Сцинтилляционные эксперименты в составе астрофизического комплекса TAIGA

Р.Д. Монхоев* (от имени коллаборации TAIGA)

Иркутский государственный университет, Научно-исследовательский институт прикладной физики Россия, 664003, г. Иркутск, бул. Гагарина, 20

(Поступила в редакцию 07.11.2022; подписана в печать 03.12.2022)

Сцинтилляционные установки Tunka–Grande и TAIGA–Muon входят в состав астрофизического комплекса TAIGA. Данный комплекс располагается в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), в 50 км от озера Байкал и нацелен на решение фундаментальных вопросов физики космических лучей и гамма-астрономии.

В статье приведен обзор установок Tunka–Grande и TAIGA–Muon. Представлены научные результаты, полученные по экспериментальным данным установки Tunka–Grande за первые 5 лет ее работы. Указаны перспективы исследования первичного космического излучения в диапазоне энергии $10^{14} - 10^{18}$ эВ.

РАСS: 96.50.S-, 96.50.sd, 95.55.Vj УДК: 524.1. Ключевые слова: космические лучи, гамма-астрономия, установка Tunka-Grande, установка TAIGA-Muon.

введение

Исследование первичных космических лучей (ПКЛ) высоких и сверхвысоких энергий представляет большой интерес с точки зрения понимания механизмов и природы их происхождения, что является одной из важнейших задач современной астрофизики. Регистрация излучения с энергией выше $\sim 10^{15}$ эВ осуществляется при помощи метода, основанного на свойстве ПКЛ порождать каскад вторичных частиц в земной атмосфере, так называемый широкий атмосферный ливень (ШАЛ). До энергии $\sim 10^{15}$ эВ изучение ПКЛ возможно проводить как методом детектирования ШАЛ, так и при помощи прямых измерений, выполняемых с использованием высотных баллонов или искусственных спутников Земли. Так, одним из примеров 2-х разных подходов к исследованию ПКЛ в одном энергетическом диапазоне и при этом согласованных между собой научных результатов (см. рис. 2) могут служить эксперименты HAWC [1] и NUCLEON [2]. В своей основе ШАЛ содержит электрон-фотонную, адронную, мюонную и нейтринную компоненты и является источником черенковского, ионизационного и радиочастотного излучений. Все эти составляющие, за исключением нейтрино, могут быть зарегистрированы наземными установками, а их восстановленные характеристики использованы для определения свойств ПКЛ. На сегодняшний день преимущественное значение имеет одновременная регистрация и исследование многих параметров ШАЛ с помощью гибридных установок, к числу которых относится и астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) [3], расположенный в Тункинской долине (51°48'35" с.ш., 103°04'02" в.д., 675 м над уровнем моря), в 50 км от озера Байкал. На данный момент комплекс включает в себя широкоугольные черенковские установки Тунка-133 [4]

и TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) [5], сцинтилляционные установки Tunka-Grande и TAIGA-Миоп и атмосферные черенковские телескопы установки TAIGA-IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) [6]. К основным научным задачам комплекса относятся:

- Исследование механизма генерации гаммаквантов в известных локальных источниках в области энергии выше 3 × 10¹³ эВ;
- Поиск новых локальных источников гаммаквантов в области энергии выше 3×10^{13} эВ;
- Поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий 10¹⁴ – 10¹⁸ эВ;
- Изучение энергетического спектра и массового состава заряженных ПКЛ (протоны и более тяжелые ядра) в диапазоне энергий 10¹⁴ – 10¹⁸ эВ.

В статье описаны предпосылки создания, структура, статус и направление исследований установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon. Представлены научные результаты в виде дифференциального энергетического спектра ПКЛ и ограничения на поток диффузных гамма-квантов в области энергии $10^{16} - 10^{18}$ эВ, полученные по экспериментальным данным установки Tunka-Grande за первые 5 лет ее работы. Обсуждаются перспективы изучения ПКЛ по данным установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon в интервале энергии $10^{14} - 10^{18}$ эВ.

