# Моделирование прототипа подземной водной черенковской установки для гамма-обсерватории TAIGA

© М.Ю. Терновой,[1] И.И. Астапов,[2] П.А. Безъязыков,[1] Е.А. Бонвеч,[3] А. Блинов,[4] А.Н. Бородин,[4] Н.М. Буднев,[1] А.В. Булан,[3] П.В. Бусыгин,[1] Н.В. Волков,[5] П.А. Волчугов,[1,3] Д.М. Воронин,[6] А.Р. Гафаров,[1] А.Ю. Гармаш,[7,8] В.М. Гребенюк,[4,9] О.А. Гресь,[1] Т.И. Гресь,[1] Е.О. Гресь,[1] А.А. Гринюк,[4] 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,[1,7] М.А. Илюшин,[1] И.А. Кабанник,[1] Н.Н. Калмыков,[3] В.В. Киндин,[2] С.Н. Кирюхин,[1] В.А. Кожин,[3] Р.П. Кокоулин,[2] К.Г. Компаниец,[2] Е.Е. Коростелева,[3] Е.А. Кравченко,[7,8] А.П. Крюков,[3] Л.А. Кузьмичев,[3] А. Кьявасса,[13] М.В. Лаврова,[4] А.А. Лагутин,[5] Ю.Е. Лемешев,[1] Б.К. Лубсандоржиев,[6] Н.Б. Лубсандоржиев,[3,1] А. Луканов,[6] С.Д. Малахов,[1] Р.Р. Миргазов,[1] Р.Д. Монхоев,[1,7] Э.А. Окунева,[3,1] Э.А. Осипова,[3] А. Пан,[4] А.Д. Панов,[3] Л.В. Паньков,[1] А.Л. Пахоруков,[1] А.А. Петрухин,[2] Д.А. Подгрудков,[3] И. Поддубный,[1] Е.Г. Попова,[3] Е.Б. Постников,[3] В.В. Просин,[3] А.А. Пушнин,[1] Р.И. Райкин,[5] А.В. Разумов,[3,1] Г.И. Рубцов,[6] Е.В. Рябов,[1] А.К. Сагдеева,[1] И. Сатышев,[4] В.С. Самолига,[1] Л.Г. Свешникова,[3] А.Ю. Сидоренков,[6] А.А. Силаев,[3] А.А. Силаев(мл.),[3] А.В. Скурихин,[3] А.В. Соколов,[7,8] В.А. Таболенко,[1] А.Б. Танаев,[1] Л.Г. Ткачев,[4,9] Н.А. Ушаков,[6] Д.В. Чернов,[3] А. Шайковский,[4] И.И. Яшин[2]

[1] Иркутский государственный университет, Научно-исследовательский институт прикладной физики, 664003 Иркутск, Россия
[2] Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, 105043 Москва, Россия
[3] Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия
[4] Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Московская обл., Россия
[5] Алтайский государственный университет, 656049 Барнаул, Россия
[6] Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия
[7] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия
[8] Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
[9] 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, 117303 Москва, Россия
[12] Dipartimento di Fisica Generale Universiteta di Torino and INFN, Turin, Italy
e-mail: markakarat@yandex.ru

*Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.*
*В окончательной редакции 11 июля 2024 г.*
*Принято к публикации 30 октября 2024 г.*

Представлены концепт и результаты моделирования системы подземных водных черенковских детекторов, которые планируется добавить в состав астрофизического комплекса TAIGA для совместной работы с черенковской установкой TAIGA-HiSCORE. Показано, что эта система за счет регистрации мюонной компоненты широких атмосферных ливней позволит точнее измерять массовый состав космических лучей и эффективно выделять космические гамма-кванты из фона заряженных космических лучей с энергией выше 1 PeV.

