

## Моделирование сцинтилляционных установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon

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

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет, Научно-исследовательский институт прикладной физики, 664000 Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, 115409 Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, 119991 Москва, Россия

<sup>4</sup>Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

<sup>5</sup>Алтайский государственный университет, 656049 Барнаул, Россия

<sup>6</sup>Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия

<sup>7</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>8</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия <sup>9</sup>Университет „Дубна“, 141982 Дубна, Россия

<sup>10</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074 Иркутск, Россия

<sup>11</sup>Московский физико-технический институт, 141701 Москва, Россия

<sup>12</sup>Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 108840 Москва, Россия

<sup>13</sup>Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия  
e-mail: markakarar@yandex.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 3 сентября 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Представлен план компьютерного моделирования сцинтилляционных установок на основе программных пакетов CORSIKA и Geant4. Приведен метод, разработанный для оптимизации процесса моделирования. Обсужден возможный подход для определения массового состава заряженных космических лучей. Также представлены предварительные результаты компьютерного моделирования установки Tunka-Grande в диапазоне энергий 10–100 PeV.

**Ключевые слова:** экспериментальный комплекс TAIGA, космические лучи, широкие атмосферные ливни, массовый состав, CORSIKA, Geant4.

DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56827.f237-23

### Введение. Сцинтилляционные установки в составе экспериментального комплекса TAIGA

Экспериментальный комплекс TAIGA расположен в Тункинской долине (Республика Бурятия, РФ) и является одним из передовых современных эксперимен-

тов в области астрофизики высоких энергий и гамма-астрономии. В его состав входят 5 независимых установок (TAIGA-HiSCORE, Тунка-133, Tunka-Grande, TAIGA-Muon, TAIGA-IACT), ведущих исследование космических лучей (КЛ) и гамма-излучения методом регистрации различных компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ).

Сцинтилляционные установки Tunka-Grande и TAIGA-Muon состоят из комбинации наземных и подземных сцинтилляционных счетчиков, что позволяет им вести регистрацию и заряженной, и мюонной компонент ШАЛ. Одной из приоритетных задач установок является определение массового состава КЛ, а также выделение астрофизических гамма-квантов в диапазоне первичных энергий 0.1–1000 PeV [1].

Исторически первым и наиболее распространенным методом определения массового состава КЛ является исследование электрон-фотонной и мюонной компонент ШАЛ. Содержащаяся в экспериментальных данных сцинтилляционных установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon информация о числе вторичных заряженных частиц и, в частности, мюонов на уровне наблюдения, а также их локальных плотностях на определенном расстоянии от оси ливня открывает возможности к реализации указанного метода.

## 1. Задачи Монте-Карло моделирования сцинтилляционного эксперимента

Для определения массового состава КЛ по экспериментальным данным сцинтилляционных установок необходимо проведение Монте-Карло моделирования. На первом этапе планируется сгенерировать массив искусственных ШАЛ в программе CORSIKA [2]. Предполагается, что розыгрыш ливней будет проводиться в диапазоне энергий КЛ 0.1–1000 PeV, в пределах зенитных углов прихода оси ШАЛ  $\theta$  от 0 до 45° для следующих первичных частиц:  $p$ ,  $\gamma$ , He, CNO, Fe. В качестве моделей адронных взаимодействий при высоких энергиях будут использоваться QGSJET-II-04 [3], Sibyll 2.3d [4] и EPOS LHC [5]. Ожидается, что для каждой из вариаций будет создано по меньшей мере от 10 000 событий. На втором этапе с помощью инструментария Geant4 [6] будет смоделирован отклик сцинтилляционных установок на вторичные частицы искусственных ШАЛ. При этом будут использоваться разработанные ранее на основе данного инструментария модели установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon [7].

Сложность выполнения моделирования с помощью программ типа CORSIKA в случае диапазона энергий 10–1000 PeV заключается в слишком больших требованиях к вычислительным ресурсам и объемам файловых хранилищ. Чтобы сократить время расчетов и снизить объем данных, планируется использовать два метода аппроксимации — прореживания (thinning) и депрореживания (de-thinning). Первый метод входит в состав стандартных опций CORSIKA [2] и позволяет уменьшить число частиц в ливне за счет присвоения выжившим частицам веса  $w$  для учета энергии исключенных частиц. Второй метод, разработанный и примененный для целей установки Telescope Array [8], предполагает восстановление исключенной выборки частиц с полной

