

Моделирование сцинтилляционных экспериментов астрофизического комплекса TAIGA в программном пакете Geant4

© М.А. Илюшин,² И.И. Астапов,³ П.А. Безъязыков,² Е.А. Бонвеч,⁴ А. Блинов,⁵ А.Н. Бородин,⁵ Н.М. Буднев,² А.В. Булан,⁴ П.В. Бусыгин,² П.В. Волков,⁶ П.А. Волчугов,^{2,4} 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 В.А. Ерофеева,² Д.П. Журов,² А.В. Загородников,² В. Зиракашвили,¹⁰ А.Д. Иванова,^{2,11} А.Л. Иванова,¹² И.А. Кабанник,¹ Н.Н. Калмыков,⁴ В.В. Киндин,³ С.Н. Кирюхин,² В.А. Кожин,⁴ Р.П. Кокоулин,³ К.Г. Компаниец,³ Е.Е. Коростелева,⁴ Е.А. Кравченко,^{1,8} А.П. Крюков,⁴ Л.А. Кузьмичев,⁴ А. Кьявасса,¹² М.В. Лаврова,⁵ А.А. Лагутин,⁶ Ю.Е. Лемешев,² Б.К. Лубсандоржиев,⁷ Н.Б. Лубсандоржиев,^{2,4} А. Луканов,⁷ С.Д. Малахов,² Р.Р. Миргазов,² Р.Д. Монхоев,^{1,2} Э.А. Окунева,^{2,4} 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 И. Поддубный,² Е.Г. Попова,⁴ Е.Б. Постников,⁴ В.В. Просин,⁴ А.А. Пушкин,² Р.И. Райкин,⁶ А.В. Разумов,^{2,4} Г.И. Рубцов,⁷ Е.В. Рябов,² А.К. Сагдеева,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 А. Шайковский,⁵ И.И. Яшин³

¹ Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

² Иркутский государственный университет,
664003 Иркутск, 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,
119991 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,
Turin, Italy
e-mail: mikhail.ilushin@yandex.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 11 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Представлена компьютерная модель сцинтилляционных установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon, нацеленных на исследования в области физики космических лучей и гаммаастрономии. Проведено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных.

Ключевые слова: космические лучи, широкий атмосферный ливень, сцинтилляционный счетчик, установка TAIGA-Muon, установка Tunka-Grande, экспериментальный комплекс TAIGA, Geant4.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59260.391-24

Введение

Расположенный в Тункинской долине (Республика Бурятия, Россия) гибридный астрофизический комплекс

TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) предназначен для детального изучения первичного космического излучения (ПКИ) в диапазоне энергий $\sim 0.01\text{--}1000\text{ PeV}$ [1]. В состав

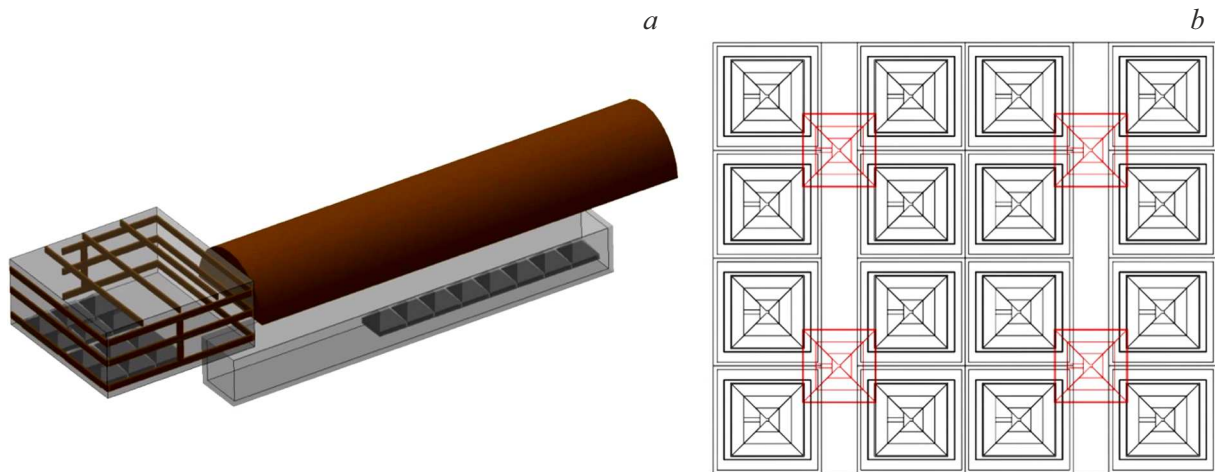


Рис. 1. Геометрия станции установки Tunka-Grande (a) и вид сверху на станцию установки TAIGA-Muon (b) в Geant4.