**Ключевые слова:** экспериментальный комплекс TAIGA, космические лучи, широкие атмосферные ливни, CORSIKA.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59261.392-24

## 1. Концепт водной черенковской установки

В настоящее время в состав экспериментального комплекса TAIGA [1] входят пять независимых установок: TAIGA-HiSCORE, Тунка-133, Tunka-Grande, TAIGA-Muon и TAIGA-IACT. С их помощью проводятся исследования космических лучей (КЛ) и гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий методом регистрации компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ). Совместная работа широкоугольной черенковской установки TAIGA-HiSCORE [2], состоящей из

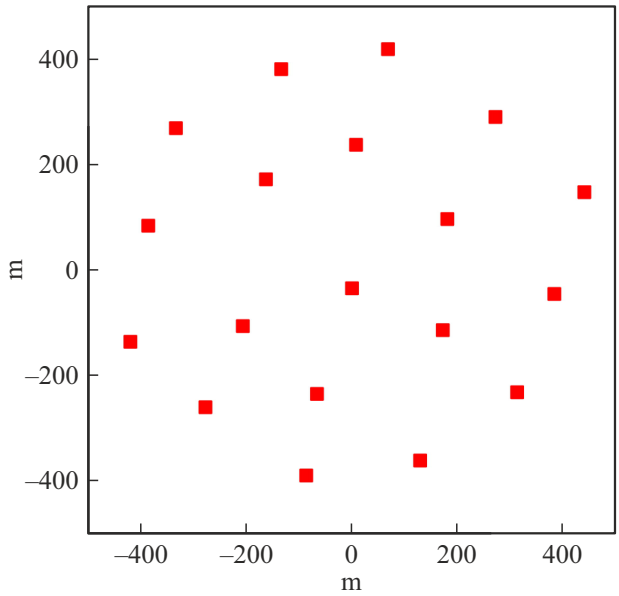



**Рис. 1.** Пространственное распределение детекторов водной черенковской установки.

120 оптических станций, и 3 атмосферных черенковских телескопов установки TAIGA-IACT [3] нацелена на детальное исследование космических гамма-кантов с энергией выше 40 TeV. Для изучения области выше 1 PeV в дополнение к этим установкам в составе астрофизического комплекса на площади 0.5 $km^2$ планируется развернуть систему водных черенковских детекторов цилиндрической формы для регистрации мюонной компоненты ШАЛ. Водные детекторы будут расположены под слоем грунта 2 m, достаточным для экранирования электромагнитной компоненты ШАЛ. Высота отдельного детектора составит 1.5 m, а площадь — порядка 40 $m^2$. Пороговая энергия для вертикальных мюонов при этом 1 GeV. Предполагается, что в гибридном режиме работы экспериментальные данные черенковской установки TAIGA-HiSCORE будут использоваться для высокоточного восстановления параметров ШАЛ и энергии первичной частицы. Данные водных детекторов дадут информацию о типе ядра, породившего данный ШАЛ, и позволят выделять ШАЛ от первичных гамма-квантов из фоновых событий, инициированных заряженными КЛ. Основная идея этого метода заключается в том, что число мюонов зависит от типа частицы, породившей ШАЛ.

## 2. Монте-Карло моделирование водной черенковской установки

Для оценки эффективности регистрации и выделения гамма-квантов из фона заряженных частиц при помощи водных детекторов было проведено компьютерное моделирование их работы методом Монте-Карло. С помощью программы CORSIKA 7.7401 [4] было смоделировано два набора событий ШАЛ: 20 тысяч событий при первичных энергиях 1–10 PeV и зенитном угле прихода ливня 0–30° и 20 тысяч событий при первичных энергиях 1–10 PeV и зенитном угле прихода ливня 30–45°. Оба набора образованы от первичных частиц в следующем соотношении: 50% гамма-кванты, 25% протоны, 12.5% ядра группы CNO и 12.5% ядра железа. Наклон энергетического спектра — 2.7. В качестве модели адронных взаимодействий при высоких энергиях использовалась модель QGSJET-II-04 [5]. Водные детекторы в количестве