1. **YCTAHOBKA TUNKA-GRANDE**

История создания астрофизического комплекса TAIGA берет свое начало в 1992 г., когда на льду озера Байкал в рамках Байкальского нейтринного проекта [7] были проведены первые эксперименты по возможности регистрации черенковскго света ШАЛ 4-мя

^{*} makaay08@rambler.ru

гибридными фотоприемниками КВАЗАР-370 с диаметром фотокатода 37 см [8]. Через год детекторы на основе уже модифицированных фотоприемников КВАЗАР-370G были перевезены в Тункинскую долину с целью создания широкоугольной черенковской установки для изучения ПКЛ, впоследствии получившей название Тунка-4 [9]. Успешная работа этого относительно маленького и простого эксперимента привела к тому, что в 1996-1999 гг. была развернута промежуточная установка Тунка-13, а затем в 2000-2005 гг. — полноценная установка Тунка-25 [10], состоящая уже из 25 фотоприемников, равномерно размещенных на площади ~0.1 км². На новой установке были получены важные результаты как по методике восстановления параметров ШАЛ, так и по энергетическому спектру ПКЛ в интервале $\sim 10^{15} - 10^{17}$ эВ. На следующем этапе в 2009 г. была запущена в набор данных установка Тунка-133 [4] для проведения исследований в области $10^{16} - 10^{18}$ эВ. В ее составе находилось 133 детектора, которые были сгруппированы в 19 кластеров и размещены на площади ~ 1 км². В 2010-2012 гг. установка была доукомплектована 6-ю внешними кластерами и в настоящее время содержит уже 175 оптических детекторов на площади $\sim 3 \text{ км}^2$.

При решении задач физики космических лучей и гамма-астрономии основным недостатком черенковских установок является тот факт, что наблюдения могут проводиться только в ясные, безлунные ночи. Вследствие этого эффективное время их работы, как правило, не превышает ~10% календарного года. В тоже время сцинтилляционные детекторы частиц достаточно просты в использовании, всепогодны и позволяют выполнять измерения круглосуточно в течение всего года. Дополнительно они могут давать важную информацию о мюонной компоненте ШАЛ, которая весьма чувствительна к сорту первичных ядер и эффективна для выделения гамма-квантов из фона заряженных ПКЛ. В связи с этим в 2016 г. была введена в эксплуатацию и включена в состав астрофизического комплекса TAIGA установка Tunka-Grande. Главными задачами эксперимента являются изучение энергетического спектра и массового состава заряженных ПКЛ совместно с установкой Тунка-133, а также поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ \Rightarrow B.

Установка Tunka–Grande представляет собой массив сцинтилляционных счетчиков, объединенных в 19 станций и размещенных на площади ~ 0.5 км² со средним межстанционным расстоянием ~ 200 м (см. рис. 1). Каждая станция состоит из 2-х частей: наземной и подземной. Первая включает в себя 12 счетчиков с общей площадью 7.68 м² и регистрирует все заряженные частицы ШАЛ на уровне наблюдения, вторая содержит 8 счетчиков общей площадью 5.12 м², расположена под слоем грунта 1.5 м и нацелена на выделение мюонной компоненты ШАЛ. Пороговая энергия для вертикальных мюонов при этом составляет ~ 0.5 ГэВ. Обе части находятся в непосредственной близости друг от друга и на расстоянии не более 30 м от центра ближайшего кластера установки Тунка-133.

Сцинтилляционный счетчик состоит из светособирающего дюралюминиевого кожуха толщиной 1 мм в виде усеченной пирамиды, внутренняя поверхность которого покрыта тонким диффузно-отражающим слоем белой эмали. Внутри кожуха размещаются пластмассовый сцинтиллятор NE102A, выполненный в форме плоской пластины размером 800 мм×800 мм×40 мм, и на расстоянии ~ 30 см от него фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) PHOTONIS XP-3462. На двух центральных счетчиках каждой станции для расширения ее динамического диапазона регистрируемых сигналов располагаются дополнительные ФЭУ с коэффициентом усиления ~ в 10 раз меньшим по сравнению со стандартным. Данный тип детектора в настоящее время также применяется на установке НЕВОД-ШАЛ [11], а ранее успешно использовался в экспериментах KASCADE-Grande [12] и EAS-TOP [13]. В работе [14] подробно исследованы параметры аналогичных счетчиков и показано, что их характеристики позволяют эффективно выделять сигналы от ШАЛ и обеспечивают высокую однородность по амплитуде сигнала по всей плошали сцинтиллятора.

Электроника станций обеспечивает оцифровку формы сигналов со счетчиков 12-битным АЦП с частотой дискретизации 200 МГц, отбор событий со станций по заданному внутреннему или внешнему триггерным условиям, а также передачу информации в единый центр сбора данных. В работе [15] приведено детальное описание аппаратно-программного комплекса установки.

2. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ УСТАНОВКИ TUNKA-GRANDE

В статье представлены дифференциальный энергетический спектр ПКЛ и ограничение на поток диффузных гамма-квантов в области энергии $10^{16} - 10^{18}$ эВ. Результаты получены по данным первых 5 сезонов наблюдений. Общее время работы установки Tunka-Grande составило ~8900 ч. При этом было зарегистрировано ~240000 ШАЛ с энергией ПКЛ выше 10^{16} эВ, из них ~2000 ливней с энергией ПКЛ выше 10^{17} эВ.

2.1. Энергетический спектр ПКЛ

Изучение энергетического спектра и массового состава ПКЛ в диапазоне энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ имеет решающее значение для понимания механизмов и природы их происхождения, т.к. именно в этой области предполагается переход от галактических к внегалактическим космическим лучам.

На рис. 2 приведены восстановленный по данным установки Tunka-Grande энергетический спектр ПКЛ и его сравнение с результатами экспериментов



Рис. 1. Установка Tunka-Grande: *a* — расположение станций относительно оптических детекторов установки Тунка-133 (зеленные квадраты — станции, синие кольца — оптические детекторы, черными линиями выделены 25 кластеров установки Тунка-133), *б* — внешний вид станции, *в* — схематичное расположение сцинтилляционных счетчиков в станции

NUCLON [16], HAWC [1], TAIGA-HiSCORE [17], Тунка-133 [18], KASCADE-Grande [19] и Pierre Auger Observatory [20].



Рис. 2. Дифференциальные энергетические спектры ПКЛ

Из рис. 2 следует, что полученный спектр хорошо согласуется с результатами других экспериментов: на

нижнем крае с установкой TAIGA-HiSCORE, в диапазоне $10^{16} - 10^{18}$ эВ — с установками Тунка-133 и KASCADE-Grande, на верхнем крае — с гигантской установкой Pierre Auger Observatory. Здесь также важно отметить, что высокогорные HAWC и спутниковые NUCLON измерения не противоречат данным черенковской установки TAIGA-HiSCORE. Все приведенные спектры в области $10^{16} - 10^{18}$ эВ демонстрируют две статистически обеспеченные особенности (изменение наклона) при энергии ~2 × 10^{16} эВ и в интервале $10^{17} - 3 × 10^{17}$ эВ. И если 2-ой излом может быть связан с переходом от галактических к внегалактическим ПКЛ, то 1-ый в настоящее время не имеет астрофизического объяснения.

2.2. Ограничение на поток диффузных гамма-квантов

Космическое диффузное гамма-излучение — потенциальный источник информации о происхождении и распространении ПКЛ. Гипотетически поток таких астрофизических фотонов может идти от множества неразрешенных локальных объектов [21], быть результатом взаимодействия заряженных ПКЛ с межзвездным веществом [22] или электромагнитных каскадов, вследствие реакции Грейзена-Зацепина-Кузьмина [23]. В настоящее время по данным наземных установок в области энергии $\sim 10^{15}-10^{20}$ эВ не обнаружено диффузных гамма-квантов и поставлены верхние пределы на их поток.

По данным установки Tunka–Grande был проведен поиск гамма–излучения в диапазоне энергии ~ 10^{16} – 10^{18} эВ. Основная идея заключалась в анализе обедненных мюонами событий. Это обусловлено тем, что число мюонов в ШАЛ, порожденном гамма–квантом, на порядок меньше, чем в адронном ливне. В ходе исследования не было обнаружено гамма–подобных событий и, в связи с этим, были определено верхнее ограничение на их поток. На рис. 3 показаны полученные результаты в сравнении с аналогичными ограничениями экспериментов CASA–MIA [24], KASCADE [25], ШАЛ–МГУ [26], KASCADE–Grande [25], Pierre Auger Observatory [27] и Telescope Array [28].



Рис. 3. Интегральные ограничения на поток диффузных гамма-квантов

На рис. 3 видно, что верхние пределы по данным установки Tunka–Grande по порядку величины находятся на одном уровне с измерениями экспериментов KASCADE–Grande, ШАЛ–МГУ и Pierre Auger Observatory.

