

## ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА TUNKA-GRANDE

<sup>2</sup>Р.Д. Монхоев, <sup>2</sup>Н.М. Буднев, <sup>2</sup>Д.М. Воронин, <sup>2</sup>А.Р. Гафаров, <sup>2</sup>О.А. Гресс, <sup>2</sup>Т.И. Гресс,  
<sup>2</sup>О.Г. Гришин, <sup>2</sup>А.Н. Дячок, <sup>1</sup>С.Н. Епимахов, <sup>2</sup>Д.П. Журов, <sup>2</sup>А.В. Загородников, <sup>2</sup>В.Л. Зурбанов,  
<sup>2</sup>А.Л. Иванова, <sup>1</sup>Н.Н. Калмыков, <sup>2</sup>Ю.А. Казарина, <sup>1</sup>Е.Е. Коростелева, <sup>1</sup>В.А. Кожин, <sup>1</sup>Л.А. Кузьмичев,  
<sup>2</sup>В.В. Ленюк, <sup>3</sup>Б.К. Лубсандоржиев, <sup>1</sup>Н.Б. Лубсандоржиев, <sup>2</sup>Р.Р. Миргазов, <sup>2,4</sup>Р. Мирзоян, Э.А. <sup>1</sup>Осипова,  
<sup>2</sup>А.Л. Пахоруков, <sup>1</sup>М.И. Панасюк, <sup>2</sup>Л.В. Паньков, <sup>2</sup>В.А. Поleshchuk, <sup>1</sup>Е.Г. Попова, <sup>1</sup>Е.Б. Постников,  
<sup>1</sup>В.В. Просин, <sup>5</sup>В.С. Птускин, <sup>2</sup>А.А. Пушкин, <sup>2</sup>В.С. Самолига, <sup>2</sup>Ю.А. Семеней, <sup>1</sup>Л.Г. Свешникова,  
<sup>1</sup>А.А. Силаев, <sup>1</sup>А.А. Силаев (мл.), <sup>1</sup>А.В. Скурихин, <sup>1</sup>В.П. Сулаков, <sup>2</sup>В.А. Таболенко, <sup>2</sup>О.Л. Федоров,  
<sup>2</sup>Д.О. Черных, <sup>6</sup>А. Чиавасса, <sup>7</sup>К. Шпиринг.

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт М. Планка, Мюнхен, Германия

<sup>5</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Россия

<sup>6</sup>Туринский университет, Турин, Италия

<sup>7</sup>ДЭЗИ, Цойтен, Германия

makay08@rambler.ru

## LATEST RESULTS OF THE TUNKA-GRANDE EXPERIMENT

<sup>2</sup>R.D. Monkhoev, <sup>2</sup>N.M. Budnev, <sup>2</sup>D.M. Voronin, <sup>2</sup>A.R. Gafarov, <sup>2</sup>O.A. Gress, <sup>2</sup>T.I. Gress, <sup>2</sup>O.G. Grishin,  
<sup>2</sup>A.N. Dyachok, <sup>1</sup>S.N. Epimakhov, <sup>2</sup>D.P. Zhurov, <sup>2</sup>A.V. Zagorodnikov, <sup>2</sup>V.L. Zurbanov, <sup>2</sup>A.L. Ivanova,  
<sup>1</sup>N.N. Kalmykov, <sup>2</sup>Yu.A. Kazarina, <sup>1</sup>E.E. Korosteleva, <sup>1</sup>V.A. Kozhin, <sup>1</sup>L.A. Kuzmichev, <sup>2</sup>V.V. Lenok,  
<sup>3</sup>B.K. Lubsandorzhiiev, <sup>1</sup>N.B. Lubsandorzhiiev, <sup>2</sup>R.R. Mirgazov, <sup>2,4</sup>R. Mirzoyan, <sup>1</sup>E.A. Osipova,  
<sup>2</sup>A.L. Pakhorukov, <sup>1</sup>M.I. Panasyuk, <sup>2</sup>L.V. Pankov, <sup>2</sup>V.A. Poleshchuk, <sup>1</sup>E.G. Popova, <sup>1</sup>E.B. Postnikov,  
<sup>1</sup>V.V. Prosin, <sup>5</sup>V.S. Ptuskin, <sup>2</sup>A.A. Pushnin, <sup>2</sup>V.S. Samoliga, <sup>2</sup>Y.A. Semeny, <sup>1</sup>L.G. Sveshnikova, <sup>1</sup>A.A. Silaev,  
<sup>1</sup>A.A. Silaev (Jr), <sup>1</sup>A.V. Skurikhin, <sup>1</sup>V.P. Sulakov, <sup>2</sup>V.A. Tabolenko, <sup>2</sup>O.L. Fedorov, <sup>2</sup>D.O. Chernykh,  
<sup>6</sup>A. Chiavassa, <sup>7</sup>C. Spiering

