

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ TUNKA-GRANDE

**М.Ю. Терновой, Р.Д. Монхоев, А.Л. Иванова от коллаборации TAIGA**

Научный исследовательский институт прикладной физики, Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия  
psychorative@gmail.com

### SIMULATION OF THE TUNKA-GRANDE SCINTILLATION ARRAY

**M.Yu. Ternovoy, R.D. Monkhoev, A.L. Ivanova from the TAIGA collaboration**

Applied Physics Institute of the Irkutsk State University, Irkutsk, Russia  
psychorative@gmail.com

**Аннотация.** Установка Tunka-Grande является частью экспериментального комплекса TAIGA. Она создана для изучения энергетического спектра и массового состава заряженных космических лучей в диапазоне 10–1000 ПэВ и поиска диффузного гамма-излучения с энергией свыше 10 ПэВ. В докладе описываются сцинтилляционная установка Tunka-Grande, общая схема ее моделирования на базе инструментария Geant4, а также некоторые результаты этого моделирования.

**Ключевые слова:** гамма-обсерватория TAIGA, Tunka-Grande, космические лучи, ШАЛ, Geant4, CORSIKA.

**Abstract.** The Tunka-Grande array is part of the TAIGA experimental complex located in the Tunka Valley (Buryatia Republic, Russia), 50 km from Lake Baikal. It was designed to study the energy spectrum and the mass composition of charged cosmic rays in the energy range 10–1000 PeV and to search for diffuse gamma rays above 10 PeV. This paper describes the Tunka-Grande scintillation array, the general scheme of its simulation based on the Geant4 toolkit, as well as some of the results obtained from simulations.

**Keywords:** TAIGA gamma observatory, Tunka-Grande, cosmic rays, air showers, Geant4, CORSIKA.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение заряженных космических лучей и космических гамма-лучей высоких и сверхвысоких энергий представляет большой интерес для понимания механизмов и природы их происхождения, что является важнейшей задачей современной астрофизики. Регистрация такого излучения осуществляется в настоящее время методом, основанным на свойстве первичных частиц генерировать в атмосфере Земли каскад вторичных частиц — так называемый широкий атмосферный ливень (ШАЛ). При развитии ШАЛ в нем возникает большое количество компонентов: электронно-фотонная, адронная и мюонная составляющие, а также сопутствующие черенковское, флюоресцентное излучения и радиоизлучение. Все эти компоненты могут достигать уровня наблюдения в атмосфере Земли и могут быть использованы для реконструкции свойств первичного космического излучения. В настоящее время большое значение имеет одновременное обнаружение и изучение многих параметров ШАЛ с помощью наземных гибридных систем, подобных экспериментальному комплексу, расположенному в Тункинской долине.

Астрофизические исследования в Тункинской долине были начаты в 1993 г. и в течение многих лет были направлены на изучение заряженных космических лучей, которое продолжается и сейчас в актуальных экспериментах. Одним из таких экспериментов является сцинтилляционная установка Tunka-Grande, являющаяся частью гибридного экспериментального комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic-ray physics and Gamma-ray Astronomy) [Budnev et al., 2021]. Установка работает с 2015 г. и способна регистрировать заряженные компоненты ШАЛ. Ее основными задачами являются изучение

энергетического спектра и массового состава заряженных космических лучей в диапазоне 10–1000 ПэВ и поиск диффузного гамма-излучения с энергией свыше 10 ПэВ.

Компьютерное моделирование по методу Монте-Карло является важной частью работы наземных детекторов космического излучения. Оно делает возможным изучение закономерностей развития ШАЛ, точное установление зависимости характеристик ШАЛ от параметров первичного космического излучения, оценку эффективности регистрации ШАЛ и качества восстановления параметров ШАЛ, а также разработку экспериментальных методов для идентификации типов первичных частиц. В стандартной процедуре работа детекторов моделируется в два этапа: на первом моделируется развитие ШАЛ, а на втором — отклик детектора на заряженные частицы ШАЛ. Для решения этих задач на установке Tunka-Grande в качестве программного обеспечения были выбраны пакеты CORSIKA [Heck et al., 1998] и Geant4 [Agostinelli et al., 2003].

