

ИЗУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА АСТРОФИЗИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ TAIGA: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЛАНЫ

И. И. Астапов^a, П. А. Безъязыков^a, М. Бланк^a, Е. А. Бонвеч^a, А. Н. Бородин^a, М. Брюкнер^a, Н. М. Буднев^a, А. В. Булан^a, А. Вайдянатан^a, Р. Вишневецкий^a, Н. В. Волков^a, П. А. Волчугов^a, Д. М. Воронин^a, А. Р. Гафаров^a, О. А. Гресс^a, Т. И. Гресс^a, О. Г. Гришин^a, А. Ю. Гармаш^a, В. М. Гребенюк^a, А. А. Гринюк^a, А. Н. Дячок^a, Д. П. Журов^a, А. В. Загородников^a, А. Л. Иванова^a, Н. Н. Калмыков^a, В. В. Киндин^a, С. Н. Кирюхин^a, Р. П. Кокоулин^a, К. Г. Компаниец^a, Е. Е. Коростелева^a, В. А. Кожин^a, Е. А. Кравченко^a, А. П. Крюков^a, Л. А. Кузьмичев^{a*}, А. Къявасса^a, А. А. Лагутин^a, М. В. Лаврова^a, Ю. Е. Лемешев^a, Б. К. Лубсандоржиев^a, Н. Б. Лубсандоржиев^a, Р. Р. Миргазов^a, Р. Мирзоян^a, Р. Д. Монхоев^a, Е. А. Осипова^a, А. Л. Пахорук^a, А. Пан^a, М. И. Панасюк^a, Л. В. Паньков^a, А. А. Петрухин^a, Д. А. Подгрудков^a, В. А. Полещук^a, Е. Г. Попова^a, А. Порелли^a, Е. Б. Постников^a, В. В. Просин^a, В. С. Птускин^a, А. А. Пушкин^a, А. В. Разумов^a, Р. И. Райкин^a, Г. И. Рубцов^a, Е. В. Рябов^a, Я. И. Сагань^a, В. С. Самолига^a, И. Сатышев^a, А. А. Силаев^a, А. А. Силаев (мл.)^a, А. Ю. Сидоренков^a, А. В. Скурихин^a, А. В. Соколов^a, Л. Г. Свешникова^a, Я. В. Суворкин^a, В. А. Таболенко^a, А. Б. Танаев^a, Б. А. Таращанский^a, М. Ю. Терновой^a, Л. Г. Ткачев^a, М. Тлужиконт^a, Н. А. Ушаков^a, Д. Хорнс^a, Д. В. Чернов^a, И. И. Яшин^a

^a Authors and Affiliations see below

Поступила в редакцию 14 октября 2021 г.,
после переработки 13 ноября 2021 г.

Принята к публикации 13 ноября 2021 г.

Исследование космических лучей высоких энергий методом регистрации черенковского излучения от широких атмосферных ливней было начато в Тункинской долине (в 50 км к западу от южной оконечности озера Байкал) в начале 1990-х гг. За прошедшее время был создан ряд крупных установок, объединенных в Астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) и предназначенных для изучения гамма-лучей и заряженных космических лучей. Представлены описания установок комплекса и основные результаты, полученные при исследовании космических лучей высоких энергий. Обсуждаются планы дальнейшего развития Астрофизического комплекса.

Статья для специального выпуска ЖЭТФ, посвященного 100-летию А. Е. Чудакова

DOI: 10.31857/S0044451022040095

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в понимании природы источников космических лучей высоких и сверхвысоких энергий, расположенных как в нашей Галактике, так и в Метагалактике, идет по трем направлениям:

* E-mail: kuz@dec1.sinp.msu.ru

1) изучение вторичных гамма-квантов, производимых космическими лучами (КЛ) в непосредственной близости от источника, где космические лучи ускоряются;

2) регистрация нейтрино высоких энергий, образующихся при взаимодействиях частиц высоких энергий в источниках;

3) точное определение энергетического спектра, массового состава и анизотропии КЛ путем регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ).

Астрофизический комплекс TAIGA [1, 2] позволяет проводить исследования природы источников космических лучей в рамках как первого, так и третьего подходов. Уникальная особенность комплекса состоит в объединении в единую систему установок с детекторами разного типа для регистрации всех компонент ШАЛ. Это позволит осуществить поиск Пэватронов — галактических объектов, в которых протоны ускоряются до энергий порядка 10^{15} – 10^{17} эВ, найти энергетические пределы ускорения частиц в остатках сверхновых и пульсарных туманностях, осуществить поиск корреляций с нейтринными событиями, регистрируемыми нейтринными обсерваториями IceCube [3] и Baikal-GVD [4]. В этой статье будут обсуждаться только результаты, полученные в рамках третьего из перечисленных подходов при измерениях энергетического спектра и массового состава путем регистрации ШАЛ.

Изучение энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в энергетическом диапазоне 10^{14} – 10^{18} эВ имеет решающее значение для понимания происхождения и распространения космических лучей в Галактике. Возрастающее преобладание тяжелых ядер от энергии «колена» до 10^{17} эВ указывает на энергетический предел ускорения космических лучей в стандартной модели ускорения частиц в остатках сверхновых, см. обзор [5]. При более высоких энергиях массовый состав снова становится легче при энергии $2 \cdot 10^{18}$ эВ. Это может указывать на переход к внегалактическому происхождению космических лучей или на доминирование новых галактических источников неизвестной природы, см. [6, 7] для обсуждения.

Статья имеет следующую структуру. В разд. 2 кратко описываются основные установки Астрофизического комплекса, включая установки, уже не работающие в настоящее время. В разд. 3 представлены методы восстановления параметров ШАЛ. В разд. 4 приводятся основные результаты.

2. РАЗВИТИЕ АСТРОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЕ

2.1. Первые эксперименты (1993–2005 гг.)

Эксперименты по регистрации ШАЛ по их черенковскому излучению в Тункинской долине в 50 км к западу от озера Байкал (51.49 N, 103.04 E) были начаты в 1993 г. Первая экспериментальная установка Тунка-4 состояла из четырех оптических детекторов [8]. В оптическом детекторе установки использовались гибридные фотоприемники КВАЗАР-370 с диаметром фотокатода 37 см, разработанные для Байкальского нейтринного телескопа НТ200 [9].