<sup>1</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Max Plank Institute for Physics, Munich, Germany

<sup>5</sup>Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Russia

<sup>6</sup>Department of General Physics, Torino University and National Institute for Nuclear Physics (INFN), Torino, Italy

<sup>7</sup>DESY, 15738 Zeuthen, Germany

---

**Аннотация.** Сцинтилляционная установка Tunka-Grande входит в состав единого экспериментального комплекса, расположенного в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия) в 50 км от озера Байкал. Данный комплекс также включает в себя установку Тунка-133 и установку Тунка-Rex. Задачей совместной работы установок является изучение энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в диапазоне энергий  $10^{16}$ – $10^{18}$  эВ, а также поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий  $5 \cdot 10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17}$  эВ.

Мы приводим описание экспериментального комплекса и представляем результаты работы установки Tunka-Grande. Также указываются перспективы исследования космических лучей при одновременной регистрации черенковской и заряженной компонент и радиоизлучения ШАЛ. В заключении обсуждаем подход к изучению диффузного гамма-излучения.

**Abstract.** The Tunka-Grande scintillator array is a part of the single experimental complex located in the Tunka Valley (Republic of Buryatia, Russia) about 50 km from Lake Baikal. This complex also includes the Tunka-133 array and Tunka-Rex array. The purpose of this complex is the study of the primary cosmic rays energy spectrum and mass composition in the energy range from  $10^{16}$ – $10^{18}$  eV and search for the diffuse gamma-rays in the energy range from  $5 \cdot 10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17}$  eV.

We describe the design of the experimental complex and present the results of the Tunka-Grande operation. The prospects of studying the primary cosmic rays during simultaneous registration of the radio emission, Cherenkov and charged particle components of extensive air showers are provided. Finally we discuss an approach for diffuse gamma-rays study.

---

### Введение

Уникальный способ регистрации высокоэнергетического космического излучения основан на способности первичных частиц генерировать каскады вторичных частиц в атмосфере Земли, так назы-

ваемый широкий атмосферный ливень (ШАЛ). При развитии такого ливня в нем возникает большое количество составляющих и до уровня наблюдения на земле, как правило, доходят электронно-фотонная, адронная и мюонная компоненты, черенковское, ионизационное и радиоизлучение. Все эти

компоненты могут быть использованы для определения свойств первичного излучения.

Одновременное исследование многих характеристик ШАЛ с использованием гибридных наземных установок в настоящее время является ключевым подходом к изучению космических лучей высоких и сверхвысоких энергий. К числу таких установок относятся и экспериментальный комплекс [Budnev et al., 2017] расположенный в Тункинской долине ( $\varphi=51^{\circ} 48' 47.5'' \text{ N}$ ,  $\lambda=103^{\circ} 04' 16.3'' \text{ E}$ ,  $h=675 \text{ м}$  над уровнем моря), в 50 км от озера Байкал. На данный момент в составе комплекса с целью изучения заряженных космических лучей работает черенковская установка Тунка-133 [Berezhnev et al., 2012], сцинтилляционная установка Тунка-Гранде [Monhoev et al., 2017] и установка, регистрирующая радиоизлучение ШАЛ, Tunka-Rex [Bezyazeev et al., 2016].

### Сцинтилляционная установка Tunka-Grande

Установка Tunka-Grande представляет собой массив сцинтилляционных счетчиков, объединенных в 19 станций, каждую из которых условно можно представить в виде двух частей: наземной и подземной. Первая, состоящая из 12 счетчиков с общей площадью порядка  $8 \text{ м}^2$ , регистрирует все заряженные частицы ШАЛ на уровне установки, вторая же, состоящая из 8 счетчиков общей площадью порядка  $5 \text{ м}^2$ , расположена под слоем грунта 1.5 м и предназначена для выделения мюонной компоненты ШАЛ (рис. 1). Обе части находятся в непосредственной близости друг от друга. Общая площадь установки составляет  $0.8 \text{ км}^2$ .