комплекса входят: широкоугольные черенковские установки Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer), атмосферные черенковские телескопы TAIGA-IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes) и сцинтилляционные установки Tunka-Grande и TAIGA-Muon.

В настоящей работе представлены результаты Монте-Карло (МК) моделирования установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon при помощи программного пакета Geant4 [2]. Данный пакет разработан в CERN и широко применяется во многих экспериментах для моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество.

1. Экспериментальные установки

Установка Tunka-Grande [3] работает с 2016 г. с целью исследования энергетического спектра и массового состава заряженной компоненты ПКИ, а также поиска диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10–1000 PeV. Установка представляет собой 19 станций, размещенных на площади $\sim 0.5 \text{ km}^2$. В каждой станции есть наземная и подземная части. Первая часть состоит из 12 детекторов общей площадью 7.68 m^2 для регистрации всех заряженных частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ). Вторая часть предназначена для выделения мюонной компоненты ШАЛ и состоит из 8 аналогичных счетчиков общей площадью 5.12 m^2 , расположенных под слоем грунта 1.5 м. В МК модели установки подробно описана геометрия и химический состав элементов станций. На основе измерений [4] для счетчиков дополнительно введена функция неоднородности их светосбора. Визуализация одной из станций представлена на рис. 1, a.

В 2019 г. в рамках развития астрофизического комплекса TAIGA в дополнение к установке Tunka-Grande начато развертывание сцинтилляционной уста-

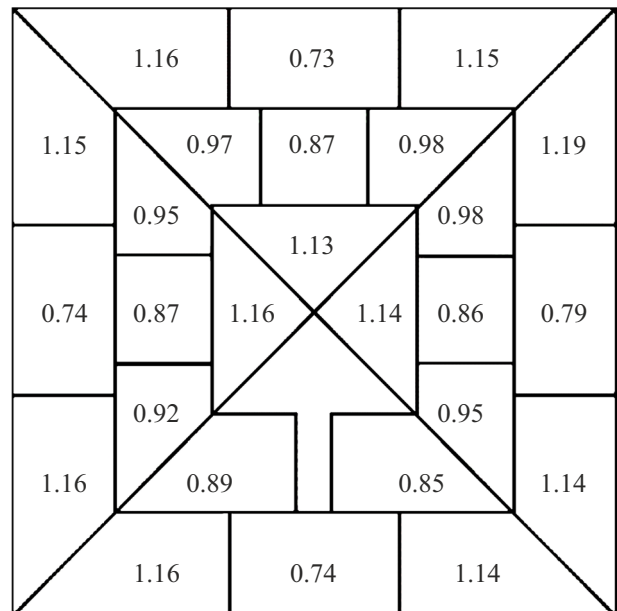


Рис. 2. Неоднородность светосбора счетчика TAIGA-Muon

новки TAIGA-Muon [5]. Первая очередь строительства включает в себя детекторы общей площадью $\sim 200 \text{ m}^2$. Создание новой сцинтилляционной установки с одной стороны увеличит эффективность исследования ПКИ в диапазоне значений энергии 10–1000 PeV, с другой стороны — понизит энергетический порог регистрации первичных частиц до $\sim 1 \text{ PeV}$. Станция установки TAIGA-Muon [6] представляет собой 16 подземных (черного цвета на рис. 1, b) и 4 наземных (красного цвета на рис. 1, b) сцинтилляционных счетчиков площадью 0.96 m^2 каждый [7]. В настоящий момент полностью развернута одна станция, и еще четыре имеют только наземную часть. В МК модели счетчиков, как и в случае установки Tunka-Grande, учтена их средняя неоднород-