Следующая установка Тунка-13 состояла из 13 детекторов на базе фотоприемников такого же типа и проработала с 1996 по 1999 гг. В 2000 г. число детекторов было увеличено до 25. Эта установка, названная Тунка-25 [10], работала до 2005 г. Детекторы установки располагались в узлах квадратной сетки с шагом 85 м на площади около 0.1 км^2 (рис. 1).

Ниже кратко описаны установки, которые работали и работают в составе астрофизического комплекса с 2005 г. В настоящее время в составе комплекса работают следующие установки: Тунка-133, Тунка-Гранде, TAIGA-HISCORE, TAIGA-MUON, TAIGA-IACT. Все установки ком-

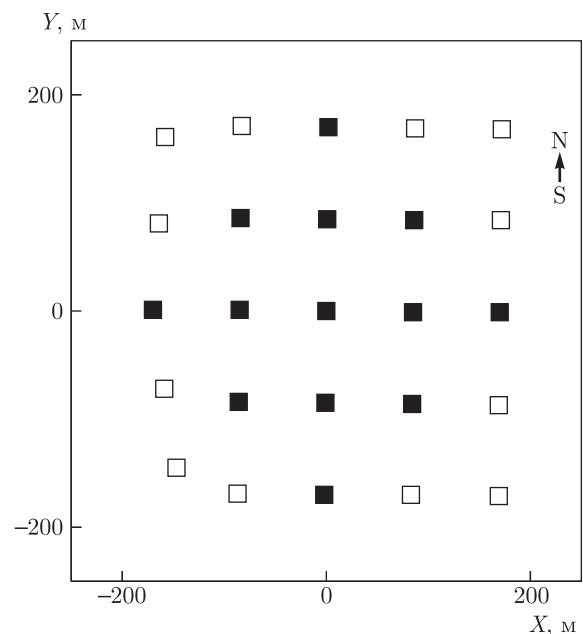


Рис. 1. Расположение детекторов в установке Тунка-25. Черными квадратами показаны детекторы, участвующие в выработке триггера установки

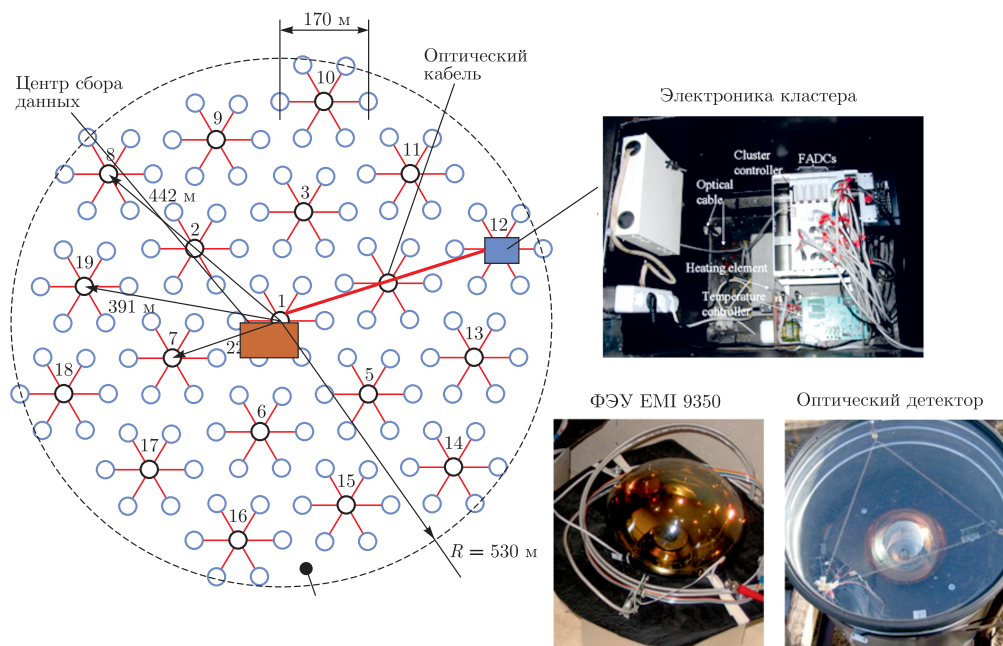


Рис. 2. Расположение детекторов центральной части установки Тунка-133

плекса синхронизованы друг с другом с точностью 10 нс [11].

2.2. Тунка-133

Установка Тунка-133 состоит из 175 черенковских детекторов [12, 13], расположенных на площади 3 км^2 (рис. 2). Детекторы сгруппированы в 25 кластеров по семь детекторов в каждом — шесть детекторов в вершинах правильного шестиугольника и один в центре. Расстояние между детекторами в кластере составляет 85 м. 19 кластеров расположены в виде плотной центральной части массива радиусом около 500 м. Эти 133 детектора дали установке ее название — Тунка-133. Остальные 6 внешних кластеров расположены на расстоянии около 1 км вокруг центра. Каждый кластер является независимой установкой с собственным локальным триггером. Каждый детектор содержит ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см, сигнал с которого отправляется в центр кластера, где проводится его оцифровка 12-битным АЦП с частотой дискретизации 200 МГц. Главной задачей установки Тунка-133 является исследование энергетического спектра и массового состава космических лучей с энергией выше 10^{16} эВ. Методы реконструкции параметров ШАЛ и основные результаты будут приведены в разд. 3 и 4.

2.3. Тунка-Гранде

Установка Тунка-Гранде [14] представляет собой сеть сцинтилляционных счетчиков, объединенных в 19 станций, каждая из которых состоит из наземной и подземной частей. Наземная часть содержит 12 счетчиков общей площадью около 8 м^2 , регистрирующих заряженные частицы ШАЛ. Подземная часть, расположенная под слоем грунта толщиной 1.5 м, состоит из 8 счетчиков общей площадью около 5 м^2 и предназначена для регистрации мюонной составляющей ШАЛ. Электроника сцинтилляционной станции, аналогичная электронике установки Тунка-133, обеспечивает выработку локального триггера станции, оцифровку формы сигналов с шагом 5 нс и передачу данных в единый центр сбора данных.