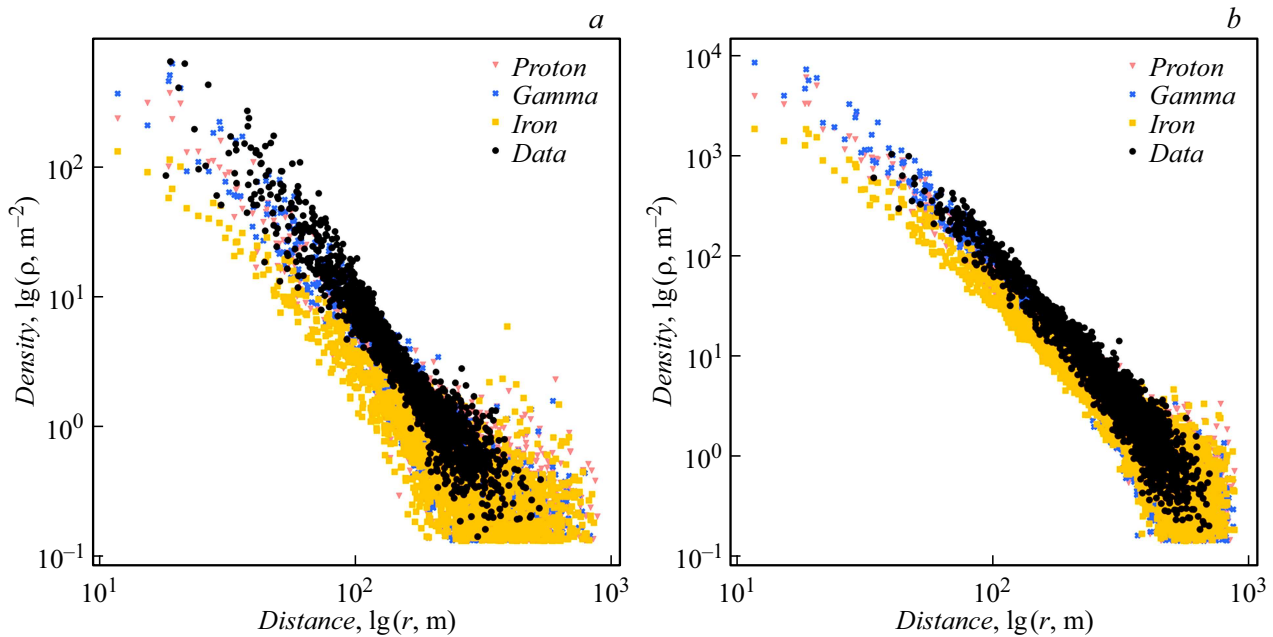
реконструкцией их параметров. Это позволяет достоверно моделировать отклик детекторов на события ШАЛ на уровне наблюдения.

Для определения массового состава КЛ и гамма-адронного разделения предполагается использовать подход, связанный с восстановлением числа мюонов в событии ШАЛ, и их относительном сравнении с общим фоном заряженных частиц в данном событии. Этот подход характеризуется тем, что число мюонов зависит от типа первичного ядра, и, как правило, чем тяжелее ядро, тем больше производство мюонов в ШАЛ. Например, на одном уровне первичной энергии число мюонов в ШАЛ, инициированном гамма-квантом, на порядок ниже, чем в ШАЛ, инициированном протоном. Один из возможных вариантов измерения числа частиц того или иного типа — измерение локальных плотностей на расстоянии 200 м от оси ливня. Тем не менее требуются большие массивы данных как экспериментальных, так и модельных, чтобы разработать метод идентификации массового состава для наших установок. В конечном итоге решение вышеозначенной задачи Монте-Карло моделирования позволит продвинуться в данном вопросе.

## 2. Предварительные результаты Монте-Карло моделирования для Tunka-Grande

На рисунке изображены пространственные распределения заряженных частиц ШАЛ, зарегистрированных наземными детекторами установки Tunka-Grande, в сравнении с данными предварительного моделирования для трех первичных составов. Экспериментальные распределения были получены по данным 5 сезонов наблюдений (2017–2022 гг.). Модельные расчеты были выполнены на оборудовании центра коллективного пользования „Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН“ [9] с использованием CORSIKA версии 7.7401 (модель адронных взаимодействий QGSJET-II-04) и Geant4 версии 11.0.2. Для каждого состава было смоделировано порядка 200–300 событий ШАЛ, при расчетах были использованы методы прореживания и депрореживания. Для прореживания были использованы следующие параметры: коэффициент прореживания  $\epsilon_{th} = 10^{-6}$ , максимальные веса для электронов и фотонов  $w_{max} = 10$  (10 PeV),  $w_{max} = 100$  (100 PeV) при  $r > r_{max}$ ,  $r_{max} = 100$  м. Мюоны и адроны ШАЛ в прореживании не участвовали.