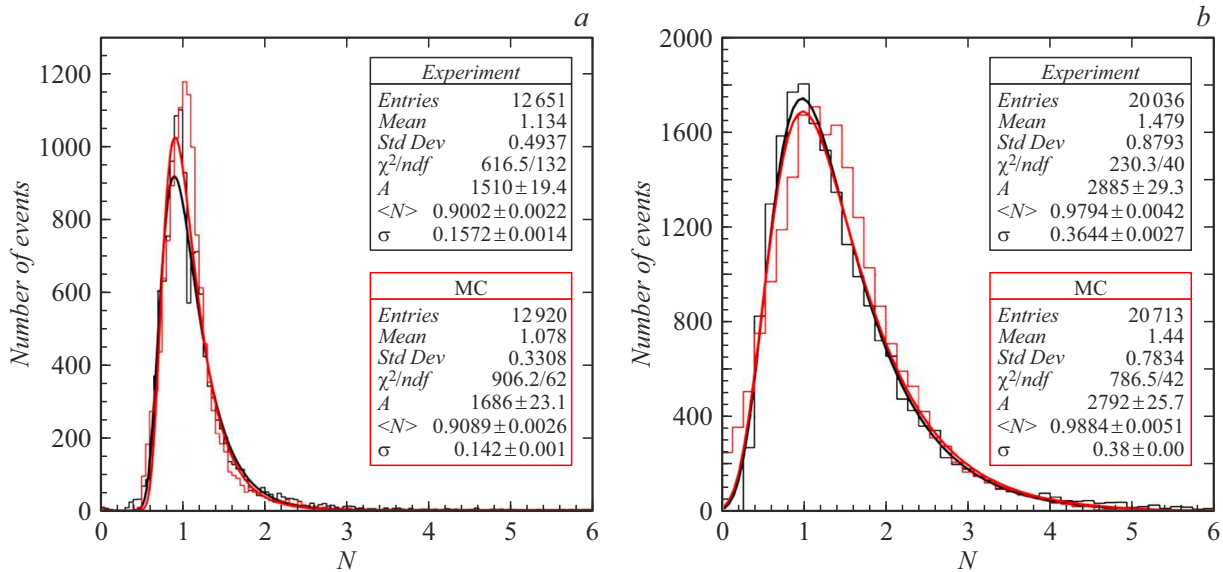


Рис. 3. Дифференциальные амплитудные распределения со сцинтилляционных счетчиков установок Tunka-Grande (a) и TAIGA-Muon (b) в сравнение со спектром энерговыделения в МК.

ность светосбора, полученная по данным лабораторных исследований. В этих измерениях эффективная площадь детектора была разделена на сектора, для каждого из которых определен отклик в виде числового коэффициента при прохождении вертикальных атмосферных мюонов (рис. 2).

2. Сравнение экспериментальных и моделированных данных

Сравнение экспериментальных и моделированных данных было проведено путем сопоставления откликов детекторов на прохождение через них вертикальных атмосферных мюонов. Для этой цели два счетчика Tunka-Grande были разнесены вертикально друг относительно друга на расстояние 5 m и включены в схему совпадений с временным окном 100 ns. В результате получены дифференциальные амплитудные распределения сигналов. Для сравнения с МК они нормируются на наиболее вероятное значение амплитуды. Аналогичный эксперимент был проделан с двумя счетчиками установки TAIGA-Muon на расстоянии 3.5 m друг от друга.

В методе МК моделируются вертикально направленные вниз мюоны с энергией 1 GeV в 2 m от детектора равномерно на всю его площадь. Спектр энерговыделения также нормируется на наиболее вероятное значение (рис. 3). Гистограммы аппроксимированы функцией Мюла:

$$f_M(N) = A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{N - \langle N \rangle}{\sigma} \right)^2 + \exp \left(-\frac{N - \langle N \rangle}{\sigma} \right) \right], \quad (1)$$

где A, σ — масштабные параметры, $\langle N \rangle$ — наиболее вероятное значение измеряемой величины.

На приведенном рис. 3, a видно, что созданная модель счетчика установки Tunka-Grande достаточно хорошо согласуется с экспериментом. Для установки TAIGA-Muon из-за сложной конструкции детектора учета его неоднородности светосбора оказалось недостаточно для правдоподобного МК. В связи с этим в каждой точке отклика счетчика значения энерговыделения дополнительно разбросаны согласно распределению Гаусса со среднеквадратическим отклонением 0.5 (рис. 3, b).

