

Модернизация сцинтилляционных счетчиков установки TAIGA—Muon

© Р.Д. Монхоев,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} М.А. Илюшин,² Н.Н. Калмыков,¹ В.В. Киндин,⁴ С.Н. Кириухин,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.Р. Миргазов,² Э.А. Окунева,¹ Э.А. Осипова,¹ А.Л. Пахоруков,² А. Пан,³ А.Д. Панов,¹ Л.В. Паньков,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

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

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

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

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

⁵ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

⁶ Институт ядерных исследований РАН,
117312 Москва, Россия

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

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

⁹ Алтайский государственный университет,
656049 Барнаул, Россия

¹⁰ Университет „Дубна“,
141980 Дубна, Россия

¹¹ Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

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

¹³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074 Иркутск, Россия
e-mail: makaay08@rambler.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2023 г.

В окончательной редакции 17 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

В 2019 г. в дополнение к действующей установке Tunka-Grande начато строительство сцинтилляционной установки TAIGA—Muon. Оба эксперимента являются частью астрофизического комплекса TAIGA, предназначенного для решения широкого круга фундаментальных задач в области физики космических лучей и гамма-астрономии. Приведены описание установки TAIGA—Muon и результаты тестовых сеансов измерений. Также представлены новая конфигурация кластеров и проект модернизации конструкции сцинтилляционных счетчиков.

Ключевые слова: космические лучи, широкий атмосферный ливень, сцинтилляционная установка TAIGA—Muon, астрофизический комплекс TAIGA.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56833.f214-23

Введение

Целью создания сцинтилляционной установки TAIGA—Muon является детальное изучение энергетиче-

ского спектра и массового состава первичных космических лучей совместно с действующей установкой Tunka-Grande [1], а также поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10^{15} – 10^{18} eV методом регистрации

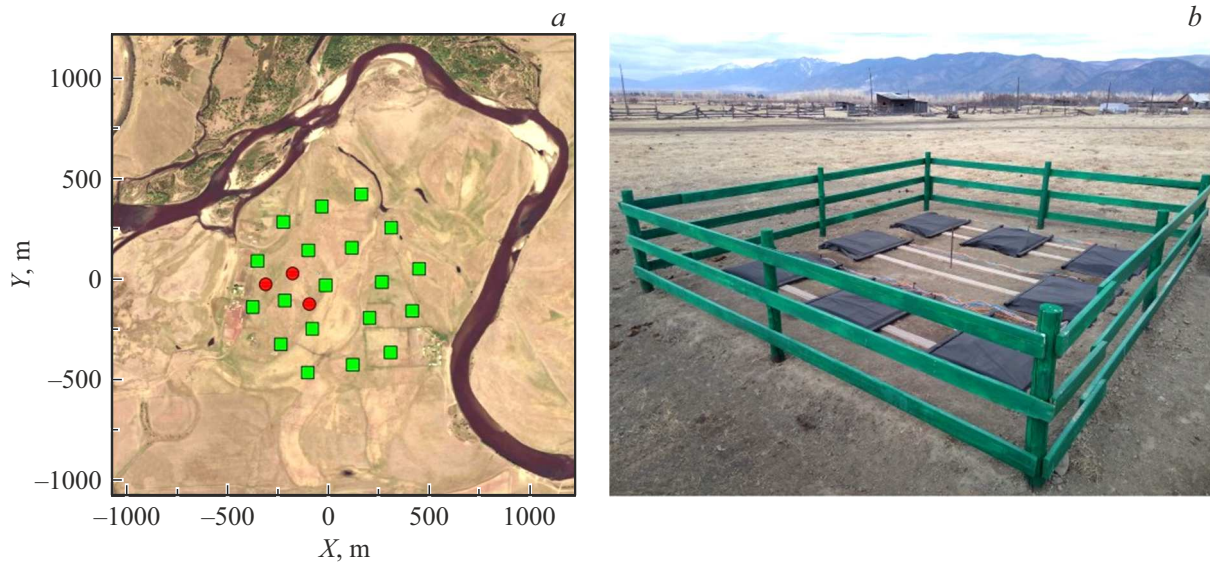


Рис. 1. Установка TAIGA–Muon: *a* — расположение кластеров относительно станций установки Tunka-Grande (зеленые квадраты (в онлайн версии) — станции, красные круги (в онлайн версии) — кластеры), *b* — внешний вид кластера.

компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ). Оба эксперимента являются частью астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) [2], расположенного в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), в 50 km от озера Байкал. В настоящее время в рамках первой очереди строительства развернуто 3 из 10 кластеров установки TAIGA–Muon. За период 2019–2022 гг. проведены тестовые сеансы измерений, по результатам которых сформированы новая конфигурация кластеров и проект модернизации конструкции сцинтилляционных счетчиков.

1. Конфигурация кластеров

Расположение и конфигурация кластеров установки TAIGA–Muon основаны на модельных расчетах, приведенных в работе [3]. На данный момент времени три кластера расположены в центрах треугольников, вершинами которых являются станции установки Tunka-Grande (рис. 1). Два кластера в своем составе имеют 8 наземных сцинтилляционных счетчиков для регистрации всех заряженных частиц ШАЛ на уровне установки и 8 подземных для выделения мюонной компоненты ШАЛ. Счетчики геометрически расположены парами: наземные строго над подземными. Все 8 пар размещены по периметру квадрата со стороной 5 m. Расстояние между соседним парами — 1 m. Необходимо отметить, что конструкция кластеров не предусматривает прямого доступа к подземной части, толщина грунта над которой составляет ~ 1.7 m. Конфигурация третьего кластера была модернизирована в 2022 г. с целью увеличения эффективной площади регистрации мюонной компоненты ШАЛ без внесения изменений в существующую

систему сбора данных. Число наземных счетчиков было сокращено до 4, подземных — увеличено до 16. Предполагается, что данная конфигурация будет применена ко всем кластерам первой очереди строительства установки TAIGA–Muon.

2. Конструкция сцинтилляционных счетчиков

Сцинтилляционный счетчик [4] состоит из нержавеющей кожуха, внутри которого располагаются сборные сцинтилляционные пластины переменной толщины (10 mm в центре детектора и 20 mm на его периферии) на основе полистирола с добавлением 1.5% p-терфенила и 0.01% РОРОР (1,4-бисбензол), пластины–световоды с сечением $5 \cdot 20$ mm² (акриловое стекло с переизлучающей добавкой ВВQ), диффузные отражатели и фотоэлектронный умножитель ФЭУ-85-4. Увеличение толщины пластин к периферии счетчиков и использование пластин–световодов позволило добиться приемлемой однородности амплитуд сигналов из разных частей детектора (неоднородность светосбора $\sim 25\%$). Общая площадь счетчика ~ 1 m².

После проведения тестовых сеансов измерений на трех кластерах установки TAIGA–Muon было установлено, что, во-первых, корпуса счетчиков недостаточно герметичны. Экспериментальный комплекс TAIGA располагается в пределах поймы и надпойменной террасы реки Иркут, и для этой местности, в зависимости от времени года, характерен высокий уровень грунтовых вод. Во-вторых, ФЭУ-85-4 имеет корытообразную диодную систему, которая обладает относительно низкой линейностью анодного тока (от 1 до 10 mA). Это приводит к искажению сигналов со счетчиков при регистрации

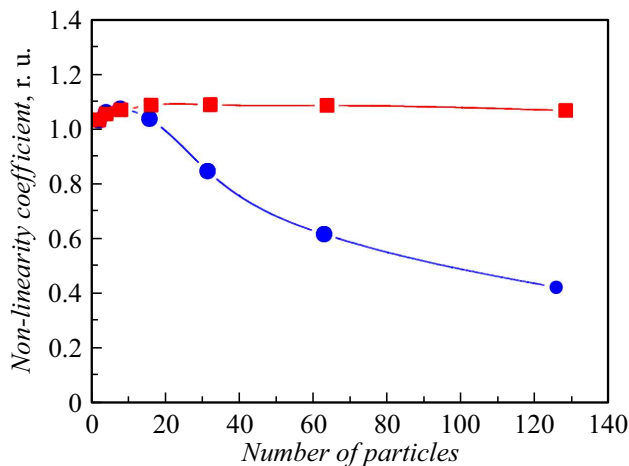


Рис. 2. Диапазон линейности ФЭУ-85-4. Синими кругами (в онлайн версии) показаны результаты измерений без предусилителя сигналов, красными квадратами (в онлайн версии) — при использовании предусилителя сигналов.