2.4. TAIGA-HiSCORE

Установка TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) [15, 16] представляет собой сеть широкоугольных оптических станций для регистрации черенковского излучения ШАЛ. В настоящее время установка состоит из 120 станций, расположенных на площади 1.1 км^2 , расстояние между станциями 106 м (рис. 3). Станции сгруппированы в 4 кластера с независимыми центрами сбора данных. Каждая станция соединена с

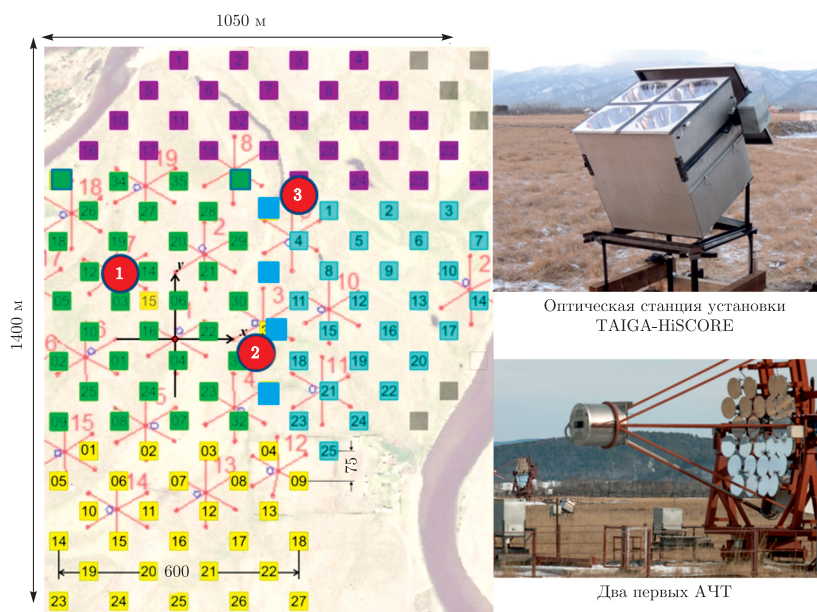


Рис. 3. Слева: Расположение оптических станций установки TAIGA-HiSCORE (квадраты) и трех АЧТ установки TAIGA-IACT (круги). Справа: Оптическая станция TAIGA-HiSCORE и два первых АЧТ

центром сбора данных кластера волоконно-оптическим кабелем для передачи данных и синхронизации [11]. Оптическая станция содержит четыре фотоэлектронных умножителя (ФЭУ) диаметром 20 см (ET 9352 и Hamamatsu R5912). Площадь светосбора каждого ФЭУ увеличена в 4 раза с помощью конуса Уинстона диаметром 0.4 м и углом обзора 30° (телесный угол 0.6 ср). Сигналы с анода и промежуточного динода ФЭУ оцифровываются с шагом 0.5 нс. Эффективный энергетический порог установки при срабатывании четырех и более станций составляет ~ 80 ТэВ для ШАЛ от заряженных частиц космических лучей и ~ 40 ТэВ для ШАЛ от гамма-квантов. Угловое разрешение установки изменяется от 0.4–0.5 град. вблизи порога установки до 0.1 град. при срабатывании более 10 станций [17]. Установка TAIGA-HiSCORE создавалась не только для исследования космических лучей, но и для поиска локальных источников гамма-квантов высоких энергий [18]. Большая угловая апертура установки и хорошее угловое разрешение позволили начать поиск астрофизических источников оптических вспышек наносекундного диапазона [19].

2.5. Tunka-REX

Регистрация радиоизлучения — еще один метод, который может быть использован для восстановле-

ния параметров ШАЛ. Радиоизлучение возникает в основном за счет тока, образуемого разделением релятивистских электронов и позитронов ливня в геомагнитном поле. Установка Тунка-REX (Radio Extension) [20] — это система антенн, которая работала в течение 7 лет (2012–2019 гг.) в Астрофизическом комплексе [21] и использовалась в экспериментах по регистрации радиоизлучения ШАЛ. Установка состояла из 63 радиоантенн, размещенных на площади 3 км^2 . Антенны были подключены к платам FADC в электронике сбора данных установок Тунка-133 и Тунка-Гранде. Сигналы с антенн считывались при выработке локальных триггеров установок Тунка-133 или Тунка-Гранде.

2.6. TAIGA-Muon

Для исследования массового состава космических лучей с энергией выше 10^{16} эВ и подавления адронного фона при регистрации гамма-квантов высоких энергий создается новая установка TAIGA-Muon [22]. Для этой установки были разработаны новые сцинтилляционные счетчики площадью 1 м^2 [23]. Конструкция счетчиков позволяет закапывать их в грунт без дополнительной защиты. В 2019 г. были развернуты первые три кластера установки TAIGA-Muon. Каждый кластер имеет 8 наземных и столько же подземных детекторов. Счетчики расположены попарно, наземные на-

ходятся строго над подземными. Все 8 пар размещены по периметру квадрата со стороной 5 м. Расстояние между соседними парами составляет 1 м. К 2024 г. планируется увеличить площадь мюонных детекторов в установке TAIGA-Muon как минимум до 150 м².

2.7. TAIGA-IACT

В составе Астрофизического комплекса запланировано развертывание пяти атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) с восстановлением углового распределения (изображения) черенковского света от ШАЛ. Такие телескопы являются основными инструментами наземной гамма-астрономии высоких энергий, позволяющими отделять события от гамма-квантов от событий от заряженных частиц космических лучей. Первые два телескопа уже работают, третий телескоп начнет работать зимой 2022 г. Четвертый и пятый телескопы начнут работать к 2023 г. Каждый АЧТ установки TAIGA-IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) имеет составные зеркала системы Дэвиса–Коттона площадью ~ 10 м² и фокусным расстоянием 4.75 м [24]. В фокусе зеркал установлены регистрирующие камеры из 600 ФЭУ с диаметром фотокатода 2 см каждый (XP1911). Диаметр камер около 110 см. Угол обзора камеры 9.6°, угловой обзор одного пикселя 0.36°, функция рассеяния точки (point spread function, PSF) телескопа $\sim 0.07^\circ$ [24]. Регистрирующая камера и система сбора данных подробно описаны в статье [25]. По своим характеристикам наши телескопы соответствуют параметрам малых телескопов (Small Size Telescope — SST) проекта CTA [26]. Угол обзора таких телескопов более чем в 2 раза превышает угол обзора телескопов предыдущего поколения. Такой угол обзора позволяет регистрировать ШАЛ с положением оси до 500 м от телескопа. Энергетический порог телескопа 2–3 ТэВ в зависимости от зенитного угла, под которым виден источник гамма-квантов. При энергиях выше 10 ТэВ становится возможным использовать стереоскопический подход — ШАЛ от гамма-квантов регистрируется двумя и большим числом телескопов [27]. При энергиях выше 40 ТэВ становится возможным новый «гибридный» подход к регистрации гамма-квантов — регистрация ШАЛ как телескопами, так и установкой TAIGA-HiSCORE. Главным преимуществом совместной работы АЧТ и сети широкоугольных черенковских станций является более эффективное выделение событий

от гамма-квантов из фона ШАЛ от заряженных космических лучей [28].

