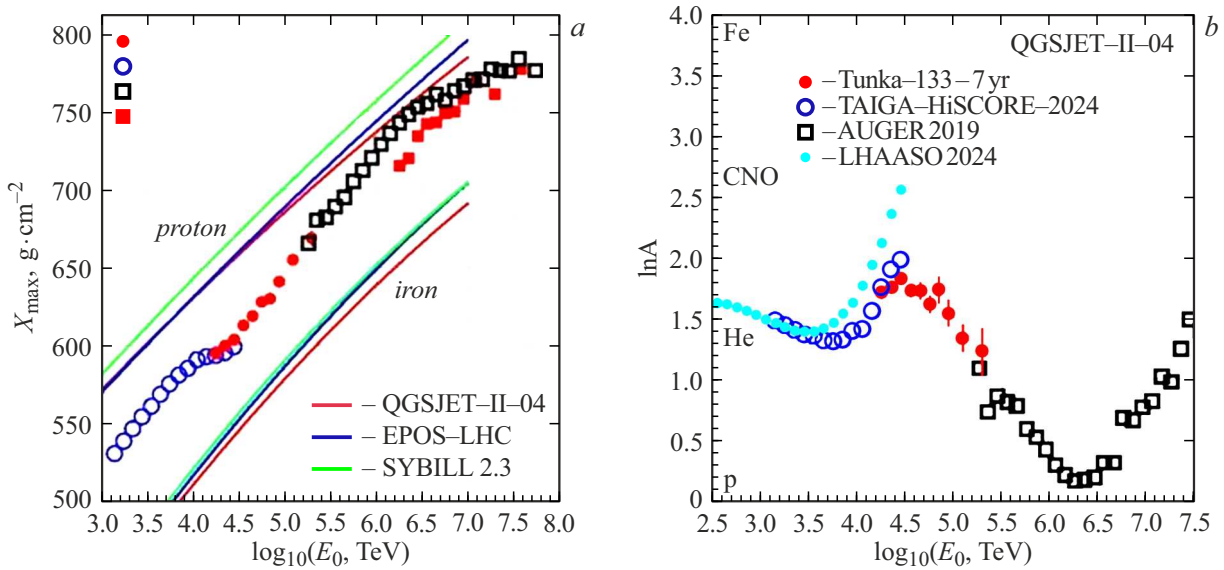


Рис. 2. *a* — глубина максимума ШАЛ; *b* — средний логарифм массового числа, усредненный по составу космических лучей по данным установок TAIGA-HiSCORE и Тунка-133.

## 2. Энергетический спектр гамма-излучения Крабовидной туманности

Характерное расстояние между пятью Атмосферными черенковскими телескопами (АЧТ) [2] установки TAIGA-IACT составляет около 250 м [8] (в настоящее время в наборе данных участвует четыре АЧТ, пятый телескоп будет введен в строй в ближайшие два года). Установка позволяет регистрировать гамма-кванты в стереоскопическом режиме с энергией выше 10 TeV. Процедуры определения энергии и  $X_{\max}$  событий реализованы с помощью фреймворка Light Gradient-Boosting Machine (LGBM) (быстрая реализация алгоритма GBDT), который позволяет создавать и настраивать совокупность последовательно обучающихся деревьев решений. Для гамма-квантов с энергией выше 20 TeV энергетическое

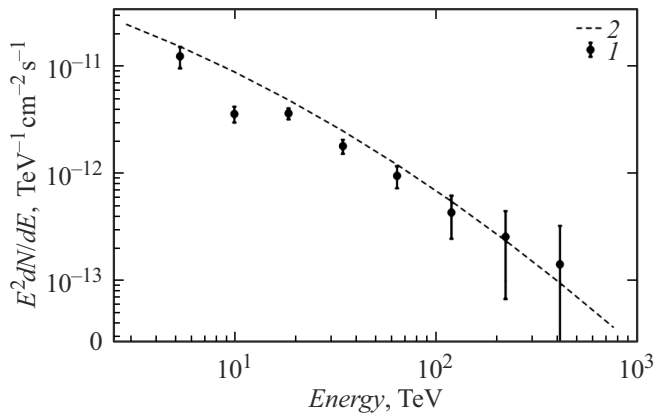


Рис. 3. 1 — энергетический спектр Крабовидной туманности по данным установки TAIGA-IACT; 2 — аппроксимация энергетического спектра этого источника, полученного обсерваторией LHAASO в работе [4].