Из рис. 1 следует, что смоделированные и экспериментальные данные находятся в достаточно хорошем согласии между собой. Компьютерное моделирование верно отражает процесс регистрации ШАЛ установкой Tunka-Grande при учете особенностей ее конструкции. Полученные программы моделирования можно использовать для оценки качества восстановления данных и тестирования применяемых методов реконструкции событий ШАЛ по данным Tunka-Grande. Помимо этого,



Пространственные распределения заряженных частиц по данным трех смоделированных составов ( $p$ ,  $\gamma$ , Fe) и эксперимента для установки Tunka-Grande при следующих параметрах:  $a$  —  $15.9 < \lg(E/eV) < 16.1$ ,  $\theta < 3^\circ$ ;  $b$  —  $16.9 < \lg(E/eV) < 17.1$ ,  $\theta < 3^\circ$ .

можно заключить, что у нас верно работают методы аппроксимации, и при моделировании ШАЛ в диапазоне высоких энергий мы можем получить достоверную статистику при меньших затратах компьютерных ресурсов.

## Заключение

В настоящее время накоплены экспериментальные данные за 5 лет эксплуатации установки Tunka-Grande и начат набор данных на строящейся установке TAIGA-Muon. Создание массива искусственных ШАЛ и проведение моделирования работы сцинтилляционных установок позволит приступить к изучению массового состава в диапазоне энергий 0.1–1000 PeV.

## 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-2020-0024, FZZE-2023-0004, FSUS-2020-0039, FSUS-2022-0015), Российским научным фондом (гранты 23-72-00016 (секция 2), 23-72-00054 (секция 3)), Иркутским государственным университетом (проект № 091-23-308).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev, E. Bonech, A. Borodin, A. Bulan, A. Chiavassa, D. Chernov, A. Dyacok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, E. Gress, T. Gress, A. Grinyuk, O. Grishin, A.D. Ivanova, A.L. Ivanova, N. Kalmykov, I. Yashin. Nucl. Instrum. Meth. A, **1039**, 167047 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047
- [2] 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](https://web.iap.kit.edu/corsika/physics_description/corsika_phys.pdf)
- [3] S. Ostapchenko. Phys. Rev. D, **83** 014018 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevD.83.014018
- [4] F. Riehn, R. Engel, A. Fedynitch, T.K. Gaisser, T. Stanev. Phys. Rev. D, **102**, 063002 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevD.102.063002
- [5] T. Pierog, Iu. Karpenko, J.M. Katzy, E. Yatsenko, K. Werner. Phys. Rev. C, **92**, 034906 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevC.92.034906
- [6] 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. Gracia Abril, 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. Kawabata, 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. Mora de Freitas, 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. Di Salvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J.P. Wellisch, T. Wenaus, D.C. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, D. Zschiesche. Nucl. Instrum. Meth. A, **506** (3), 250 (2003). DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8
- [7] M. Ternovoy, I. Kotovschikov, N. Budnev, A. Chiavassa, A. Dyachok, A. Gafarov, A. Garmash, V. Grebenyuk, O. Gress, T. Gress, O. Grishin, A. Grinyuk, D. Horns, A. Ivanova, N. Kalmykov, V. Kindin, S. Kiryuhin, R. Kokoulin, K. Kompaniets, E. Korosteleva, V. Kozhin, E. Kravchenko, A. Krykov, L. Kuzmichev, A. Lagutin, Y. Lemeshev, B. Lubsandorzhev, N. Lubsandorzhev, R. Mirgazov, R. Mirzoyan, R. Monkhoev, E. Osipova, A. Pakhorukov, A. Pan, M. Panasyuk, L. Pankov, A. Petrukhin, V. Poleschuk, E. Popova, A. Porelli, E. Postnikov, V. Prosin, V. Ptuskin, 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, Y. Suvorkin, L. Sveshnikova, V. Tabolenko, A. Tanaev, B. Tarashansky, L. Tkachev, M. Tluczykont, R. Togoo, N. Ushakov, A. Vaidyanathan, P. Volchugov, D. Voronin, R. Wischnevski, A. Zagorodnikov, D. Zhurov, I. Yashin. J. Phys. Conf. Ser., **1847**, 012047 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1847/1/012047
- [8] B.T. Stokes, R. Cady, D. Ivanov, J.N. Matthews, G.B. Thomson. Astropart. Phys., **35** (11), 759 (2012). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2012.03.004
- [9] Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН, <http://hpc.icc.ru>