2.8. Малые черенковские телескопы

Одним из недостатков совместной работы установки TAIGA-HiSCORE и черенковских телескопов является существенное отличие в апертурах. Апертура АЧТ в 20 раз меньше, чем апертура установки TAIGA-HiSCORE, и соответственно только 5% событий, зарегистрированных установкой TAIGA-HiSCORE, попадают в поле зрения АЧТ. Для исследования области энергий выше 50 ТэВ планируется использовать малые черенковские телескопы с камерами с диаметром поля зрения 25–30 град. и эффективной площадью регистрации ~ 1 м². При работе таких телескопов процент совместных с установкой TAIGA-HiSCORE событий увеличится почти в 10 раз и для совместных событий сохранится высокая эффективность выделения событий от гамма-квантов. В настоящее время в составе комплекса работает прототип такого телескопа — телескоп SIT (Small Imaging Telescope), использующий в качестве регистрирующих детекторов кремниевые фотоумножители [29].

3. МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

Для исследования энергетического спектра и массового состава космических лучей методом регистрации ШАЛ измеряются их параметры, отражающие энергию и массу A первичного ядра. Поскольку примерно 80% энергии первичного ядра в процессе развития каскада в атмосфере переходит в электромагнитную компоненту (электроны и фотоны), полный поток черенковского света от ШАЛ является хорошей мерой первичной энергии, при этом независимой от массового числа. Однако измерение полного потока черенковского света на большинстве установок невозможно, поэтому в качестве меры полного потока выбирается плотность потока на определенном расстоянии от оси. Чувствительным к массовому числу параметром является глубина максимума развития ШАЛ X_{max} . Глубина максимума для индивидуальных ШАЛ сильно флуктуирует ($\sigma(X_{max})$) для протонов ~ 60 – 80 г/см² в зависимости от энергии, среднее значение X_{max} ($\langle X_{max} \rangle$) для ШАЛ от ядра с массовым числом A хорошо описывается простой аппроксимацией [30]:

$$\langle X_{max} \rangle = A + B \lg E [\text{ТэВ}]/A, \quad (1)$$

с постоянными значениями A и B ($A = 370 \text{ г/см}^2$, $B = 65 \text{ г/см}^2$).

В принципе, значения этих параметров зависят от исследуемого диапазона энергии, но этой зависимостью в первом приближении можно пренебречь. При изменении энергии в 10 раз $\langle X_{max} \rangle$ увеличивается приблизительно на 65 г/см^2 . Изменение $\langle X_{max} \rangle$ при переходе от протона к ядру железа составляет $110\text{--}120 \text{ г/см}^2$ в диапазоне $10^{16}\text{--}10^{18}$ эВ. Результаты моделирования, приведенные в разд. 4, качественно совпадают с этой простой аппроксимацией.

3.1. Восстановление энергии первичной частицы по черенковскому свету

Для установок с расстоянием между детекторами около 100 м (Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE) энергия первичной частицы восстанавливается по плотности потока черенковского света на расстоянии 200 м от оси ШАЛ (Q_{200}). Для пересчета к расстоянию 200 м используется функция пространственного распределения (ФПР), полученная из расчетов методом Монте-Карло. Как показывают результаты моделирования [10] (рис. 4), на таком расстоянии от оси плотность потока света для фиксированной энергии слабо зависит от глубины максимума X_{max} и зенитного угла ШАЛ.

Связь между энергией первичной частицы и Q_{200} , полученная из расчета методом Монте-Карло (CORSIKA, QGSJET-II-04), может быть выражена следующей формулой [13]:

$$E_0 = C Q_{200}^g, \tag{2}$$

где $g = 0.94$ для диапазона $10^{16}\text{--}10^{17}$ эВ и $g = 0.95$ для диапазона $10^{17}\text{--}10^{18}$ эВ. Результаты расчета представлены на рис. 5.

Константа C определяется путем нормировки полученного экспериментального интегрального энергетического спектра на известный полный поток космических лучей с энергией более $3 \cdot 10^{15}$ эВ, измеренный в эксперименте QUEST [31].

Относительную погрешность восстановленных параметров ливня можно оценить с помощью хорошо известного метода шахматной доски [32]. Для энергий $E_0 \geq 10^{16}$ эВ погрешность восстановления положения оси ШАЛ менее 6 м для центральной части установки Тунка-133 ($R \leq 450$ м) и менее 10 м для $450 \leq R \leq 800$ м и $E_0 \geq 5 \cdot 10^{16}$ эВ. Ошибка восстановления энергии с учетом неопределенности в массовом составе и точности определения положения оси ШАЛ составляет приблизительно 10%. Наличие в составе астрофизическо-

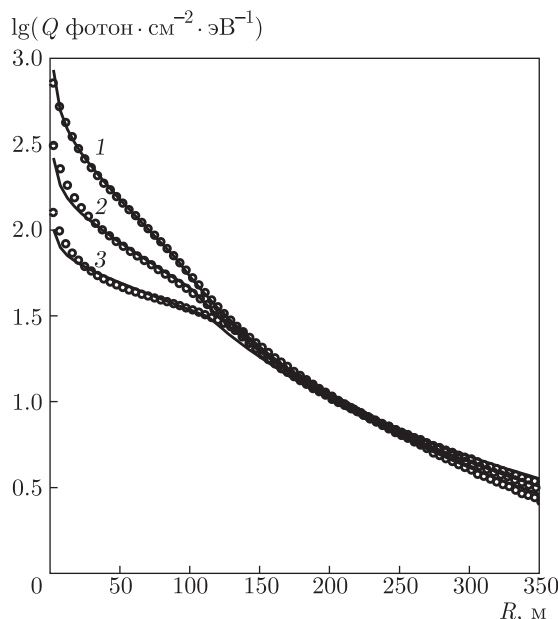


Рис. 4. Функция пространственного распределения света от ШАЛ энергией $5 \cdot 10^{15}$ эВ, рассчитанная по программе CORSIKA, для различных расстояний от положения максимума ШАЛ до установки, H_{max} 3.2 км (1), 4.1 км (2), 5 км (3)