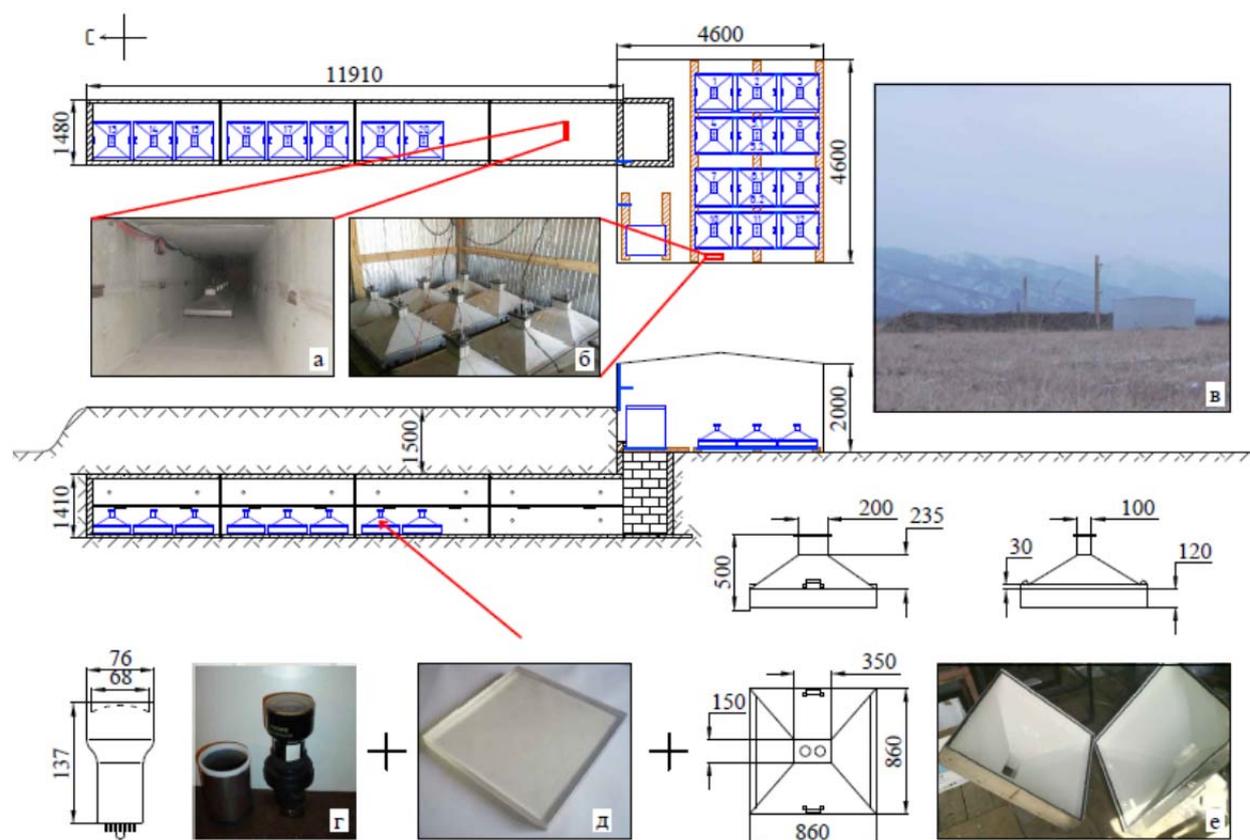


Рис. 1. Схематичное изображение сцинтилляционной станции: а — наземная часть, б — подземная часть, в — общий вид станции, г — фотоэлектронный умножитель XP-3462, д — сцинтиллятор NE102A в виде пластины размером  $80 \times 80 \times 40 \text{ мм}^3$ , е — светонепроницаемый дюралюминиевый кожух; части г, д, е — элементы сцинтилляционного счетчика

### Совместная работа установок Тунка-133, Tunka-Grande и Tunka-Rex

Совместные наблюдения основаны на том, что базовые блоки электроники отдельно взятого кластера установки Тунка-133 и сцинтилляционной станции установки Tunka-Grande, предназначенных для отбора событий и предварительной обработки данных, связаны между собой и могут работать как по внутренним, так и по внешним триггерным условиям. Помимо этого к каждой системе сбора данных

подключены соответствующие антенны установки Tunka-Rex. Таким образом, установки формируют единый комплекс для исследования космического излучения.

Предварительно обработанная информация от кластеров и сцинтилляционных станций передается в центр сбора данных, где производится ее последующий анализ и хранение, а также производится контроль за температурой воздуха внутри контейнеров, содержащих электронику установок (рис. 2).

