

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. Пушкина 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

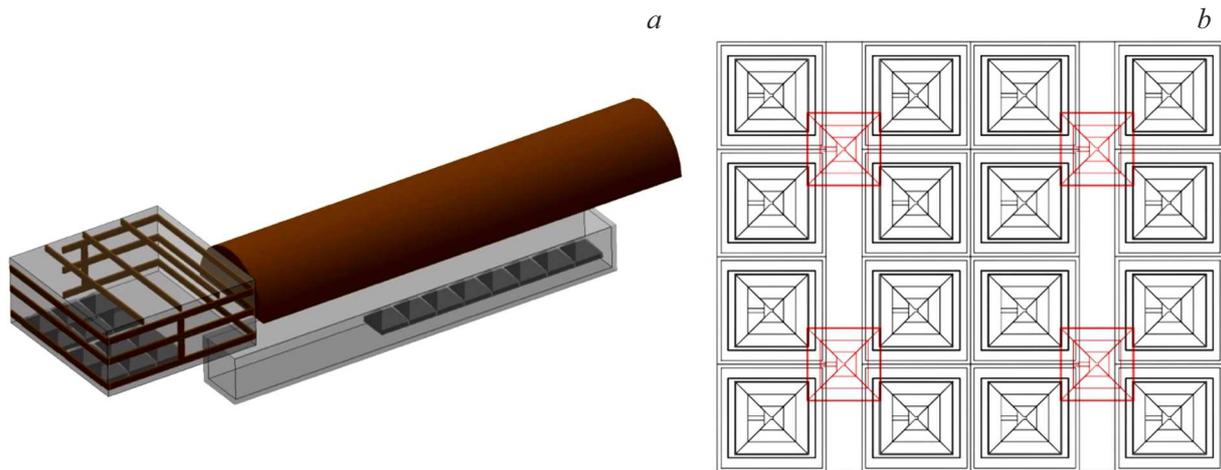


Рис. 1. Геометрия станции установки Tunka-Grande (a) и вид сверху на станцию установки TAIGA-Muon (b) в Geant4.

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-

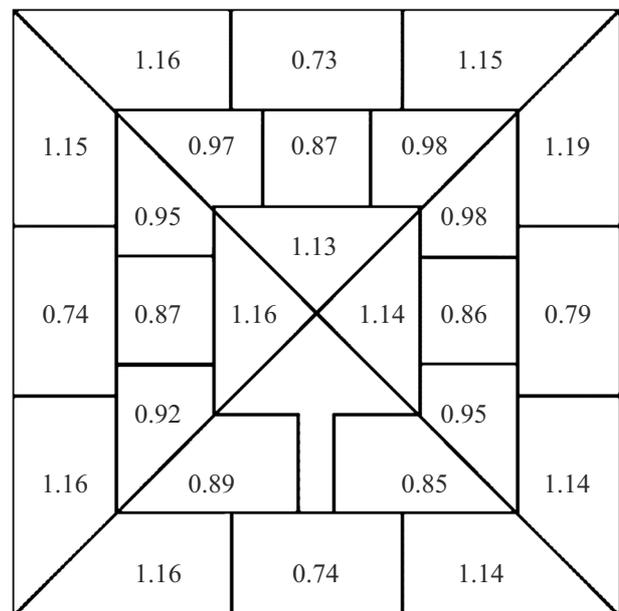


Рис. 2. Неоднородность светосбора счетчика TAIGA-Muon

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-

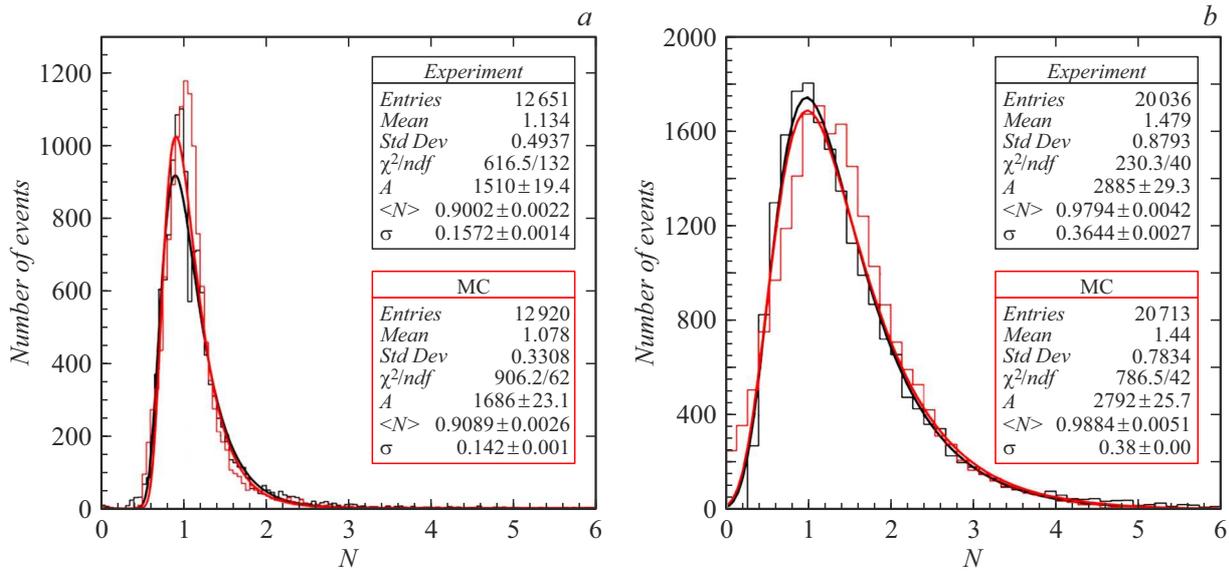


Рис. 3. Дифференциальные амплитудные распределения со сцинтилляционных счетчиков установок Tunka-Grande (a) и TAIGA-Muon (b) в сравнение со спектром энерговыделения в МК.

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.

- 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. Popescu, 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