разрешение составляет  $\sim 20\%$ , а точность восстановления  $X_{\max}$  лучше, чем 20 g/cm<sup>2</sup>.

Методика выделения гамма-квантов с энергиями выше 10 TeV включает отбор событий по параметрам  $pwidth$  — нормализованная ширина и  $\theta^2$  — угол между восстановленным направлением прихода ШАЛ и направлением на наблюдаемый источник гамма-квантов (подробнее см. [9]). Оптимальные значения критериев отбора определены на основе Монте-Карло моделирования, путем максимизации Q-фактора — отношения доли прошедших отбор ШАЛ от гамма-квантов к корню из числа прошедших отбор ШАЛ от адронов. Этот подход позволил добиться подавления ШАЛ от адронов в 10<sup>4</sup> раз. Соответствующие критерии отбора —  $pwidth < 0.4$  и  $\theta^2 < 0.04$ . Значимость полученного превышения гамма-излучения от Крабовидной туманности достигает  $\sim 12\sigma$ . Построенный по данным наблюдений с помощью установки TAIGA-IACT в стереорежиме за 234 h в период 2020–2023 гг. энергетический спектр гамма-излучения Крабовидной туманности приведен на рис. 3 [10].

Спектр включает 5 гамма-подобных событий с энергией выше 100 TeV. Две точки с энергиями ниже 10 TeV получены в сезоне 2022–2023 гг., когда телескопы были модернизированы и чувствительность установки TAIGA-IACT возросла.

## 3. TAIGA-100 — гибридная установка для мультиПэВной гамма-астрономии

Проект будущего комплекса TAIGA-100 с гибридной системой детекторов на площади порядка 100 km<sup>2</sup> оптимизирован для изучения потоков космических лучей и гамма-квантов в диапазоне энергий от долей PeV до

десятков EeV. Базовыми элементами комплекса будут широкоугольные черенковские станции с углом обзора  $\sim 1\text{sr}$  и водные черенковские детекторы мюонов с площадью около  $40\text{m}^2$  каждый. Энергетический порог системы этих детекторов составит около  $300\text{TeV}$ . Ожидаемая статистика гамма-квантов с энергией выше  $0.5\text{PeV}$  при наблюдении локальных источников такой установкой будет в 1–5 раз выше, чем у LHAASO, в частности, она позволит регистрировать больше 100 гамма-квантов с энергией выше  $500\text{TeV}$  за 100 h наблюдений. Для решения задач гамма-астрономии более низких энергий и поиска гамма-квантов sub-TeV энергии от гамма-всплесков в состав комплекса войдет порядка 10 АЧТ с зеркалами диаметром 4 m как в установке TAIGA-1 и 2 АЧТ с зеркалами диаметром около 10 m. Для исследования космических лучей высоких энергий в состав комплекса будут включены сцинтилляционные детекторы, два телескопа флуоресцентного излучения и радиоантенны.

Для отработки всех методических и технических вопросов и демонстрации эффективности комплекса TAIGA-100 для решения задач гамма-астрономии сверх-высоких энергий и физики космических лучей планируется создать к 2029 действующий прототип площадью  $0.5\text{km}^2$  на площадке комплекса TAIGA-1 в Тункинской долине. По результатам предварительных исследований наиболее перспективной площадкой по совокупности природных и инфраструктурных факторов для создания полномасштабного комплекса TAIGA-100 является Боргойская степь в республике Бурятия (около 200 km на юг от г. Улан-Удэ).