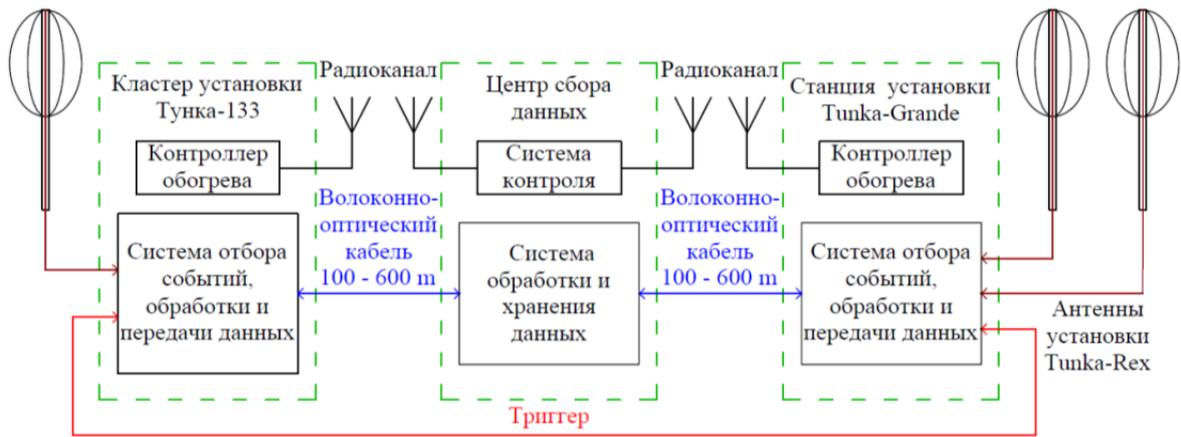


Рис. 2. Блок-схема электроники комплекса установок Тунка-133, Tunka-Grande и Tunka-Rex

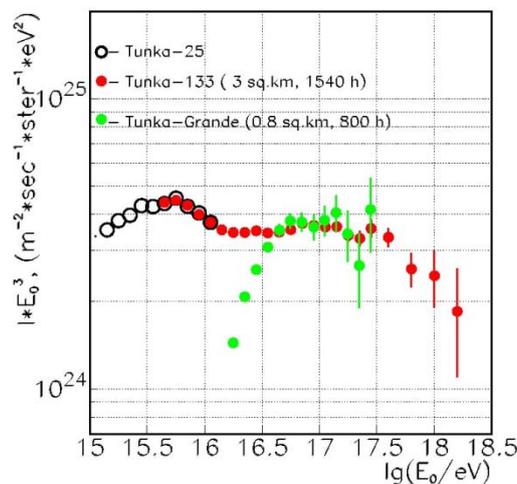


Рис. 3. Восстановленный энергетический спектр по данным Тунка-25, Тунка-133, Tunka-Grande

**Полученные результаты и перспективы исследования космических лучей и поиска диффузного гамма-излучения**

Запуск в набор данных установки Tunka-Grande совместно с установками Тунка-133 и Tunka-Rex был произведен в конце 2015 г. За время работы было зарегистрировано порядка 3500 событий с энергий выше  $10^{17}$  эВ. На рис. 3. приведен энергетический спектр, восстановленный по данным Tunka-Grande за время наблюдения порядка 800 ч. Дальнейшие наблюдения значительно повысят информативность получаемых данных. Помимо этого возможность выделять ШАЛ обедненных мюонами позволяет приступить к поиску диффузного гамма-излучения и определить верхний предел на поток первичных фотонов в диапазоне энергии  $5 \cdot 10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17}$  эВ.

**Заключение**

Работа установки Tunka-Grande совместно с установками Тунка-133 и Tunka-Rex в ближайшее время позволит детально исследовать энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей в диапазоне энергий  $10^{16}$ – $10^{18}$  эВ – области перехода от галактических к внегалактическим космическим лучам, а также определить верхний

предел на поток диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий  $5 \cdot 10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17}$  эВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор 14B25.31.0010, 2017-14-595-0001, № 3.9678.2017/8.9, №3.904.2017/4.6, 3.6787.2017/7.8, 1.6790.2017/7.8), РФФИ (16-02-00738, 16-32-00329, 16-32-00344\17, 17-02-00905, 16-32-00344\17), РНФ (грант № 15-12-20022), ИГУ (индивидуальный исследовательский грант № 110-16-602).

**Список литературы**

Berezhnev S. et al. (Tunka Collaboration). The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: status of 2011 // NIM A692. 2012. P. 98.  
 Bezyazeev P.A. et al. (Tunka-Rex Collaboration). Radio measurements of the energy and the depth of the shower maximum of cosmic-ray air showers by Tunka-Rex // J. Cosmology and Astroparticle Phys. 01. 2016. 052.  
 Budnev N. et al. (TAIGA Collaboration). The TAIGA experiment: From cosmic-ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley // NIM A845. 2017. P. 330.  
 Monhoev R. et al. (Tunka Collaboration). The Tunka-Grande Experiment: Status and Prospects // Bull. Russian Academy of Sci.: Phys. 2017. V. 81. P. 468.