3. **УСТАНОВКА ТАІGA-MUON**

Для эффективного исследования массового состава ПКЛ и выделения гамма-квантов из фона первичных заряженных частиц суммарная площадь детекторов мюонов должна быть не менее ~ 0.1% от общей площади установки. Одним из рекордных показателей этого соотношения (~ 4%) и при этом высокой значимости получаемых научных результатов может служить действующий эксперимент LHASSO [29]. В связи с этим для увеличения эффективной площади установки Tunka–Grande, а так же с целью понижения энергетического порога регистрации ПКЛ до ~ 10^{14} эВ, в 2019 г. в рамках развития астрофизического комплекса TAIGA были начаты работы по строительству сцинтилляционной установки TAIGA–Muon. Предполагаемая общая площадь новых детекторов электронфотонной и мюонной компонент ШАЛ составит порядка 2000 м². На данный момент развернуто 3 кластера установки (см. рис. 4).

Расположение и конфигурация кластеров установки TAIGA-Muon основаны на модельных расчетах, приведенных в работе [30], устройство аппаратнопрограммного комплекса описано в работе [31]. Каждый кластер в своем составе имеет 8 наземных сцинтилляционных счетчиков для регистрации всех заряженных частиц ШАЛ на уровне установки и 8 подземных для регистрации мюонной компоненты. При этом счетчики геометрически расположены парами: наземные строго над подземными. Все 8 пар размещены по периметру квадрата со стороной 5 м. Расстояние между соседним парами 1 м. Необходимо отметить, что конструкция кластера не предусматривает прямого доступа к подземной части, толщина грунта над которой составляет ~ 1.7 м. Каждый счетчик установки TAIGA-Muon [32] состоит из нержавеющего стального кожуха, внутри которого располагаются сборные сцинтилляционные пластины переменной толщины (10 мм в центре детектора и 20 мм на его периферии) на основе полистирола с добавлением 1.5% ртерфенила и 0.01% РОРОР, пластины-световоды с сечением 5 × 20 мм (акриловое стекло с переизлучающей добавкой BBQ), диффузные отражатели и фотоэлетронный умножитель ФЭУ-85. Увеличение толщины пластин к периферии счетчиков и использование пластин-световодов позволило добиться приемлемой однородности амплитуд сигналов из разных частей детектора. Общая площадь счетчика составляет ~1 м².

4. ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПКЛ

Установки Tunka–Grande и TAIGA–Muon обладают большим потенциалом при исследовании энергетического спектра и массового состава ПКЛ, поиска диффузного гамма–излечения и выделения локальных областей с избытком гамма–квантов в диапазоне энергий $10^{14} - 10^{18}$ эВ:

- Установка Tunka–Grande круглосуточно работает в режиме набора данных практически в течение всего календарного года и имеет сравнительно большую площадь. Полученные и представленные в статье научные результаты показывают ее высокую эффективность при изучении ПКЛ в диапазоне энергий 10¹⁶ 10¹⁸ эВ.
- Создание установки TAIGA-Muon, с одной стороны, фактически увеличит эффективную площадь установки Tunka-Grande и повысит информативность получаемых данных в диапазоне



Рис. 4. Установка TAIGA-Muon: *a* — расположение кластеров относительно станций установки Tunka-Grande (зеленные квадраты — станции, красные круги — кластеры), *б* — внешний вид кластера

энергий $10^{16} - 10^{18}$ эВ, с другой стороны — понизит порог регистрации ПКЛ до $\sim 10^{14}$ эВ.

Уникальная особенность астрофизического комплекса TAIGA состоит в объединении в единую систему установок с детекторами разного типа, что предполагает гибридный подход к исследованию ПКЛ и, соответственно, увеличение точности измерений. В диапазоне энергий 10¹⁶-10¹⁸ эВ этот подход заключается в совместной работе установок Tunka-Grande и Тунка-133, диапазоне 10¹⁴ - 10¹⁶ эВ будет реализован при совместной работе установок TAIGA-Muon, TAIGA-HiSCORE и TAIGA-IACT.

5. Заключение

Астрофизический комплекс TAIGA является активно развивающимся инструментом для решения фундаментальных вопросов физики космических лучей и гаммаастрономии. Энергетический спектр ПКЛ и ограничение на интегральный поток диффузных гаммаквантов, полученные по данным установки Tunka-Grande, не противоречат результатам других экспериментов. Создание установки TAIGA-Muon и ее работа в составе комплекса TAIGA позволит уточнить энергетический спектр ПКЛ, улучшить представления о диффузном гамма-излучении, выделить локальные области с избытком гамма-квантов и приступить к детальному исследованию массового состава ПКЛ в диапазоне энергий $10^{14} - 10^{18}$ эВ.