## Финансирование работы

Работа выполнена на УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“ Поддержана Российским научным фондом: грант 23-72-016 (раздел „Исследования потоков первичных космических лучей“, грант 23-72-00019 (раздел „Энергетический спектр гамма-излучения Крабовидной туманности“) и Минобрнауки России (FZZE-2023-0004, FZZE-2024-0005).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Zh. Cao, F. Aharonian, Q. An, Axikegu, Y.X. Bai, Y.W. Bao, D. Bastieri, X.J. Bi, Y.J. Bi, J.T. Cai, Q. Cao, W.Y. Cao, Zh. Cao, J. Chang, J.F. Chang, A.M. Chen, E.S. Chen, Liang Chen, Lin Chen, Long Chen, M.J. Chen, M.L. Chen, Q.H. Chen, S.H. Chen, S.Z. Chen, T.L. Chen, Y. Chen, N. Cheng, Y.D. Cheng, M.Y. Cui, S.W. Cui, X.H. Cui, Y.D. Cui, B.Z. Dai, H.L. Dai, Z.G. Dai, Danzengluobu, D. della Volpe, X.Q. Dong, K.K. Duan, J.H. Fan, Y.Z. Fan, J. Fang, K. Fang, C.F. Feng, L. Feng, S.H. Feng, X.T. Feng, Y.L. Feng, S. Gabici, B. Gao, C.D. Gao, L.Q. Gao, Q. Gao, W. Gao,

W.K. Gao, M.M. Ge, L.S. Geng, G. Giacinti, G.H. Gong, Q.B. Gou, M.H. Gu, F.L. Guo, X.L. Guo, Y.Q. Guo, Y.Y. Guo, Y.A. Han, H.H. He, H. N. He, J. Y. He, X. B. He, Y. He, M. Heller, Y.K. Hor, B.W. Hou, C. Hou, X. Hou, H.B. Hu, Q. Hu, S.C. Hu, D.H. Huang, T.Q. Huang, W.J. Huang, X.T. Huang, X.Y. Huang, Y. Huang, Z.C. Huang, X.L. Ji, H.Y. Jia, K. Jia, K. Jiang, X.W. Jiang, Z.J. Jiang, M. Jin, M.M. Kang, T. Ke, D. Kuleshov, K. Kurinov, B.B. Li, Ch. Li, C. Li, D. Li, F. Li, H.B. Li, H.C. Li, H.Y. Li, J. Li, Ji. Li, Jie Li, K. Li, W.L. Li, W.L. Li, X.R. Li, Xin Li, Y.Z. Li, Zhe Li, Zhuo Li, E.W. Liang, Y.F. Liang, S.J. Lin, B. Liu, C. Liu, D. Liu, H. Liu, H.D. Liu, J. Liu, J.L. Liu, J.Y. Liu, M.Y. Liu, R.Y. Liu, S.M. Liu, W. Liu, Y. Liu, Y.N. Liu, R. Lu, Q. Luo, H.K. Lv, B.Q. Ma, L.L. Ma, X.H. Ma, J.R. Mao, Z. Min, W. Mitthumsiri, H.J. Mu, Y.C. Nan, A. Neronov, Z.W. Ou, B.Y. Pang, P. Pattarakijwanich, Z.Y. Pei, M.Y. Qi, Y.Q. Qi, B.Q. Qiao, J.J. Qin, D. Ruffolo, A. Sáiz, D. Semikoz, C.Y. Shao, L. Shao, O. Shchegolev, X.D. Sheng, F.W. Shu, H.C. Song, Yu.V. Stenkin, V. Stepanov, Y. Su, Q.N. Sun, X. N. Sun, Z.B. Sun, P.H.T. Tam, Q.W. Tang, Z.B. Tang, W.W. Tian, C. Wang, C.B. Wang, G.W. Wang, H.G. Wang, H.H. Wang, J.C. Wang, K. Wang, L.P. Wang, L.Y. Wang, P.H. Wang, R. Wang, W. Wang, X.G. Wang, X.Y. Wang, Y. Wang, Y.D. Wang, Y.J. Wang, Z.H. Wang, Z.X. Wang, Zhen Wang, Zheng Wang, D.M. Wei, J.J. Wei, Y.J. Wei, T. Wen, C.Y. Wu, H.R. Wu, S. Wu, X. F. Wu, Y.S. Wu, S.Q. Xi, J. Xia, J.J. Xia, G.M. Xiang, D.X. Xiao, G. Xiao, G.G. Xin, Y.L. Xin, Y. Xing, Z. Xiong, D.L. Xu, R.F. Xu, R.X. Xu, W.L. Xu, L. Xue, D.H. Yan, J.Z. Yan, T. Yan, C.W. Yang, F. Yang, F.F. Yang, H.W. Yang, J.Y. Yang, L.L. Yang, M.J. Yang, R.Z. Yang, S.B. Yang, Y.H. Yao, Z.G. Yao, Y.M. Ye, L.Q. Yin, N. Yin, X.H. You, Z.Y. You, Y.H. Yu, Q. Yuan, H. Yue, H.D. Zeng, T.X. Zeng, W. Zeng, M. Zha, B.B. Zhang, F. Zhang, H.M. Zhang, H.Y. Zhang, J.L. Zhang, L.X. Zhang, Li Zhang, P. F. Zhang, P. P. Zhang, R. Zhang, S. B. Zhang, S. R. Zhang, S. S. Zhang, X. Zhang, X.P. Zhang, Y. F. Zhang, Yi Zhang, Yong Zhang, B. Zhao, J. Zhao, L. Zhao, L.Z. Zhao, S.P. Zhao, F. Zheng, B. Zhou, H. Zhou, J.N. Zhou, M. Zhou, P. Zhou, R. Zhou, X.X. Zhou, C.G. Zhu, F.R. Zhu, H. Zhu, K. J. Zhu, X. Zuo, The LHAASO Collaboration. *Astrophys. J. Supplement Series*, **271** (1), 25 (2024). DOI: 10.3847/1538-4365/acfd29