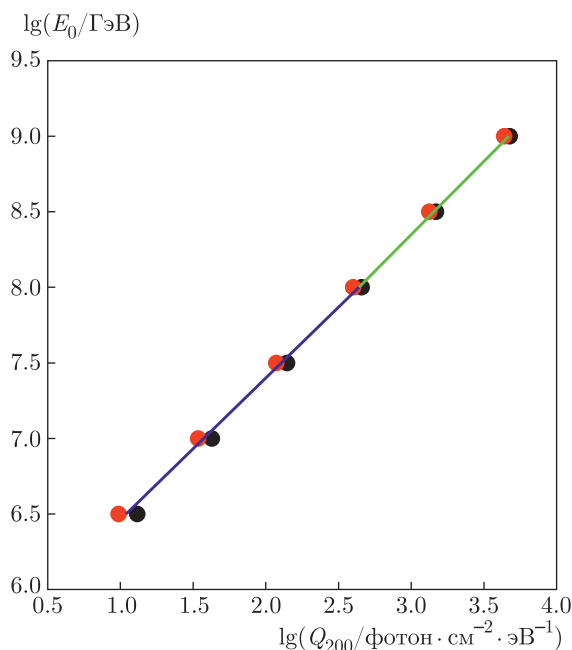


Рис. 5. (В цвете онлайн) Расчет (CORSIKA, QGSJET-II-04) корреляции энергии первичной частицы (E_0) и плотности потока света на расстоянии 200 м от оси (Q_{200}). Черные точки — средние значения Q_{200} для первичных протонов, красные точки — средние значения Q_{200} для первичных ядер железа

го комплекса TAIGA установки Tunka-Rex, регистрирующей радиоизлучение ШАЛ, и установки LOPES в составе установки KASCADE-GRANDE позволило провести сравнение точности восстановления энергии ШАЛ между установками Тунка-133 и KASCADE-GRANDE [33]. Идея метода состоит в сравнении амплитуд сигналов с радиоантенн установок Tunka-Rex и LOPES в зависимости от энергий ШАЛ, восстановленных с использованием методик, разработанных в экспериментах Тунка-133 и KASCADE-GRANDE. Систематическое отличие в измерении энергии оказалось равным 5 %.

Основные параметры ШАЛ для установки TAIGA-HiSCORE реконструируются с использованием тех же алгоритмов, что и для установки Тунка-133. В то же время для установки TAIGA-HiSCORE восстановить плотность потока черенковского излучения ШАЛ на расстоянии 200 м от оси, интерполируя амплитуды, измеренные с помощью ее оптических станций, расположенных на расстояниях больше и меньше 200 м, оказывается возможным для 100 % событий только при энергии ШАЛ выше 1015 эВ, в то время как энергетический порог установки TAIGA-HiSCORE при срабатывании четырех и более ее оптических станций составляет ~ 80 ТэВ для ШАЛ от заряженных частиц космических лучей. Поэтому для более низких энергий был разработан другой алгоритм восстановления параметров ШАЛ. Положение оси определяется как центр тяжести амплитуд импульсов в 4–5 станциях. Плотность светового потока вблизи оси рассчитывается как среднее значение для двух станций, ближайших к оси. Расчет с использованием программы CORSIKA показал, что из-за больших флуктуаций светового потока около оси ШАЛ погрешность измерения энергии значительно больше, чем по плотности светового потока на расстоянии 200 м от оси, но в среднем преобразование светового потока в энергию ШАЛ возможно по формуле [34]

$$\lg(E_0) = C + 0.87Q_{65}, \quad (3)$$

где Q_{65} — плотность потока фотонов на расстоянии 65 м от оси.

3.2. Восстановление энергии первичной частицы по заряженным частицам ШАЛ

Для установки Тунка-Гранде энергия первичной частицы восстанавливается по плотности потока частиц ШАЛ на расстоянии 200 м от оси [14]:

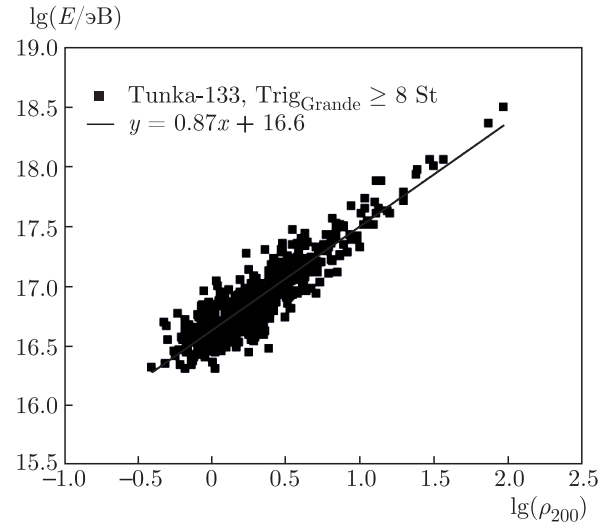


Рис. 6. Корреляция между энергией ШАЛ, восстановленной по данным установки Тунка-133, и плотностью заряженных частиц на расстоянии 200 м от оси по данным установки Тунка-Гранде

$$\lg(E/1 \text{ эВ}) = C_a \lg(\rho_{200}) + C_b. \quad (4)$$

Коэффициенты C_a и C_b в этом выражении определяются путем подстановки энергии ШАЛ, восстановленной по данным установки Тунка-133, в левую часть уравнения для событий, зарегистрированных как установкой Тунка-Гранде, так и установкой Тунка-133. Экспериментальная зависимость E от ρ_{200} показана на рис. 6.

3.3. Восстановление глубины максимума ШАЛ

Для определения глубины максимума (X_{max}) ШАЛ используется параметр P , характеризующий крутизну ФПР черенковского света. P определяется как отношение потока света на расстоянии 80 м от оси ШАЛ Q_{80} к потоку на расстоянии 200 м Q_{200} :

$$P = Q_{80}/Q_{200}. \quad (5)$$

Моделирование методом Монте-Карло подтвердило, что параметр P определяется только толщиной атмосферы между установкой и глубиной максимума ($\Delta X_{max} = 965/\cos\theta - X_{max}$ [г/см²]) и не зависит от энергии, зенитного угла ливня и сорта первичного ядра (см. рис. 7). Здесь 965 г/см² — глубина атмосферы в месте расположения установок [35]. Рассчитанная связь ΔX_{max} и параметра P близка к линейной для диапазона параметра P от 2.5 до 9. Стандартное отклонение точек от линии подгонки для этого диапазона составляет около 15 г/см².

