

Сцинтилляционная установка Taiga-мион: статус и перспективы

© М.А. Илюшин,² И.И. Астапов,⁴ П.А. Безъязыков,² Е.А. Бонвеч,¹ А.Н. Бородин,³ Н.М. Буднев,² А.В. Булан,¹ А. Вайдянатан,⁵ Н.В. Волков,⁹ П.А. Волчугов,¹ Д.М. Воронин,⁶ А.Р. Гафаров,² А.Ю. Гармаш,^{5,8} В.М. Гребенюк,^{3,10} Е.О. Гресь,² О.А. Гресь,² Т.И. Гресь,² А.А. Гринюк,³ О.Г. Гришин,² А.Н. Дячок,² Д.П. Журов,^{2,13} А.В. Загородников,² А.Д. Иванова,^{2,12} А.Л. Иванова,^{2,5} Н.Н. Калмыков,¹ В.В. Киндин,⁴ С.Н. Кирюхин,² Р.П. Кокоулин,⁴ Н.И. Колосов,² К.Г. Компаниец,⁴ Е.Е. Коростелева,¹ В.А. Кожин,¹ Е.А. Кравченко,^{5,8} А.П. Крюков,¹ Л.А. Кузьмичев,¹ А. Кьявасса,¹¹ А.А. Лагутин,⁹ М.В. Лаврова,³ Ю.Е. Лемешев,² Б.К. Лубсандоржиев,⁶ Н.Б. Лубсандоржиев,¹ С.Д. Малахов,² Р.Д. Монхоев,² Р.Р. Миргазов,² Э.А. Окунева,¹ Э.А. Осипова,¹ А.Л. Пахоруков,² А. Пан,³ А.Д. Панов,¹ Л.В. Паныков,² А.А. Петрухин,⁴ Д.А. Подгрудков,¹ Е.Г. Попова,¹ Е.Б. Постников,¹ В.В. Просин,¹ В.С. Птускин,⁷ А.А. Пушкин,² А.Ю. Разумов,¹ Р.И. Райкин,⁹ Г.И. Рубцов,⁶ Е.В. Рябов,² В.С. Самолига,² И. Сатышев,³ А.А. Силаев,¹ А.А. Силаев(мл.),¹ А.Ю. Сидоренков,⁶ А.В. Скурихин,¹ А.В. Соколов,^{5,8} Л.Г. Свешникова,¹ В.А. Таболенко,² А.Б. Танаев,² М.Ю. Терновой,² Л.Г. Ткачев,^{3,10} Н.А. Ушаков,⁶ Д.В. Чернов,¹ И.И. Яшин⁴

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, 119991 Москва, Россия

²Иркутский государственный университет, Научно-исследовательский институт прикладной физики, 664003, Иркутск, Россия

³Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

⁴Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, 115409 Москва, Россия

⁵Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

⁶Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия

⁷Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 108840 Москва, г. Троицк, Россия

⁸Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

⁹Алтайский государственный университет, 656049 Барнаул, Россия

¹⁰Университет „Дубна“, 141980 Дубна, Россия

¹¹Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

¹²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701 Долгопрудный, Россия

¹³Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074 Иркутск, Россия

¹²Московский физико-технический институт, Москва, Россия
e-mail: mikhail.ilushin@yandex.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2023 г.

В окончательной редакции 24 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Приведены описание сцинтилляционной установки TAIGA-Muon в составе астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for Cosmic Ray Physics and Gamma Astronomy), научная программа исследований, методика восстановления параметров широких атмосферных ливней и результаты тестовых наборов экспериментальных данных.