Заключение

Созданы модели установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon при помощи программного пакета Geant4. Сравнение экспериментальных и моделированных данных показало состоятельность моделей, что позволяет их в дальнейшем использовать для повышения точности измерений параметров ШАЛ и ПКИ в диапазоне энергий 1–1000 PeV, а также для разработки методики идентификации первичных частиц.

Финансирование работы

Работа выполнена на базе УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“. Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 23-72-00016, раздел 2) и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2024-0005, FZZE-2023-0004, FSUS-2022-0015).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, 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.E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A.P. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N.B. Lubsandorzhev, A. Lukanov, D. Lukyantsev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Okuneva, E.A. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, L. Panasenko, L. Pankov, A.D. Panov, A. Petrukhin, I. Poddubny, D. Podgrudkov, V. Poleschuk, V. Ponomareva, E.G. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, A.A. Silaev, A.A. Silaev, A. Sidorenkov, A. Skurikhin, A. Sokolov, L.G. 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. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **1039**, 167047 (2022).
- [2] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytracsek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell'Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J.J. Gómez Cadenas, I. González, G. GraciaAbril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F.W. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabat, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E. Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebvre, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. MoradeFreitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O'Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M.G. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. DiSalvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulikimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai, Tehrani, M. Trpeano, P. Truscott, H. Uno, L. Uban, P. Uban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J.P. Wellisch, T. Wenaus, D.C. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, D. Zschesche. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **506**, 250 (2003). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [3] И.И. Яшин, А.А. Пушкин, В.С. Птускин, В.В. Просин, Е.Б. Постников, Е.Г. Попова, Д.А. Подгрудков, А.А. Петрухин, Л.В. Паньков, А.Д. Панов, А. Пан, А.Л. Пахоруков, Э.А. Осипова, Э.А. Окунева, Р.Р. Миргазов, С.Д. Малахов, Н.Б. Лубсандоржиев, Б.К. Лубсандоржиев, А.Ю. Разумов, Р.И. Райкин, Д.В. Чернов, Н.А. Ушаков, Л.Г. Ткачев, М.Ю. Терновой, Б.А. Таращанский, А.Б. Танаев, В.А. Таболенко, Л.Г. Свешникова, А.В. Соколов, А.В. Скурихин, А.Ю. Сидоренков, А.А. Силаев, А.А. Силаев, И. Сатышев, В.С. Самолига, Е.В. Рябов, Г.И. Рубцов, Ю.Е. Лемешев, М.В. Лаврова, А.А. Лагутин, А.А. Гринюк, Т.И. Гресь, О.А. Гресь, Е.О. Гресь, В.М. Гребенюк, А.Ю. Гармаш, А.Р. Гафаров, Д.М. Воронин, П.А. Волчугов, Н.В. Волков, А. Вайдянатан, А.В. Булан, Н.М. Буднев, А.Н. Бородин, Е.А. Бонвеч, П.А. Безьязыков, И.И. Астапов, О.Г. Гришин, А.Н. Дячок, А. Кьявасса, Л.А. Кузьмичев, А.П. Крюков, Е.А. Кравченко, В.А. Кожин, Е.Е. Коростелева, К.Г. Компаниец, Н.И. Колосов, Р.П. Кокоулин, С.Н. Кириухин, В.В. Киндин, Н.Н. Калмыков, М.А. Илюшин, А.Л. Иванова, А.Д. Иванова, А.В. Загородников, Д.П. Журов, Р.Д. Монхоев. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **87** (7), 954 (2023). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367676523701673>