Благодарности

Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ—-ИГУ» (соглашение 13.УНУ.21.0007), поддержана Минобрнауки России (соглашение EB-075-15-2021-675), гос. задание (FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024, FSUS-2020-0039, FSUS-2022-0015), РНФ (19-72-20067, 23-72-00016, 23-72-00054), РФФИ (19- 32-60003).

Автор хотел бы упомянуть всех членов коллаборации TAIGA, которые внесли вклад в проведенные исследования:

И.И. Астапов⁴, П.А. Безъязыков², Е.А. Бонвеч¹, А. Н. Бородин³, Н. М. Буднев², А. В. Булан¹, А. Вайдянатан⁵, Н. В. Волков⁹, П. А. Волчугов¹, Воронин⁶, А. Р. Гафаров², Е. О. Гресь² Д.М. Т.И. Гресь², О.Г. Гришин². O. A. Гресь², А. Ю. Гармаш^{5,8}, В. М. Гребенюк^{3,10}, А. А. Гринюк³ А. Н. Дячок², Д. П. Журов^{2,13}, А. В. Загородников² А. Д. Иванова^{2,12}, А. Л. Иванова^{2,5}, М. А. Илюшин², Н. Н. Калмыков¹, В. В. Киндин⁴, С. Н. Кирюхин², Р.П. Кокоулин⁴, Н.И. Колосов², К.Г. Компаниец⁴ Е.Е. Коростелева¹, В.А. Кожин¹, Е.А. Кравченко^{5,8}, А.П. Крюков¹, Л.А. Кузьмичев¹, А. Кьявасса¹¹, А.А. Лагутин⁹, М.В. Лаврова³, Ю.Е. Лемешев², Б.К. Лубсандоржиев⁶, Н.Б. Лубсандоржиев¹, С. Д. Малахов², Р. Р. Миргазов², Э. А. Окунева¹, Осипова¹, А. Л. Пахоруков², А. Пан³ Э.А. А. Д. Панов¹, Л. В. Паньков², А. А. Петрухин⁴, Д. А. Подгрудков¹, Е. Г. Попова¹, Е. Б. Постников¹, В. В. Просин¹, В. С. Птускин⁷, А. А. Пушнин² А.Ю. Разумов¹, Р.И. Райкин⁹, Г.И. Рубцов⁶ Рябов², В.С. Самолига², И. Сатышев³ E. B. А. А. Силаев¹, А. А. Силаев(мл.)¹, А. Ю. Сидоренков⁶, А. В. Скурихин¹, А. В. Соколов^{5,8}, Л. Г. Свешникова¹, В. А. Таболенко², А. Б. Танаев², Б. А. Таращанский², М. Ю. Терновой², Л. Г. Ткачев^{3,10}, Н. А. Ушаков⁶, Д. В. Чернов¹ и И. И. Яшин⁴.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2;

²Иркутский государственный университет, Научноисследовательский институт прикладной физики. Россия, 664003, г. Иркутск, бул. Гагарина, 20;

³Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований. Россия, 141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш., 31;

⁵Новосибирский национальный исследовательский государственный университет. Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1;

⁶Институт ядерных исследований Российской академии наук. Россия, 117312, г. Москва, проспект 60-

- Alfaro R., Alvarez C., Alvarez J.D. et al. // Phys. Rev. D. 2017. 96. 12. P. 122001.
- [2] Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2015. 770. P. 189.
- [3] Budnev N., Astapov I., Bezyazeekov P. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2022. 1039. P. 167047.
- [4] Berezhnev S.F., Besson D., Budnev N.M. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2012. 692. P. 98.
- [5] Astapov I.I., Barbashina N.S., Bogdanov A.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2017. 81. 4. P. 460.
- [6] Kuzmichev L., Astapov I., Bezyazeekov P. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2020. 952. P. 161830.
- [7] Belolaptikov I. A., Bezrukov L. B., Borisovets B. A. et al.
 // Astropart. Phys. 1997. 7. 3. P. 263.
- [8] Bagduev R. I., Balkanov V., Belolaptikov I. A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 1999. 420. P. 138.
- [9] Bryanski S., Vasilchenko Y., Gress O. et al. // Proc. 24th ICRC. 1995. 2. P. 724.
- [10] Budnev N., Chernov D., Gress O. et al. // Astropart. Phys. 2013. 50–52. P. 18.
- [11] Amelchakov M.B., Barbashin N.S., Bogdanov A.G. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2022. 1026. P. 166184.
- [12] Apel W.D., Arteaga J.C., Badea A.F. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2010. 620. P. 202.
- [13] Aglietta M., Alessandro B., Antonioli P. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 1993. 336. P. 310.
- [14] Likiy O.I., Ampilogov N.V., Astapov I.I. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2016. 59. 6. P. 781.
- [15] Monkhoev R.D., Budnev N.M., Chiavassa A. et al. // JINST. 2017. 12. 6. P. C06019.
- [16] Turundaevskiy A.N., Vasiliev O.A., Karmanov D.E. et al.