Ключевые слова: космические лучи, широкий атмосферный ливень, сцинтилляционная установка TAIGA-Muon, экспериментальный комплекс TAIGA.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56831.f216-23

Введение

Исследования первичного космического излучения (ПКИ) с энергиями более 100 TeV проводятся с по-

мощью наземных установок методом регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Гибридный астрофизический комплекс TAIGA [1] располагается в Тункинской долине (Республика Бурятия, Россия) и

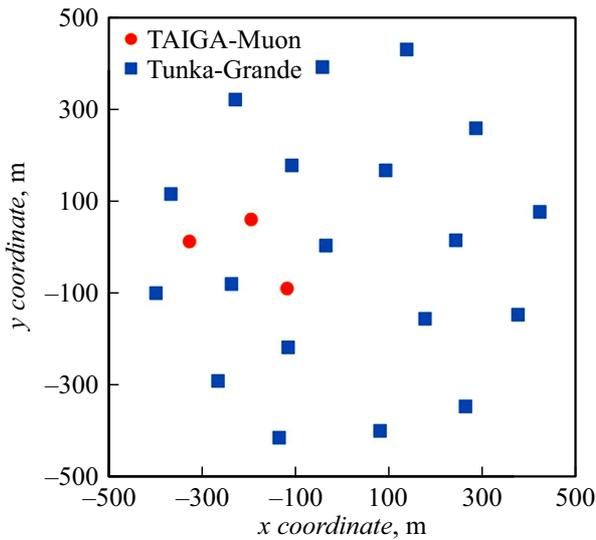


Рис. 1. Расположение установок TAIGA-Muon и Tunka-Grande.

предназначен для детального изучения ПКИ в диапазоне энергий 0.01–1000 PeV. Комплекс включает в себя: широкоугольные черенковские установки Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer), три атмосферных черенковских телескопа TAIGA-IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes) и сцинтилляционные установки Tunka-Grande и TAIGA-Muon.

Строительство установки TAIGA-Muon [2] было начато в 2019 г. и на данный момент времени развернуто 3 станции (рис. 1). Планируется, что первая очередь строительства будет включать в себя 10 станций. За период 2021–2022 гг. были проведены тестовые сеансы измерений и получены первые экспериментальные данные, на основе которых совместно с действующей установкой Tunka-Grande восстановлены параметры ШАЛ и оценена точность их реконструкции.

1. Экспериментальная установка

Целью создания установки TAIGA-Muon, с одной стороны, является повышение эффективности установки Tunka-Grande [3] для исследования ПКИ в диапазоне энергий 10–1000 PeV путем увеличения числа детекторов мюонов, с другой — понижение энергетического порога действующей сцинтилляционной установки до энергии ~ 1 PeV. Расположение и конфигурация станций установки TAIGA-Muon основаны на модельных расчетах [4]. Каждая станция установки TAIGA-Muon включает в себя 8 наземных и 8 подземных сцинтилляционных счетчиков [5] площадью 0.96 м² каждый. Подземные счетчики находятся под слоем грунта на глубине 1.7 м строго под наземными без прямого доступа. В 2022 г. с целью увеличения эффективной площади регистрации мюонной компоненты ШАЛ принята новая конфигурация, которая предусматривает 4 наземных и

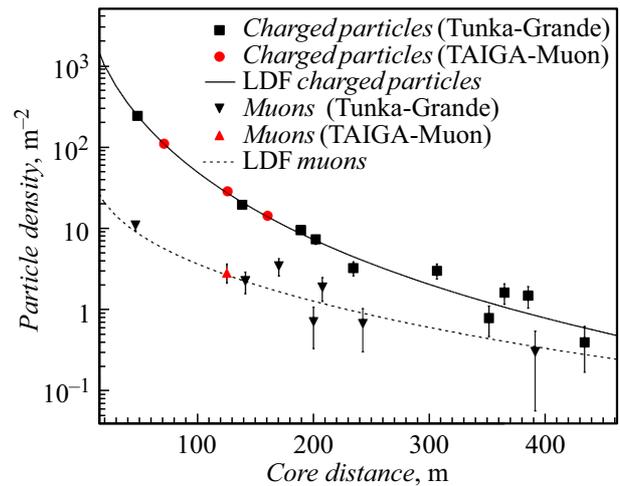


Рис. 2. Пространственное распределение частиц по данным установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon ($\lg N_e = 7.04$, $\lg N_\mu = 6.15$, $\theta = 27.40^\circ$, $\varphi = 3.3^\circ$).

16 подземных счетчиков с сохранением системы сбора данных [6]. Планируется, что в 2023 г. конфигурация трех первых станций также будет модернизирована.