### СЦИНТИЛЛЯЦИОННАЯ УСТАНОВКА TUNKA-GRANDE

Установка Tunka-Grande предназначена для регистрации заряженных составляющих ШАЛ и представляет собой массив из 380 сцинтилляционных счетчиков, расположенных на площади 0.5 км<sup>2</sup> [Monkhoev et al., 2017]. Счетчики объединены в 19 станций, каждая из которых разделена на наземную и подземную части, находящиеся в непосредственной близости друг от друга. Наземная часть станции состоит из 12 счетчиков общей площадью ~8 м<sup>2</sup> и регистрирует все заряженные частицы ШАЛ на уровне установки. Подземная часть расположена в бетонном контейнере под слоем грунта в 1.5 м и состоит

из 8 счетчиков общей площадью  $\sim 5 \text{ м}^2$ . Данная часть выделяет мюонную компоненту ШАЛ.

Сцинтилляционный счетчик имеет форму усеченной пирамиды, внутренняя поверхность которой покрыта тонким диффузно отражающим слоем белой эмали. Внутри в корпусе пластиковый сцинтиллятор NE102A в виде плоской пластины размером  $800 \times 800 \times 40 \text{ мм}$  и фотоумножитель (ФЭУ) Philips XP-3462. Геометрия счетчика позволяет добиться высокой однородности как по амплитуде сигналов, так и по времени прихода сигнала на выход ФЭУ по отношению к времени прохождения заряженной частицы через сцинтиллятор. Два счетчика на каждой станции имеют дополнительные ФЭУ, коэффициент усиления которых в 10 раз ниже штатного, что обеспечивает широкий диапазон линейности измеряемых сигналов. Ранее все эти счетчики использовались в экспериментах KASCADE-Grande и EAS-TOP, а в настоящее время счетчики данного типа используются в эксперименте NEVOD-EAS.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ TUNKA-GRANDE

Для моделирования отклика установки Tunka-Grande на заряженные частицы ШАЛ был использован программный инструмент Geant4, известный своим большим потенциалом. Он позволяет создавать точную компьютерную модель детекторов (или их массивов) и моделировать взаимодействие различных типов элементарных частиц с компонентами детектора. В компьютерной модели установки Tunka-Grande задана полная геометрия всех 19 станций, максимально приближенная к реальности (рис. 1). Для моделирования ШАЛ с первичными энергиями до 1000 ПэВ использовалась программа CORSIKA (v.77400) вместе с моделью адронных взаимодействий высоких энергий QGSJET-II-04 [Ostapchenko, 2011]. Все расчеты выполнялись на оборудовании центра коллективного пользования «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН» [<http://hpc.icc.ru>].

В процессе моделирования были получены примеры спектров энерговыделения в наземной части станции при прохождении через детектор одиночных вертикальных частиц разного типа: мюоны (черный спектр), фотоны (синий спектр) и нейтроны (зеленый спектр) с начальной энергией 1 ГэВ (рис. 2). Картина кажется довольно достоверной, поскольку отражает процессы ионизационных и радиационных потерь энергии. Следует отметить, что в модели не предусмотрена работа считывающей электроники массива Tunka-Grande. Окончательный анализ отклика сцинтилляционных счетчиков, помимо флуктуаций потерь энергии в сцинтилляционной пластине, предусматривает неоднородность светосбора в дюралюминиевом корпусе.

Были получены также распределения числа мюонов в зависимости от энергии первичных частиц (рис. 3). На рисунке представлены суммы зарегистрированных частиц в подземных частях всех 19 станций для каждого события ШАЛ, инициированного первичным протоном (черные точки), ядром железа (синие точки) или гамма-квантом (зеленые точки). События без каких-либо обнаруженных мюонов