- [2] N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonvec, 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. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, D. Kostunin, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, Yu. Lemeshev, B. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, 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. *JINST*, **15** (9), C09031 (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/C09031

- [3] 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. Lubsandorzhiev, N.B. Lubsandorzhiev, 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.V. Zagorodnikov. *Astroparticle Phys.*, **117** 102406, (2020). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2019.102406
- [4] W. Bian, A.V. Bukevich, Q. Cao, W.Y. Cao, Zhe Cao, J. Chang, J.F. Chang, A.M. Chen, E.S. Chen, H.X. Chen, Liang Chen, Lin Chen, Long Chen, M.J. Chen, M.L. Chen, Q.H. Chen, S. Chen, S.H. Chen, S.Z. Chen, T.L. Chen, Y. Chen, N. Cheng, Y.D. Cheng, M.Y. Cui, S.W. Cui, X.H. Cui, Y.D. Cui, B.Z. Dai, H.L. Dai, Z.G. Dai, Danzengluobu, X.Q. Dong, K.K. Duan, J.H. Fan, Y.Z. Fan, J. Fang, J.H. Fang, K. Fang, C.F. Feng, H. Feng, L. Feng, S.H. Feng, X.T. Feng, Y. Feng, Y.L. Feng, S. Gabici, B. Gao, C.D. Gao, Q. Gao, W. Gao, W.K. Gao, M.M. Ge, L.S. Geng, G. Giacinti, G.H. Gong, Q.B. Gou, M.H. Gu, F.L. Guo, X.L. Guo, Y.Q. Guo, Y.Y. Guo, Y.A. Han, M. Hasan, H.H. He, H.N. He, J.Y. He, Y. He, Y.K. Hor, B.W. Hou, C. Hou, X. Hou, H.B. Hu, Q. Hu, S.C. Hu, D.H. Huang, T.Q. Huang, W.J. Huang, X.T. Huang, X.Y. Huang, Y. Huang, X.L. Ji, H.Y. Jia, K. Jia, K. Jiang, X.W. Jiang, Z.J. Jiang, M. Jin, M.M. Kang, I. Karpikov, D. Kuleshov, K. Kurinov, B.B. Li, C.M. Li, Cheng Li, Cong Li, D. Li, F. Li, H.B. Li, H.C. Li, Jian Li, Jie Li, K. Li, S.D. Li, W.L. Li, W.L. Li, X.R. Li, Xin Li, Y.Z. Li, Zhe Li, Zhuo Li, E.W. Liang, Y.F. Liang, S.J. Lin, B. Liu, C. Liu, D. Liu, D.B. Liu, H. Liu, H.D. Liu, J. Liu, J.L. Liu, M.Y. Liu, R.Y. Liu, S.M. Liu, W. Liu, Y. Liu, Y.N. Liu, Q. Luo, Y. Luo, H.K. Lv, B.Q. Ma, L.L. Ma, X.H. Ma, J.R. Mao, Z. Min, W. Mitthumsiri, H.J. Mu, Y.C. Nan, A. Neronov, L.J. Ou, P. Pattarakijwanich, Z.Y. Pei, J.C. Qi, M.Y. Qi, B.Q. Qiao, J.J. Qin, A. Raza, D. Ruffolo, A. Sáiz, M. Saeed, D. Semikoz, L. Shao, O. Shchegolev, X.D. Sheng, F.W. Shu, H.C. Song, Yu.V. Stenkin, V. Stepanov, Y. Su, D.X. Sun, Q.N. Sun, X.N. Sun, Z.B. Sun, J. Takata, P.H.T. Tam, Q.W. Tang, R. Tang, Z.B. Tang, W.W. Tian, C. Wang, C.B. Wang, G.W. Wang, H.G. Wang, H.H. Wang, J.C. Wang, Kai