2. Реконструкция основных параметров ШАЛ

Для зарегистрированных событий реконструируются основные параметры ШАЛ, такие как θ , φ — зенитный и азимутальный углы прихода оси ливня; x_0 , y_0 — координаты оси ливня в плоскости установки; N_e , N_μ — полное число заряженных частиц и мюонов в ливне; S — возраст ливня; 200 , ρ_{200} — плотность частиц на расстоянии 200 м от оси ливня.

На первом шаге отбираются все сработавшие станции установок TAIGA-Muon и Tunka-Grande во временном окне $5 \mu\text{s}$. Далее вычисляются направление прихода оси ливня в предположении плоского фронта ШАЛ и в нулевом приближении ее положение в плоскости установок методом центра масс. Определение значения параметра N_e производится при помощи функции пространственного распределения частиц (ФПР) Нишимуры–Каматы–Грейзена [7]:

$$f_e(r) = \frac{\Gamma(4.5 - S)}{2\pi r_0^2 \Gamma(S) \Gamma(4.5 - 2S)} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{S-2} \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{S-4.5}, \tag{1}$$

где мольеровский радиус $r_0 = 80$ м. Нулевое приближение для полного числа заряженных частиц рассчитывается при фиксированном параметре $S = 1.1$:

$$N_e = \frac{\sum_i N_i}{\sum_i f_e(r_i) s_i}, \tag{2}$$

где N_i — суммарное число зарегистрированных частиц в наземной i -й станции с эффективной площадью s_i .

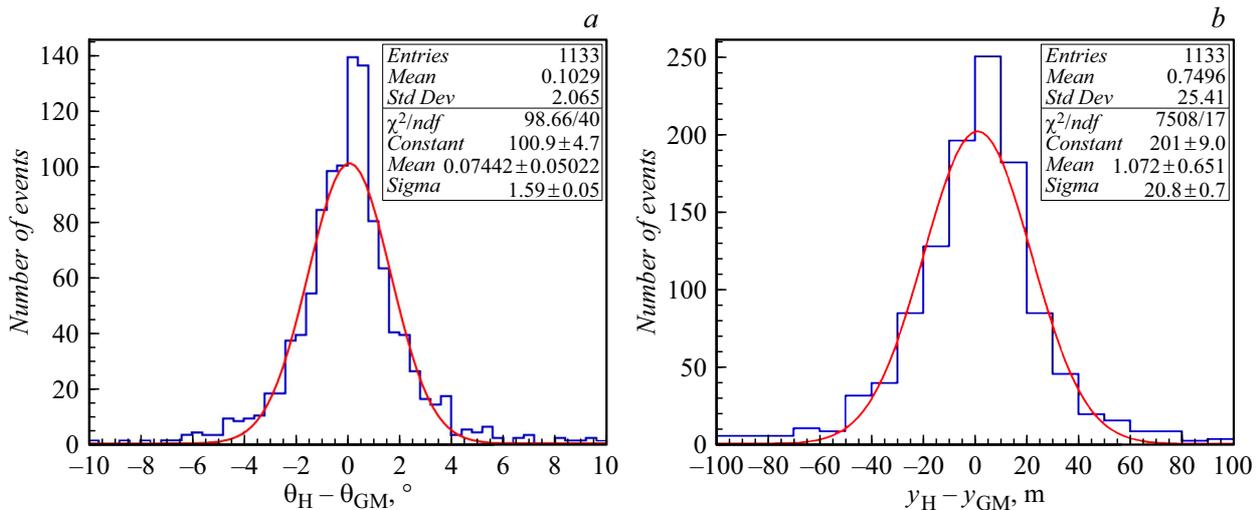


Рис. 3. Сравнение восстановленного зенитного угла θ (a) и координаты y (b) оси ШАЛ по данным установок TAIGA-HiSCORE (H) и TAIGA-Muon совместно с установкой Tunka-Grande (GM).