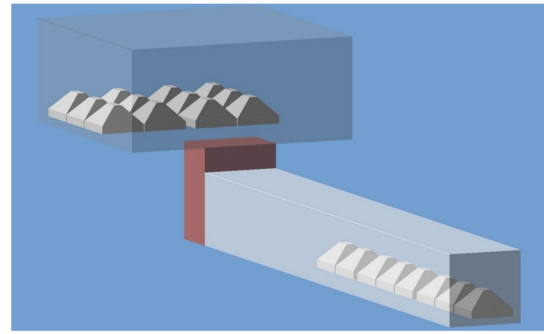


Рис. 1. 3D-визуализация станции Tunka-Grande

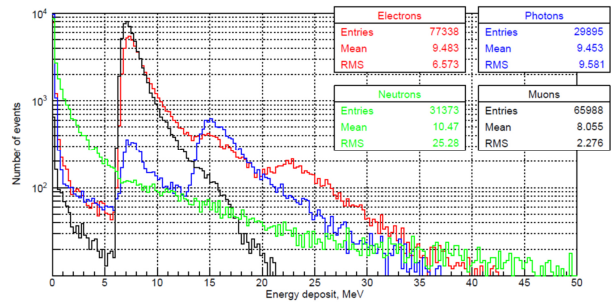


Рис. 2. Смоделированный спектр энерговыделения для вертикально падающих частиц

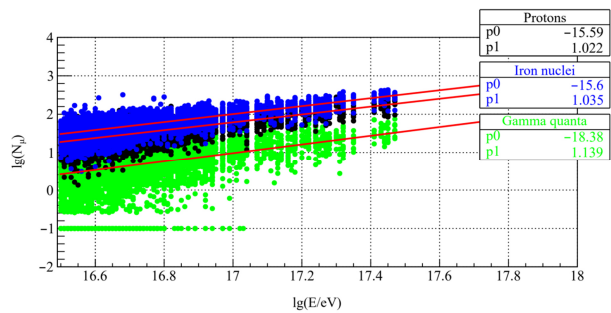


Рис. 3. Смоделированные распределения числа мюонов

нанесены на график с  $\log(N_\mu) = -1$ , чтобы они были видны на логарифмической оси. Распределения аппроксимируются функцией

$$\log(N_\mu) = p_0 + p_1 \log(E / \text{eV}).$$

Число мюонов в ШАЛ является важной характеристикой, позволяющей оценить тип первичной космической частицы. Из полученных результатов следует, что разделение гамма-кандидатов и прочего фона заряженных космических лучей по экспериментальным данным Tunka-Grande возможно с эффективностью не хуже 50 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание Geant4-модели установки Tunka-Grande имеет большое значение и совместно с использованием пакета CORSIKA дает возможность повысить качество информации, получаемой в натурном эксперименте. В настоящее время имеются экспериментальные данные за неполные пять лет эксплуатации установки, что вместе с компьютерным моделированием позволит продвинуться в решении следующих задач:

1. Значительно повысить точность измерения параметров ШАЛ и первичного космического излучения

ния и тем самым получить качественные результаты по энергетическому спектру космических лучей в диапазоне энергий 10–1000 ПэВ.

2. Разработать метод идентификации первичных частиц, что позволит детально изучить массовый (элементный) состав космических лучей и начать поиск диффузных гамма-лучей в диапазоне энергий 10–1000 ПэВ.

Работа была выполнена на Астрофизическом комплексе МГУ–ИГУ. Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 19-52-44002, 19-32-60003), Российским научным фондом (грант 19-72-20067 (секция 2)), Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024 и FSUS-2020-0039).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Agostinelli S., et al. (GEANT4 Collaboration). Geant4 — a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A*. 2003. Vol. 506, iss. 3. P. 250–303.

Budnev N., et al. (TAIGA Collaboration). TAIGA — an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics, cosmic ray physics and gamma-ray astronomy. *PoS ICRC2021*. 2021. Vol. 395, iss. 731. 9 p.

Heck D., et al. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Karlsruhe, 1998. 90 p. (Tech. Rep. FZKA 6019).

Monkhoev R., et al. (Tunka Collaboration). The Tunka-Grande Experiment. *JINST*. 2017. Vol. 12, iss. 06, C06019. 6 p.

Ostapchenko S. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: I. QGSJET-II model. *Phys. Rev. D*. 2011. Vol. 83, 014018. 32 p.

URL: <http://hpc.icc.ru> (дата обращения: 23 мая 2022 г.).