Wang, Kai Wang, L.P. Wang, L.Y. Wang, P.H. Wang, R. Wang, W. Wang, X.G. Wang, X.Y. Wang, Y. Wang, Y.D. Wang, Y.J. Wang, Z.H. Wang, Z.X. Wang, Zhen Wang, Zheng Wang, D.M. Wei, J.J. Wei, Y.J. Wei, T. Wen, C.Y. Wu, H.R. Wu, Q.W. Wu, S. Wu, X.F. Wu, Y.S. Wu, S.Q. Xi, J. Xia, G.M. Xiang, D.X. Xiao, G. Xiao, Y.L. Xin, Y. Xing, D.R. Xiong, Z. Xiong, D.L. Xu, R.F. Xu, R.X. Xu, W.L. Xu, L. Xue, D.H. Yan, J.Z. Yan, T. Yan, C.W. Yang, C.Y. Yang, F. Yang, F.F. Yang, L.L. Yang, M.J. Yang, R.Z. Yang, W.X. Yang, Y.H. Yao, Z.G. Yao, L.Q. Yin, N. Yin, X.H. You, Z.Y. You, Y.H. Yu, Q. Yuan, H. Yue, H.D. Zeng, T.X. Zeng, W. Zeng, M. Zha, B.B. Zhang, F. Zhang, H. Zhang, H.M. Zhang, H.Y. Zhang, J.L. Zhang, Li Zhang, P.F. Zhang, P.P. Zhang, R. Zhang, S.B. Zhang, S.R. Zhang, S.S. Zhang, X. Zhang, X.P. Zhang, Y.F. Zhang, Yi Zhang, Yong Zhang, B. Zhao, J. Zhao, L. Zhao, L.Z. Zhao, S.P. Zhao, X.H. Zhao, F. Zheng, W.J. Zhong, B. Zhou, H. Zhou, J.N. Zhou, M. Zhou, P. Zhou, R. Zhou, X.X. Zhou, X.X. Zhou, B.Y. Zhu, C.G. Zhu, F.R. Zhu, H. Zhu, K.J. Zhu, Y.C. Zou, X. Zuo. *Phys. Rev. Lett.*, **132**, 131002 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.131002
- [5] A. Yushkov, A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta, I.F.M. Albuquerque, J.M. Albury, I. Allekotte, A. Almela, J. Alvarez Castillo, J. Alvarez-Muñiz, G.A. Anastasi, L. Anchordoqui, B. Andrada, S. Andringa, C. Aramo, H. Asorey, P. Assis, G. Avila, A.M. Badescu, A. Bakalova, A. Balaceanu, F. Barbato, R.J. Barreira Luz, S. Baur, K.H. Becker, J.A. Bellido, C. Berat, M.E. Bertaina, X. Bertou, P.L. Biermann, T. Bister, J. Biteau, A. Blanco, J. Blazek, C. Bleve, M. Boháčová, D. Boncioli, C. Bonifazi, N. Borodai, A.M. Botti, J. Brack, T. Bretz, F.L. Bricchle, P. Buchholz, A. Bueno, S. Buitink, M. Buscemi, K.S. Caballero-Mora, L. Caccianiga, L. Calcagni, A. Cancio, F. Canfora, I. Caracas, J.M. Carceller, R. Caruso, A. Castellina, F. Catalani, G. Cataldi, L. Cazon, M. Cerda, J.A. Chinellato, K. Choi, J. Chudoba, L. Chytka, R.W. Clay, A.C. Cobos Cerutti, R. Colalillo, A. Coleman, M.R. Coluccia, R. Conceição, A. Condoirelli, G. Consolati, F. Contreras, F. Conventa, M.J. Cooper, S. Coutu, C.E. Covault, B. Daniel, S. Dasso, K. Daumiller, B.R. Dawson, J.A. Day, R.M. de Almeida, S.J. de Jong, G. De Mauro, J.R.T. de Mello Neto, I. De Mitri, J. de Oliveira, V. de Souza, J. Debatin, M. del Río, O. Deligny, N. Dhital, A. Di Matteo, M.L. Díaz Castro, C. Dobrigkeit, J.C. D'Olivo, Q. Dorosti, R.C. dos