На втором шаге, используя полученное значение N_e и при $S = 1.1$, методом наименьших квадратов (МНК) в соответствии с выражением (1) уточняются значения x_0 , y_0 . На третьем этапе происходит повторное вычисление N_e и МНК повторяется со свободными параметрами N_e , S , x_0 , y_0 . Этот же метод применяется и для нахождения N_μ по данным подземных детекторов. В качестве ФПР мюонов используется функция Грейзена [7]:

$$f_\mu = \frac{1.25}{2\pi^2\Gamma(1.25)} \left(\frac{1}{320}\right)^{1.25} r^{-0.75} \left(1 + \frac{r}{320}\right)^{-2.5}. \quad (3)$$

На рис. 2 представлен пример одного реконструированного события по данным установок TAIGA-Muon и Tunka-Grande, а именно показана восстановленная плотность частиц в наземных (заряженные частицы) и подземных (мюоны) частях установок от их расстояния до оси ШАЛ в плоскости перпендикулярной оси ливня. Из рис. 2 следует, что экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с используемыми ФПР.

В ходе тестовых запусков с октября 2021 г. по апрель 2022 г. общее время работы установок TAIGA-Muon и Tunka-Grande составило ~ 220 h. Для оценки точности реконструкции параметров ШАЛ по данным сцинтилляционных установок был проведен анализ совместных событий с установкой TAIGA-HiSCORE, которая имеет хорошее угловое разрешение $\sim 0.1^\circ$ и точность восстановления положения оси ШАЛ ~ 6 m [8]. Было выделено 1133 совместных события со следующими критериями отбора: $\theta < 35^\circ$, положение оси в круге радиусом 350 m от центра установки, восстановленная энергия первичной частицы по данным установки TAIGA-HiSCORE выше 5 PeV, число сработавших станций TAIGA-Muon вместе с Tunka-Grande не менее четырех. Точность реконструкции углов θ , φ составила $\sim 2^\circ$, координат x_0 , $y_0 \sim 25$ m (рис. 3).

Заключение

Приведены результаты тестовых измерений на установке TAIGA-Muon за период 2021–2022 гг. Получены первые экспериментальные данные, на основе которых восстановлены параметры ШАЛ. Точность реконструкции углов θ , φ составила $\sim 2^\circ$, координат x_0 , $y_0 \sim 25$ m. Включение установки TAIGA-Muon в состав астрофизического комплекса TAIGA позволит приступить к детальному изучению ПКИ в диапазоне энергий 1–1000 PeV.

Финансирование работы

Исследование выполнено на УНУ „Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ“, при поддержке Минобрнауки России (соглашение ЕВ-075-15-2021-675), в рамках тем государственного задания (FZZE-2023-0004, FZZE-2020-0024, FSUS-2020-0039, FSUS-2022-0015), а также при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-72-00016, № 23-72-00054).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Budnev, I. Astapov f, P. Bezyazeev b, E. Bonvech a, A. Borodin g, A. Bulan a, A. Chiavassa d, D. Chernov a, A. Dyachok b, A. Gafarov b, A. Garmash k i, V. Grebenyuk g h, O. Gress b, E. Gress b, T. Gress b, A. Grinyuk g, O. Grishin b, A.D. Ivanova b, A.L. Ivanova i b, N. Kalmykov a, V. Kindin f, S. Kiryuhin b, R. Kokoulin f, K. Komponiets f, E. Korosteleva a, V. Kozhin a, E. Kravchenko i k, A. Kryukov a, L. Kuzmichev a, A. Lagutin j, M. Lavrova g, Y. Lemeshev b, B. Lubsandorzhev c, N. Lubsandorzhev a,