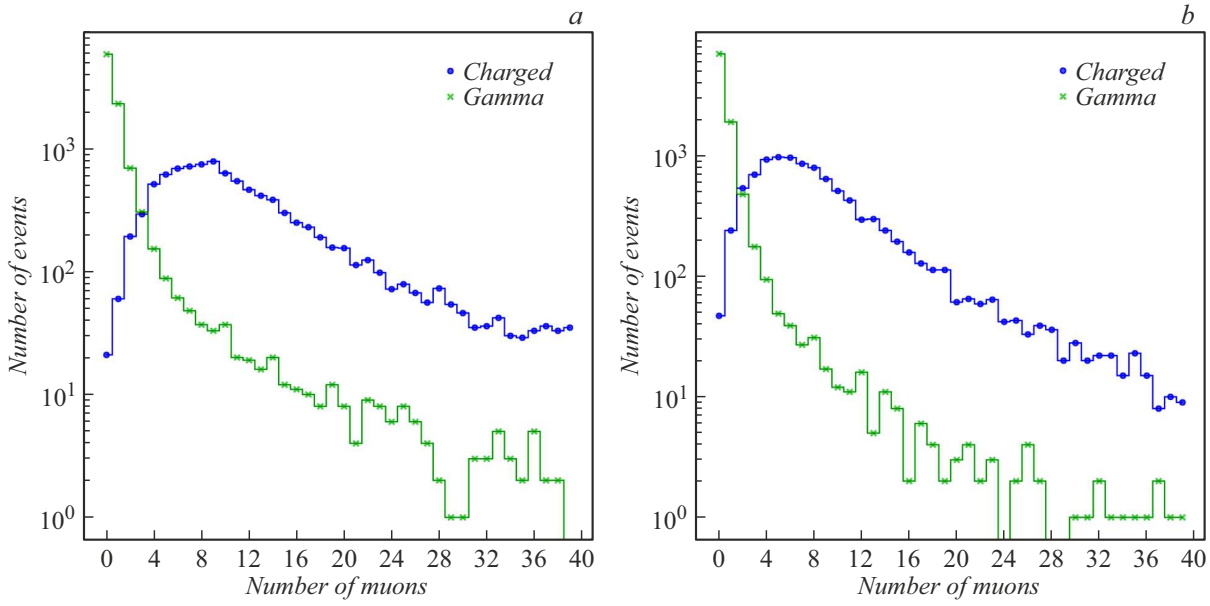



**Рис. 2.** Распределение числа событий по числу зарегистрированных мюонов водной черенковской установкой для двух первичных составов (заряженных КЛ и гамма-квантов) при следующих параметрах: *a* — $1 < \lg(E/PeV) < 10$. $\theta < 30°$, *b* — $1 < \lg(E/PeV) < 10$, $30° < \theta < 45°$.

19 штук были равномерно расположены в круге радиусом 400 m в непосредственной близости от станций сцинтилляционной установки Tunka-Grande [6] (рис. 1). Оси расчетных ШАЛ были распределены в пределах круга этой установки. Информация об искусственных вторичных частицах использовалась для симуляции отклика детекторов. Модельные расчеты были выполнены на оборудовании центра коллективного пользования „Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН“ [7].

На рис. 2 изображены распределения числа событий ШАЛ по числу зарегистрированных мюонов от двух первичных составов космических лучей в двух вариантах по углам прихода. Из полученных распределений следует, что безмюонные события наблюдаются в 0.5% случаев для адронных ливней и в 70% случаев для фотонных ШАЛ. Эти результаты свидетельствуют о высокой эффективности предлагаемого метода гамма-адронной сепарации.