Anjos, M.T. Dova, A. Dundovic, J. Ebr, R. Engel, M. Erdmann, C.O. Escobar, A. Etchegoyen, H. Falcke, J. Farmer, G. Farrar, A.C. Fauth, N. Fazzini, F. Feldbusch, F. Fenu, L.P. Ferreyro, J.M. Figueira, A. Filipčič, M.M. Freire, T. Fujii, A. Fuster, B. García, H. Gemmeke, F. Gesualdi, A. Gherghel-Lascu, P.L. Ghia, U. Giaccari, M. Giammarchi, M. Giller, D. Glas, J. Glombitza, F. Gobbi, G. Golup, M. Gó mez Berisso, P.F. Gó mez Vitale, J.P. Gongora, N. González, I. Goos, D. Gó ra, A. Gorgi, M. Gottowik, T.D. Grubb, F. Guarino, G.P. Guedes, E. Guido, S. Hahn, R. Halliday, M.R. Hampe, P. Hansen, D. Harari, T.A. Harrison, V.M. Harvey, A. Haungs, T. Hebbeker, D. Heck, G.C. Hill, C. Hojvat, E.M. Holt, J.R. Hörandel, P. Horvath, M. Hrabovský, T. Huege, J. Hulsman, A. Insolia, P.G. Isar, J.A. Johnsen, J. Jurysek, A. Kää pä, K.H. Kampert, B. Keilhauer, N. Kemmerich, J. Kemp, H.O. Klages, M. Kleifges, J. Kleinfeller, G. Kuček Mezek, A. Kuotb Awad, B.L. Lago, D. LaHurd, R.G. Lang, R. Legumina, M.A. Leigui de Oliveira, V. Lenok, A. Letessier-Selvon, I. Lhenry-Yvon, O.C. Lippmann, D. Lo Presti, L. Lopes, R. López, A. López Casado, R. Lorek, Q. Luce, A. Lucero, M. Malacari, G. Mancarella, D. Mandat, B.C. Manning, J. Manshanden, P. Mantsch, A.G. Mariazzi, I.C. Mariş, G. Marsella, D. Martello, H. Martinez, O. Martínez Bravo, M. Mastrodicasa, H.J. Mathes, S. Mathys, J. Matthews, G. Matthiae, E. Mayotte, P.O. Mazurc, G. Medina-Tanco, D. Melo, A. Menshikov, K.-D. Merenda, S. Michal, M.I. Micheletti, L. Miramonti, D. Mockler, S. Mollerach, F. Montanet, C. Morello, G. Morlino, M. Mostafá, A.L. Müller, M.A. Muller, S. Müller, R. Mussa, W.M. Namasaka, L. Nellen, M. Niculescu-Oglinazu, M. Niechciol, D. Nitz, D. Nosek, V. Novotny, L. Nožka, A. Nucita, L.A. Núñez, A. Olinto, M. Palatka, J. Pallotta, M.P. Panetta, P. Papenbreer, G. Parente, A. Parra, M. Pech, F. Pedreira, J. Pekala, R. Pelayo, J. Peña-Rodriguez, L.A.S. Pereira, M. Perlin, L. Perrone, C. Peters, S. Petrera, J. Phuntsok, T. Pierog, M. Pimenta, V. Pirronello, M. Platino, J. Poh, B. Pont, M. Pothast, R.R. Prado, P. Privitera, M. Prouza, A. Puyleart, S. Querschfeld, R. Ramos-Pollan, J. Rautenberg, D. Ravignani, M. Reininghaus, J. Ridky, F. Riehn, M. Risse, P. Ristori, V. Rizi, W. Rodrigues de Carvalho, J. Rodriguez Rojo, M.J. Roncoroni, M. Roth, E. Roulet, A.C. Rovero, P. Ruehl, S.J. Saffi, A. Saftoiu, F. Salamida, H. Salazar, G. Salina, J.D. Sanabria Gomez, F. Sánchez, E.M. Santos, E. Santos, F. Sarazin, R. Sarmento,