событий с числом частиц больше 20. В то же время требуемый линейный диапазон регистрации для каждого счетчика составляет от 1 до 100 частиц.

Для защиты счетчиков от воздействия атмосферных осадков, случайных и грунтовых вод была разработана и реализована конструкция дополнительного герметичного пластмассового короба размером $120 \times 110 \times 12$ см. Короб выполнен из листов полипропилена с рабочим температурным режимом окружающей среды от -25 до $+85^\circ\text{C}$, серого цвета, толщиной 3, 8 и 10 мм. Соединение листов между собой реализовано на основе экструзионной сварки. Для устранения влияния эффекта нелинейности был разработан и протестирован предусилитель анодных сигналов ФЭУ (буферный усилитель). Тестовые измерения проводились стандартным методом парных подсветок, при котором на каждом шаге фотокатод ФЭУ подсвечивался сначала одним импульсным источником света с заданной интенсивностью, принятой за эквивалент числа частиц ШАЛ, затем вторым, а далее двумя источниками одновременно. Основная идея метода состоит в предположении, что в области линейности отклик ФЭУ на подсветку двумя источниками должен быть равен сумме откликов на подсветку только первым и только вторым источником. Результаты измерений показали, что модифицированная схема включения позволяет увеличить диапазон линейности ФЭУ до ~ 120 частиц ШАЛ (рис. 2).

Заключение

Разработана конструкция герметичного пластмассового короба для защиты сцинтилляционных счетчиков установки TAIGA–Muon от воздействия атмосферных осадков, случайных и грунтовых вод. Разработан и

протестирован предусилитель сигналов для ФЭУ-85-4, позволяющий достоверно регистрировать сцинтилляционным счетчиком от 1 до ~ 120 частиц ШАЛ. Использование новой конфигурации кластеров и модернизированных счетчиков повысит информативность получаемых экспериментальных данных и позволит приступить к детальному изучению космического излучения в диапазоне энергий $10^{15} - 10^{18}$ eV.

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] Р.Д. Монхоев. Коллаборация TAIGA, Учен. зап. физ. фак-та МГУ, **2**, 2320202 (2023).
- [2] И.И. Астапов, П.А. Безъязыков, М. Бланк, Е.А. Бонвеч, А.Н. Бородин, М. Брюкнер, Н.М. Буднев, А.В. Булан, А. Вайдянатан, Р. Вишневецкий, Н.В. Волков, П.А. Волчугов, Д.М. Воронин, А.Р. Гафаров, О.А. Гресс, Т.И. Гресс, О.Г. Гришин, А.Ю. Гармаш, В.М. Гребенюк, А.А. Гринюк, А.Н. Дячок, Д.П. Журов, А.В. Загородников, А.Л. Иванова, Н.Н. Калмыков, В.В. Киндин, С.Н. Кирюхин, Р.П. Кокоулин, 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, Р.Р. Миргазов, Р. Мирзоян, Р.Д. Монхоев, Е.А. Осипова, А.Л. Пахорук, А. Пан, М.И. Панасюк, Л.В. Паньков, А.А. Петрухин, Д.А. Подгрудков, В.А. Полещук, Е.Г. Попова, А. Порелли, Е.Б. Постников, В.В. Просин, В.С. Птускин, А.А. Пушкин, А.В. Разумов, Р.И. Райкин, Г.И. Рубцов, Е.В. Рябов, Я.И. Сагань, В.С. Самолига, И. Сатышев, А.А. Силаев, А.А. Силаев (мл.), А.Ю. Сидоренков, А.В. Скурихин, А.В. Соколов, Л.Г. Свешникова, Я.В. Суворкин, В.А. Таболенко, А.Б. Танаев, Б.А. Тарашанский, М.Ю. Терновой, Л.Г. Ткачев, М. Тлужиконт, Н.А. Ушаков, Д. Хорнс, Д.В. Чернов, И.И. Яшин. ЖЭТФ, **161** (4), 548 (2022). DOI: 10.31857/S0044451022040095
- [3] I. Astapov, P. Bezyazekov, 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. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, 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. Popesku, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, G. Rubtsov, E. Ryabov, Y. Sagan, V. Samoliga1, 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. *JINST*, **17** (6), P06022 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/06/P06022
- [4] I. Astapov, P. Bezyazeev, A. Borodin, M. Brueckner, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Djachok, 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, I. Yashin. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **936**, 254 (2019). DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.081