## Заключение

Проведено компьютерное моделирование водной черенковской установки, которую планируется ввести в состав Астрофизического комплекса TAIGA для совместной работы с черенковской установкой TAIGA-HiSCORE. Показано, что при выбранной конфигурации новая установка потенциально способна эффективно регистрировать мюоны ШАЛ и выделять гамма-кванты из фона заряженных КЛ в диапазоне энергий первичных частиц 1–10 PeV. В 2025 г. предполагается изготовить прототип детектора и запустить его в набор экспериментальных данных.

### Финансирование работы

Работа была выполнена на Астрофизическом комплексе МГУ-ИГУ (соглашение ЕВ 075-15-2021-675). Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2024-0005, FZZE-2023-0004, FSUS-2020-0039), Российским научным фондом (гранты 23-72-00016 (секция 2)), Иркутским государственным университетом (проект № 091-24-305).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] N. Budnev, 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. Komponiets, E.E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A.P. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhiev, N.B. Lubsandorzhiev, 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). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047

[2] V.V. Prosin, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeekov, E.A. Bonvech, A.N. Borodin, N.M. Budnev, A.V. Bulan, D.V. Chernov, A. Chiavassa, A.N. Dyachok, A.R. Gafarov, A.Yu. Garmash, V.M. Grebenyuk, E.O. Gress, O.A. Gress, T.I. Gress, A.A. Grinyuk, O.G. Grishin, M.A. Iliushin, 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.A. Lagutin, M.V. Lavrova, Yu.E. Lemeshev, B.K. Lubsandorzhiev, N.B. Lubsandorzhiev, S.D. Malakhov, R.R. Mirgazov, R.A. Monkhoev, 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.S. Ptuskin, A.A. Pushnin, R.I. Raikin, A.V. Razumov, E.V. Rjabov, G.I. Rubtsov, V.S. Samoliga, I. Satyshev, A.Yu. Sidorenkov, A.A. Silaev, A.A. Silaev Jr., A.V. Skurikhin, A.V. Sokolov, L.G. Sveshnikova, V.A. Tabolenko, A.B. Tanaev, B.A. Tarashansky, M.Yu. Ternovoy, L.G. Tkachev, N.A. Ushakov, A. Vaidyanathan, N.V. Volkov, P.A. Volchugov, D.M. Voronin, I.I. Yashin, A.V. Zagorodnikov, D.P. Zhurov. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **87**, 1043 (2023). DOI: 10.3103/S1062873823702362

[3] O.A. Gress, T. Ravdandorj, D. Zhurov, I. Astapov, P.A. Bezyazeekov, E.A. Bonvech, A. Borodin, N.M. Budnev, A. Bulan, A. Chiavassa, D.V. Chernov, A.N. Dyachok, A.R. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, E. Gress, T.I. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A.D. Ivanova, A.L. Ivanova, M. Ilushin, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, N. Kolosov, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V.A. Kozhin, E. Kravchenko, A. Kryukov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, M. Lavrova, Y.E. Lemeshev, B. Lubsandorzhiev, N. Lubsandorzhiev, S. Malakhov, R.R. Mirgazov, R. Monkhoev, E. Osipova, E. Okuneva, A. Pakhorukov, A. Pan, L. Pankov, A. Panov, A. Petrukhin, D.A. Podgrudkov, E. Popova, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, A. Pushnin, R. Raikin, A. Razumov, G. Rubtsov, E.V. Ryabov, V. Samoliga, I. Satyshev, A. Silaev, A.A. Silaev junior, A. Sidorenkov, A.V. Skurikhin, A. Sokolov, L. Sveshnikova, V.A. Tabolenko, A. Tanaev, M. Ternovoy, L. Tkachev, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, N. Volkov, D. Voronin, A. Zagorodnikov, I. Yashin. PoS(ICRC2023), **444**, 939 (2023). DOI: 10.22323/1.444.0939

[4] D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz, T. Thouw. FZKA, **6019** (1998). https://web.iap.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.pdf

[5] S. Ostapchenko. Phys. Rev. D, **83**, 014018 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevD.83.014018

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

[7] Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН, url: http://hpc.icc.ru