- C. Sarmiento-Cano, R. Sato, P. Savina, M. Schauer, V. Scherini, H. Schieler, M. Schimassek, M. Schimp, F. Schlüter, D. Schmidt, O. Scholten, P. Schovánek, F.G. Schröder, S. Schröder, J. Schumacher, S.J. Sciutto, M. Scornavacche, R.C. Shellard, G. Sigl, G. Silli, O. Sima, R. Šmida, G.R. Snow, P. Sommers, J.F. Soriano, J. Souchard, R. Squartini, M. Stadelmaier, D. Stanca, S. Stanič, J. Stasielak, P. Stassi, M. Stolpovskiy, A. Streich, M. Suárez-Durán, T. Sudholz, T. Suomijä rvi, A.D. Supanitsky, J. Šupík, Z. Szadkowski, A. Taboada, O.A. Taborda, A. Tapia, C. Timmermans, P. Tobiska, C.J. Todero Peixoto, B. Tomé, G. Torralba Elipse, A. Travaini, P. Travnicek, M. Trini, M. Tueros, R. Ulrich, M. Unger, M. Urban, J.F. Valdés Galicia, I. Valiño, L. Valore, A.M. van den Berg, A. van Vliet, E. Varela, B. Vargas Cárdenas, A. Vásquez-Ramírez, D. Veberič, C. Ventura, I.D. Vergara Quispe, V. Verzi, J. Vicha, L. Villaseñor, J. Vink, S. Vorobiov, H. Wahlberg, A.A. Watson, M. Weber, A. Weindl, M. Wiedeń ski, L. Wiencke, H. Wilczyński, T. Winchen, M. Wirtz, D. Wittkowski, B. Wundheiler, L. Yang, A. Yushkov, E. Zas, D. Zavrtanik, M. Zavrtanik, L. Zehrer, A. Zepeda, B. Zimmermann, M. Ziolkowski, F. Zuccarello. *Proc. 36th ICRC PoS*, 482, (2019). <https://pos.sissa.it/358/482/pdf>
- [6] 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, 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. Zundel. *Telescope Array Collaboration. Astrophys. J.*, **858**, 76 (2018). DOI: 10.3847/1538-4357/aabad7
- [7] S. Ostapchenko. *Phys. Rev. D*, **83** (1), 1401 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevD.83.01401
- [8] L. Sveshnikova, I. Astapov, P. Bezzyazkov, A. Blinov, E. Bonvech, A. Borodin, N. Budnev, A. Bulan, A. Vaidyanathan, N. Volkov, P. Volchugov, D. Voronin, A. Garmash, A. Gafarov, V. Grebenyuk, E. Gress, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A. Dyachok, D. Zhurov, A. Zagorodnikov, A.L. Ivanova, M. Ilyushin, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryukhin, V. Kozhin, R. Kokoulin, N. Kolosov, K. Kompaniets, E. Korosteleva, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Chiavassa, M. Lavrova, A. Lagutin, Yu. Lemeshev, B. Lubsandorzhiiev, N. Lubsandorzhiiev, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Okuneva, E. Osipova, A. Pan, A. Panov, L. Pankov, A. Pakhorukov, A. Petruchin, D. Podgrudkov, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, A. Razumov, R. Raikin, G. Rubtsov, E. Ryabov, V. Samoliga, I. Satyshev, A. Sidorenkov, A. Silaev, A. Silaev Jr., A. Skurikhin, A. Sokolov, V. Tabolenko, A. Tanaev, M. Ternovoy, L. Tkachev, N. Ushakov, D. Chernov, D. Shipilov, I. Yashin. *Phys. Atomic Nuclei*, **86** (9), 1 (2023). DOI: 10.1134/S1063778823090247