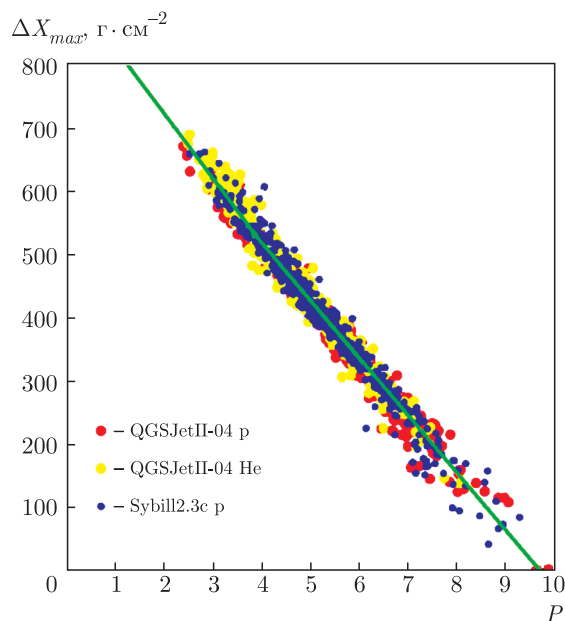


Рис. 7. (В цвете онлайн) Зависимость между параметром крутизны ФПР $P = Q_{80}/Q_{200}$ и толщиной атмосферы между установкой и глубиной максимума ШАЛ ΔX_{max} [35] по банку событий, полученных методом Монте-Карло

Расчетные точки для более тяжелых ядер или зенитных углов более 30° лежат в значительной степени на значениях параметра P менее 2.5, т.е. относятся к событиям с ФПР, практически плоскими вблизи оси ШАЛ, для которых описываемый метод неприменим.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Энергетический спектр в диапазоне 10^{14} – 10^{18} эВ

Для построения энергетического спектра космических лучей по данным Тункинского астрофизического комплекса были использованы данные установки Тунка-133, полученные за 2175 ч, и данные установки TAIGA-HiSCORE за 327 ч работы. Совместный энергетический спектр космических лучей [13, 34] показан на рис. 8 в сравнении с ранее полученным спектром по данным установки Тунка-25 [10]. Спектр охватывает четыре порядка величины в диапазоне энергий от $3 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{18}$ эВ. Одним из главных результатов, который следует из полученного спектра, является доказательство более сложной зависимости интенсивности космических лучей от энергии, чем предполагалось ранее. В спектре наблюдаются две статистически обеспеченные осо-

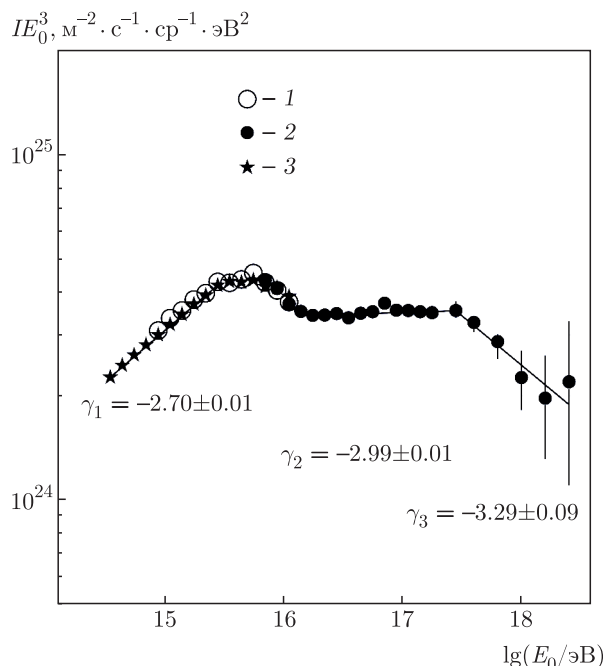


Рис. 8. Энергетический спектр космических лучей по данным установок Астрофизического комплекса TAIGA: 1 — Тунка-25 [10], 2 — Тунка-133 [13], 3 — TAIGA-HiSCORE [34]

бенности кроме «классического колена» при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ. А именно, при энергии $2 \cdot 10^{16}$ эВ показатель наклона энергетического спектра уменьшается примерно на 0.2, а при энергии $3 \cdot 10^{17}$ эВ значение показателя наклона спектра опять увеличивается примерно на 0.3. Энергетический спектр при энергии меньше $3 \cdot 10^{15}$ эВ может быть описан степенным законом с показателем равным 2.70 ± 0.01 . В энергетическом диапазоне $2 \cdot 10^{16}$ – $3 \cdot 10^{17}$ эВ спектр также описывается степенным законом с показателем 2.99 ± 0.01 . При энергии выше $3 \cdot 10^{17}$ эВ показатель наклона спектра увеличивается и становится равным 3.29 ± 0.09 . Укручение спектра при энергии $3 \cdot 10^{17}$ эВ можно интерпретировать как «второе колено» в энергетическом спектре, связанное с переходом от галактических космических лучей к внегалактическим. На рис. 9 показано сравнение наших данных с данными других экспериментов. Существует хорошее согласие как с прямыми измерениями на высотных аэростатах [36], со спутниковыми [37] и высокогорными [38] измерениями при низких энергиях, так и с измерениями на гигантских установках при чрезвычайно высоких энергиях (обсерватория P. Auger (PAO) [41], установка TA [42]). Во всех экспериментальных данных наблюдается уменьшение значения показателя наклона спектра при энергии 1.5 – $2.5 \cdot 10^{16}$ эВ на величину 0.2–0.3.

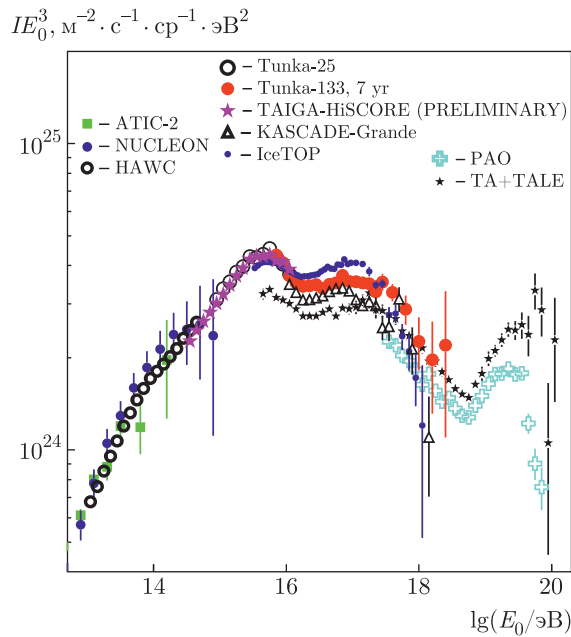


Рис. 9. (В цвете онлайн) Сравнение энергетических спектров космических лучей, полученных в различных экспериментах в широком диапазоне энергий: ATIC-2 [36], NUCLEON [37], HAWC [38], Tunka-25, TAIGA-HiSCORE, Tunka-133, KASCADE-Grande [39], IceTop [40], PAO [41], TA+Tale [42]

В настоящее время этот эффект не имеет астрофизического объяснения.