летия Октября, 7а;

⁷Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук. Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4;

⁸Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук. Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11;

⁹Алтайский государственный университет. Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61;

¹⁰Университет «Дубна». Россия, 141980, г. Дубна, ул. Университетская, 19;

¹¹Национальный институт ядерной физики. Италия, г. Турин;

¹²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). Россия, 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9;

¹³Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

// Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. 85. 12. P. 353.

- [17] Prosin V.V., Astapov I.I., Bezyazeekov P. A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. 83. 8. P. 1016.
- [18] Budnev N.M., Chiavassa A., Gress O.A. et al. // Astropart. Phys. 2020. 117. P. 102406.
- [19] Apel W.D., Arteaga-Velazquez J.C., Bekk K. et al. // Astropart. Phys. 2012. 36. P. 183.
- [20] Abreu P., Aglietta M., Albury J.M. et al. // Eur. Phys. J. C. 2021. 81. 11. P. 966.
- [21] Sigl G., Schramm D. N., Bhattacharjee P. // Astropart. Phys. 1994. 2. P. 401.
- [22] Berezinsky V. S., Gaisser T. K., Halzen F., Stanev T. // Astropart. Phys. 1993. 1. P. 281.
- [23] Halzen F., Protheroe R. J., Stanev T., Vankov C.P. // Phys. Rev. D. 1990. 41. P. 342.
- [24] Chantell M.C., Covault C.E., Cronin J.W. et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. 79. P. 1805.
- [25] Apel W.D., Arteaga-Velazquez J.C., Bekk K. et al. // Astrophys. J. 2017. 848. 1. P. 1.
- [26] Fomin Yu. A., Kalmykov N. N., Karpikov I. S. et al. // Phys. Rev. D. 2017. 95. 12. P. 123011.
- [27] Savina P. // PoS. 2021. ICRC2021. P. 373.
- [28] Abbasi R. U., Abe M., Abu-Zayyad T. et al. // Astropart. Phys. 2019. 110. P. 8.
- [29] Cao Z., Aharonian F., An Q. et al. // Science. 2021. 373. 6553 P. 425.
- [30] Astapov I., Bezyazeekov P., Blank M. et al. // JINST. 2022. 17. 6. P. P06022.
- [31] Ivanova A., Budnev N., Chiavassa A. et al. // JINST. 2020. 15. 6. P. C06057.
- [32] Astapov I., Bezyazeekov P., Borodin A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2019. 936. P. 254.

Scintillation experiments of the astrophysical complex TAIGA

R. Monkhoev

(on behalf of the TAIGA collaboration)

Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia E-mail: ^amakaay08@rambler.ru

Tunka–Grande and TAIGA–Muon scintillation arrays are part of the TAIGA astrophysical complex. This complex is located in the Tunka Valley (Republic of Buryatia, Russia), 50 km from Lake Baikal and is aimed at solving fundamental problems of cosmic ray physics and gamma–ray astronomy.

The article provides an overview of the Tunka–Grande and TAIGA–Muon arrays. Main results obtained from the experimental data of the Tunka–Grande array for the first 5 years of its operation are presented. The prospects for studying primary cosmic radiation in the energy range $10^{14} - 10^{18}$ eV are discussed.

PACS: 96.50.S-, 96.50.sd, 95.55.Vj.

Keywords: cosmic rays, gamma-astronomy, Tunka-Grande array, TAIGA-Muon array. *Received 07 November 2022.*

Сведения об авторе

Монхоев Роман Дмитриевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: makaay08@rambler.ru.

5