- [9] P.A. Volchugov, I.I. Astapov, P.A. Bezzyazkov, E.A. Bonvech, A.N. Borodin, N.M. Budnev, A.V. Bulan, A. Vaidyanatan, N.V. Volkov, D.M. Voronin, A.R. Gafarov, E.O. Gres', O.A. Gres', T.I. Gres', O.G. Grishin, A.Yu. Garmash, V.M. Grebenyuk, A.A. Grinyuk, A.N. Dyachok, D.P. Zhurov, A.V. Zagorodnikov, A.D. Ivanova, A.L. Ivanova, M.A. Ilyushin, N.N. Kalmykov, V.V. Kindin, S.N. Kiryukhin, R.P. Kokoulin, N.I. Kolosov, K.G. Kompaniets, E.E. Korosteleva, V.A. Kozhin, E.A. Kravchenko, A.P. Kryukov, L.A. Kuz'michev, A.K'yavassa, A.A. Lagutin, M.V. Lavrova, Yu.E. Lemeshev, B.K. Lubsandorzhiiev, N.B. Lubsandorzhiiev, S.D. Malakhov, R.R. Mirgazov, R.D. Monkhoev, E.A. Okuneva, E.A. Osipova, A.D. Panov, A.L. Pakhorukov, A. Pan, L.V. Pan'kov, A.A. Petruchin, D.A. Podgrudkov, E.G. Popova, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, A.Yu. Razumov, R.I. Raikin, G.I. Rubtsov, E.V. Ryabov, V.S. Samoliga, I. Satyshev, L.G. Sveshnikova, A.A. Silaev, A. A. Silaev (Jr.), A.Yu. Sidorenkov, A.V. Skurikhin, A.V. Sokolov, V. A. Tabolenko, A.B. Tanaev, M.Yu. Ternovoi, L.G. Tkachev, N.A. Ushakov, D.V. Chernov, I.I. Yashin. *Instruments and Experimental Techniques*, **67**, 143 (2024). DOI: 10.1134/S0020441224700106
- [10] П.А. Волчугов, Е.А. Бонвеч, А.В. Булан, Н.Н. Калмыков, Е.Е. Коростелева, В.А. Кожин, А.П. Крюков, Л.А. Кузьмичев, Н.Б. Лубсандоржиев, Э.А. Окунева, Э.А. Осипова, А.Д. Панов, Д.А. Подгрудков, Е.Г. Попова, Е.Б. Постников, В.В. Просин, А.Ю. Разумов, Л.Г. Свешникова, А.А. Силаев, А.А. Силаев (мл.), А.В. Скурихин, Д.В. Чернов, И.И. Астапов, В.В. Киндин, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, И.И. Яшин, П.А. Безъязыков, Н.М. Буднев, А.Р. Гафаров, О.А. Грес', Т.И. Грес', Е.О. Грес', О.Г. Гришин, А.Н. Дячок, Д.П. Журов, А.В. Загородников, А.Л. Иванова, А.Д. Иванова, М.А. Илюшин, С.Н. Кирюхин, Н.И. Колосов, Ю.Е. Лемешев, С.Д. Малахов, Р.Р. Миргазов, Р.Д. Монхоев, Л.В. Паньков, А.Л. Пахорук, И.А. Поддубный, А.А. Пушкин, Е.В. Рябов, В.С. Самолига, В.А. Таболенко, А.Б. Танаев, М.Ю. Терновой, А.В. Блинов, А.Н. Бородин, В.М. Гребенюк, А.А. Гринюк, М.В. Лаврова, А. Пан, И. Сатышев, А.В. Шайковский, Д.М. Воронин, Б.К. Лубсандоржиев, А.Д. Луканов, Г.И. Рубцов, А.Ю. Сидоренков, Н.А. Ушаков, А.Ю. Гармаш, Е.А. Кравченко, А.В. Соколов, Л.Г. Ткачев, В.Н. Зиракашвили, А. Кьявасса. *ЭЧАЯ*, **56**, 1062 (2025).