- A. Lukanov c, D. Lukyantsev b, S. Malakhov b, R. Mirgazov b, R. Monkhoev b, E. Okuneva f, E. Osipova a, A. Pakhorukov b, A. Pan g, L. Panasenکو k, L. Pankov b, A.D. Panov a, A. Petrukhin f, I. Poddubny b, D. Podgrudkov a, V. Poleschuk b, V. Ponomareva b, E. Popova a, E. Postnikov a, V. Prosin a, V. Ptuskin e, A. Pushnin b, R. Raikin j, A. Razumov a, G. Rubtsov c, E. Ryabov b, Y. Sagan gh, V. Samoliga b, A. Silaev a, A. Silaev Junior a, A. Sidorenkov c, A. Skurikhin a, A. Sokolov i k, L. Sveshnikova a, V. Tabolenko b, A. Tanaev b, B. Tarashchansky b, M.Y. Ternovoy b, L. Tkachev g, R. Togoo l, N. Ushakov c, A. Vaidyanathan k, P. Volchugov a, N. Volkov j, D. Voronin c, A. Zagorodnikov b, A. Zhaglova b, D. Zhurov b m, I. Yashin f (TAIGA Collaboration). *Nucl. Instrum. Meth.*, **A 1039**, 167047 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047
- [2] Р.Д. Монхоев. Коллаборация TAIGA, Учен. зап. физ. фак-та МГУ, **2**, 2320202 (2023).
- [3] Р.Д. Монхоев и др. Изв. РАН. Сер. физ. Т. 83. № 8. С. 954 (2023).
- [4] I. Astapov, P. Bezyazeev, M. Blank, E. Bonvech, A. Borodin, M. Brueckner, 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. Igoshin, 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. Lubsandorzhiiev, N. Lubsandorzhiiev, A. Lukanov, D. Lukyantsev, S. Malakhov, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, L. Pankov, L. Panov, A. Petrukhin, I. Poddubnyi, D. Podgrudkov, V. Poleschuk, V. Ponomareva, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga, I. Satyshev, A. Silaev, A. Silaev(junior), A. Sidorenkov, S. Sinegovsky, A. Skurikhin, A. Sokolov, V. Sulakov, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashchansky, M. Ternovoy, L. Tkachev, M. Tluczykont, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, A. Zhaglova, D. Zhurov, I. Yashin. (TAIGA Collaboration), *JINST*, **17**, P06022 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/06/P06022
- [5] I. Astapov, P. Bezyazeev, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, O. Gress, 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, M. Lavrova, Yu. Lemeshev, V. Lenok, B. Lubsandorzhiiev, N. Lubsandorzhiiev, 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. Semenev, A. Silaev, A. Silaev, Jr., A. Sidorenkov, A. Skurikhin, V. Slunicka, A. Sokolov, C. Spiering, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, B. Tarashchansky, L. Tkachev, M. Tluczykont, A. Vaidyanathan, R. Wischnewski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, V. Zurbanov, I. Yashin. (TAIGA Collaboration), *Nucl. Instrum. Meth.*, **A 936**, 254–256 (2019). DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.081
- [6] A. Ivanova, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, O. Fedorov, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Grinyuk, D. Horns, N. Kalmykov, Y.A. Kazarina, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, Y. Lemeshev, V. Lenok, B. Lubsandorzhiiev, N. Lubsandorzhiiev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, M. Popescu, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, A.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, C. Spiering, Y. Suvorkin, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashchansky, M. Ternovoy, L. Tkachev, M. Tluczykont, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, D. Voronin, R. Wischnevski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. *JINST*, **15**, C06057 (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/06/C06057
- [7] K. Greisen. Cosmic Ray Showers, *Annual Rev. Nucl. Sci.*, **10**, 63 (1960).
- [8] S. Berezhnev, N.M. Budnev, M. Bükler, M. Brückner, R. Wischnewski, A.V. Gafarov, O.A. Gress, T. Gress, A.N. Dyachok, S.N. Epimakhov, A.V. Zagorodnikov, V.L. Zurbanov, N.N. Kalmykov, N.I. Karpov, E.N. Konstantinov, E.E. Korosteleva, V.A. Kozhin, M. Kunnas, L.A. Kuzmichev, A. Chiavassa, B.K. Lubsandorzhiiev, N.B. Lubsandorzhiiev, R.R. Mirgazov, R.D. Monkhoev, R. Nachtigall, A.L. Pakhorukov, M.I. Panasyuk, L.V. Pankov, A. Porelli, V.A. Poleschuk, E.G. Popova, V.V. Prosin, V.S. Ptuskin, M. Rueger, G.I. Rubtsov, Yu.A. Semenev, A.A. Silaev Sr, A.A. Silaev Jr, A.V. Skurikhin, L.G. Sveshnikova, M. Tluczykont, D. Hampf, D. Horns, O.A. Chvalaev. (TAIGA Collaboration), *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, **79** (3), 348 (2015). DOI: 10.3103/S1062873815030107