4.2. Массовый состав в диапазоне 10^{15} – 10^{18} эВ

Средние глубины максимума, полученные на двух установках (Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE), в зависимости от энергии первичной частицы показаны на рис. 10. Данные обеих установок, несмотря на разницу в их геометрии, хорошо согласуются друг с другом в широком диапазоне энергий от 10^{15} до $3 \cdot 10^{17}$ эВ. Для получения неискаженных оценок X_{max} выбираются события с зенитным углом $\geq 30^\circ$ и энергией, при которой эффективность регистрации ШАЛ около 100%. Для установки Тунка-133 такая энергия равна $1.25 \cdot 10^{16}$ эВ, а для TAIGA-HiSCORE — $1.25 \cdot 10^{15}$ эВ. На рис. 10 наши экспериментальные данные сравниваются с результатами измерений X_{max} , полученных путем регистрации флуоресцентного света ШАЛ на ТА [42], PAO [43] и смеси флуоресцентного и черенковского света в эксперименте TALE [44]. Все экспериментальные результаты сравниваются с теоретическими кривыми, рассчитанными с использова-

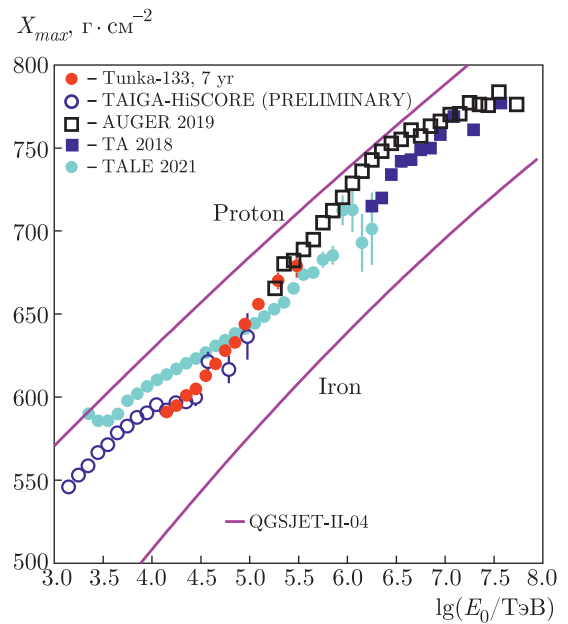


Рис. 10. (В цвете онлайн) Зависимость среднего значения X_{max} от энергии: Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE [33], TA [42], TALE [43], Auger [44]

нием модели QGSJET-II-04 [45] для первичных протонов и ядер железа. При фиксированной энергии X_{max} линейно зависит от $\ln A$ (см. выражение (1)). Пользуясь этим, обычно определяют среднее значение $\langle \ln A \rangle$ методом интерполяции между расчетными кривыми для протонов и ядер железа, приведенными на рис. 10. Результат показан на рис. 11.

Зависимость от энергии среднего значения $\ln A$ хорошо экстраполируется на результаты Auger при энергии $3 \cdot 10^{17}$ эВ [44] и противоречит результатам существенно более сложного в интерпретации данных эксперимента TALE [43].

5. ПЛАН ПО РАЗВИТИЮ КОМПЛЕКСА НА БЛИЖАЙШИЕ ВРЕМЯ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие Астрофизического комплекса в Тункинской долине за 25 лет привело к строительству ряда серьезных установок для изучения космических лучей сверхвысоких энергий. По результатам, полученным с помощью этих установок, был реконструирован энергетический спектр первичных космических лучей в диапазоне четырех порядков. В энергетическом спектре наблюдается ряд особенностей, которые еще не получили астрофизической интерпретации. Прежде всего, спектр в области «первого колена» при энергии $(3-6) \cdot 10^{15}$ эВ нельзя описывать просто как резкое изменение наклона. Так-

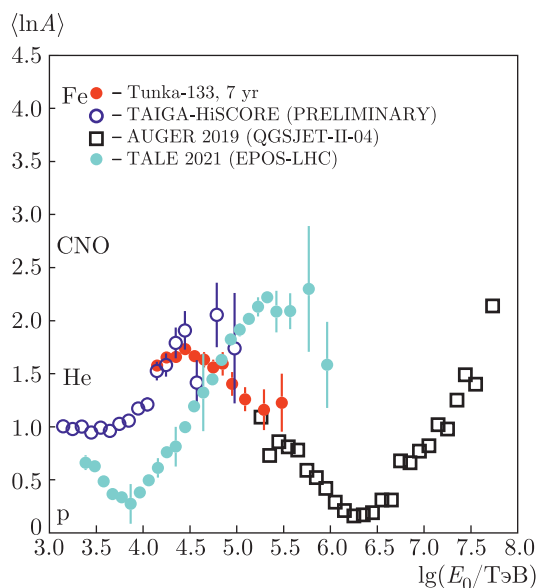


Рис. 11. (В цвете онлайн) Зависимость среднего логарифма атомного номера $\langle \ln A \rangle$ от энергии: Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE [33], TA [42], TALE [43], Auger [44]

же в настоящее время не объяснена особенность в спектре при энергии $2 \cdot 10^{16}$ эВ, которая была надежно установлена в ряде экспериментов. Наконец, энергия, при которой находится «второе колено», все еще определяется с большой неопределенностью. По нашим данным, в диапазоне 10^{15} – 10^{17} эВ в потоке космических лучей должны доминировать легкие ядра — протоны и гелий. Это противоречит излому в энергетическом спектре легкой компоненты космических лучей, полученному на установке ARGO-YBJ [46], при энергии $0.7 \cdot 10^{15}$ эВ.