- [4] О.И. Лики, Н.В. Ампилгов, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, Н.Н. Камлев, К.Г. Компаниетс, Л.А. Кuzmichev, V.Yu. Kutovoi, A. Chiavassa, A.A. Petrukhin, A. Haungs, S.S. Khokhlov, I.A. Shulzhenko, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. *Instrum. Exp. Tech.*, **59**, 781 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441216050110>
- [5] Р.Д. Монхоев и др. *Учен. зап. физ. фак. Московского ун-та*, **2**, 2320202 (2023).
- [6] М.А. Илюшин, И.И. Астапов, П.А. Безьязыков, Е.А. Бонвеч, А.Н. Бородин, Н.М. Буднев, А.В. Булан, А. Вайдянатан, Н.В. Волков, П.А. Волчугов, Д.М. Воронин, А.Р. Гафаров, А.Ю. Гармаш, В.М. Гребенюк, Е.О. Гресь, О.А. Гресь, Т.И. Гресь, А.А. Гринюк, О.Г. Гришин, А.Н. Дячок, Д.П. Журов, А.В. Загородников, А.Д. Иванова, А.Л. Иванова, Н.Н. Калмыков, В.В. Киндин, С.Н. Кириухин, Р.П. Кокоулин, Н.И. Колосов, К.Г. Компаниец, Е.Е. Коростелева, В.А. Кожин, Е.А. Кравченко, А.П. Крюков, Л.А. Кузьмичев, А. Кьявасса, А.А. Лагутин, М.В. Лаврова, Ю.Е. Лемешев, Б.К. Лубсандоржиев, Н.Б. Лубсандоржиев, С.Д. Малахов, Р.Д. Монхоев, Р.Р. Миргазов, Э.А. Окунева, Э.А. Осипова, А.Л. Пахоруков, А. Пан, А.Д. Панов, Л.В. Паньков, А.А. Петрухин, Д.А. Подгрудков, Е.Г. Попова, Е.Б. Постников, В.В. Просин, В.С. Птускин, А.А. Пушкин, А.Ю. Разумов, Р.И. Райкин, Г.И. Рубцов, Е.В. Рябов, В.С. Самолига, И. Сатышев, А.А. Силаев, А.А. Силаев(мл.), А.Ю. Сидоренков, А.В. Скурихин, А.В. Соколов, Л.Г. Свешникова, В.А. Таболенко, А.Б. Танаев, М.Ю. Терновой, Л.Г. Ткачев, Н.А. Ушаков, Д.В. Чернов, И.И. Яшин. *ЖТФ*, **93** (12), 1822 (2023). DOI: [10.61011/JTF.2024.12.59260.391-24](https://doi.org/10.61011/JTF.2024.12.59260.391-24) [М.А. Илюшин, И.И. Астапов, П.А. Bezyazeev, E.A. Bonvech, A.N. Borodin, N.M. Budnev, A.V. Bulan, A. Vaidyanathan, N.V. Volkov, P.A. Volchugov, D.M. Voronin, A.R. Gafarov, A.V. Garmash, V.M. Grinyuk, E.O. Gress, O.A. Gress, T.I. Gress, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, A.N. Dyachok, D.P. Zhurov, A.V. Zagorodnikov, A.D. Ivanova, A.L. Ivanova, N.N. Kalmykov, V.V. Kindin, S.N. Kiryuhin, R.P. Kokoulin, N.I. Kolosov, 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, Y.E. Lemeshev, B.K. Lubsandorzhev, N.V. Lubsandorzhev, S.D. Malakhov, R.D. Monkhoev, R.R. Mirgazov, E.A. Okuneva, E.A. Osipova, A.L. Pakhorukov, A. Pan, A.D. Panov, L.V. Pankov, A.A. Petrukhin, D.A. Podgrudkov, E.G. Popova, E.B. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, A.Y. Razumov, R.I. Raikin, G.I. Rubtsov, E.V. Rjabov, V.S. Samoliga, I. Satyshev, A.A. Silaev,

- A.A. Silaev Jr., A.Y. Sidorenkov, A.V. Skurikhin, A.V. Sokolov, L.G. Sveshnikova, V.A. Tabolenko, A.B. Tanaev, M.Y. Ternovoy, L.G. Tkachev, N.A. Ushakov, D.V. Chernov, I.I. Yashin. *Tech. Phys.*, **68**(12), 1693 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56831.f216-23]
- [7] E. Kravchenko, J.E. Alizzi, I. Astapov, P. Bezyazeev, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, D. Horns, A. Igoshin, A. Ivanova, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, D. Lukyantsev, S. Malakhov, I. Mamaev, R. Monkhoev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, L. Panasenko, L. Pankov, A. Petrukhin, I. Poddubnyi, V. Poleschuk, V. Ponomareva, M. Popesku, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, 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, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. *J. Phys. Conf. Ser.*, **2374**, 012042 (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2374/1/012042