Следует отметить, что согласно данным о массовом составе в области первого колена, полученным в различных экспериментах, пока невозможно определить согласованную картину. Возможно, детальный массовый состав космических лучей в этом диапазоне энергий будет окончательно понят только после запуска на околоземную орбиту многотонного детектора [47]. В ближайшие 2–3 года изучение массового состава будет продолжено на Астрофизическом комплексе в качестве одной из основных тем. Будет предпринята попытка изучить массовый состав при энергии ниже 10^{15} эВ, возможно, на основе совместных данных установок TAIGA-HiSCORE и TAIGA-IACT. В диапазоне 10^{16} – 10^{18} эВ мы надеемся продвинуться в изучении массового состава за счет увеличения площади детекторов мюонов. Также мы связываем прогресс в области энергий выше 10^{17} эВ с возможным

развертыванием нового флуоресцентного детектора в составе астрофизического комплекса TAIGA.

Финансирование. Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ–ИГУ» (соглашение 13.УНУ.21.0007), поддержана министерством науки и высшего образования (проекты FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024), Российским научным фондом (грант № 19-72-20230 (разд. 2.4, 2.7), грант № 19-72-20067 (разд. 2.8, 6)) и Российским фондом фундаментальных исследований (гранты №№ 19-52-44002, 19-32-60003).

Authors and Affiliations

И. И. Астапов^d, П. А. Безъязыков^b, М. Бланк^m,
 Е. А. Бонвеч^a, А. Н. Бородин^c, М. Брюкнер^l,
 Н. М. Буднев^b, А. В. Булан^a, А. Вайдянатан^e,
 Р. Вишневецкий^l, Н. В. Волковⁱ, П. А. Волчугов^a,
 Д. М. Воронин^f, А. Р. Гафаров^b, О. А. Гресс^b,
 Т. И. Гресс^b, О. Г. Гришин^b, А. Ю. Гармаш^{e,h},
 В. М. Гребенюк^{c,j}, А. А. Гринюк^c, А. Н. Дячок^b,
 Д. П. Журов^b, А. В. Загородников^b,
 А. Л. Иванова^{b,h}, Н. Н. Калмыков^a, В. В. Киндин^d,
 С. Н. Кирюхин^b, Р. П. Кокоулин^d,
 К. Г. Компаниец^d, Е. Е. Коростелева^a,
 В. А. Кожин^a, Е. А. Кравченко^{e,h}, А. П. Крюков^a,
 Л. А. Кузьмичев^a, А. Кьявассаⁿ, А. А. Лагутинⁱ,
 М. В. Лаврова^c, Ю. Е. Лемешев^b,
 Б. К. Лубсандоржиев^f, Н. Б. Лубсандоржиев^a,
 Р. Р. Миргазов^b, Р. Мирзоян^k, Р. Д. Монхоев^b,
 Е. А. Осипова^a, А. Л. Пахоруков^b, А. Пан^c,
 М. И. Панасюк^a, Л. В. Паньков^b,
 А. А. Петрухин^d, Д. А. Подгрудков^a,
 В. А. Полещук^b, Е. Г. Попова^a, А. Порелли^l,
 Е. Б. Постников^a, В. В. Просин^a, В. С. Птускин^g,
 А. А. Пушкин^b, А. В. Разумов^a, Р. И. Райкинⁱ,
 Г. И. Рубцов^f, Е. В. Рябов^b, Я. И. Сагань^{c,j},
 В. С. Самолига^b, И. Сатышев^c, А. А. Силаев^a,
 А. А. Силаев (мл.)^a, А. Ю. Сидоренков^f,
 А. В. Скурихин^a, А. В. Соколов^{e,h},
 Л. Г. Свешникова^a, Я. В. Суворкин^b,
 В. А. Таболенко^b, А. Б. Танаев^b,
 Б. А. Таращанский^b, М. Ю. Терновой^b,
 Л. Г. Ткачев^{c,j}, М. Тлужиконт^m, Н. А. Ушаков^f,
 Д. Хорнс^m, Д. В. Чернов^a, И. И. Яшин^d

^aНаучно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына,

Московский государственный университет
 им. М. В. Ломоносова
 119991, Москва, Россия

^bНаучно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, Россия

^cОбъединенный институт ядерных исследований
141980, Дубна, Московская обл., Россия

^dНаучно-исследовательский ядерный университет
«МИФИ»
115409, Москва, Россия

^eНовосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия

^fИнститут ядерных исследований
Российской академии наук
117312, Москва, Россия

^gИнститут Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова
Российской академии наук
108840, Москва, Россия

^hИнститут ядерной физики
Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия

ⁱАлтайский государственный университет
656049, Барнаул, Россия

^jУниверситет «Дубна»
141982, Дубна, Московская обл., Россия

^kMax Planck Institute for Physics
80804, Мюнхен, Германия

^lDESY
15738, Цойтен, Германия

^mHamburg University
20148, Гамбург, Германия

ⁿUniversity of Turin
10124, Турин, Италия

ЛИТЕРАТУРА

1. N. M. Budnev, I. I. Astapov, P. A. Bezyazeev et al., Nucl. Instrum. Meth. A **958**, 162113 (2020).
2. L. A. Kuzmichev, I. I. Astapov, P. A. Bezyazeev et al., Phys. Atom. Nuclei **81**, 497 (2018).
3. M. G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams et al., Science **361**, 6398 (2018), arXiv:1807.08816.
4. A. D. Avrorin, A. V. Avrorin, V. M. Aynutdinov et al., JETP Lett. **108**, 787 (2018), arXiv:1810.10966.
5. A. R. Bell, Astropart. Phys. **43**, 56 (2013).
6. P. Blasi, Compt. Rend. Phys. **15**, 329 (2014), arXiv:1403.2967.
7. V. Ptuskin, EPJ Web Conf. **145**, 03001 (2017).
8. S. V. Bryanski, G. N. Dudkin, O. A. Gress et al., 24th ICRC, Roma **2**, 724 (1995).
9. R. Bagdavev, V. Balkanov, I. Belolaptikov et al., Nucl. Instrum. Meth. A **420**, 138 (1999).
10. N. Budnev, D. Chernov, O. Gress et al., Astropart. Phys. **50–52**, 18 (2013).
11. O. Gress, I. Astapov, N. Budnev et al., Nucl. Instrum. Meth. A **845**, 367 (2017).
12. S. Berezhnev, S. Epimakhov, N. Karpov et al., Nucl. Instrum. Meth. A **692**, 98 (2012).
13. N. Budnev, A. Chiavassa, O. Gress et al., Astropart. Phys. **117**, 102406 (2020).
14. R. Monkhoev, N. Budnev, A. Gafarov et al., Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **83**, 959 (2019).
15. M. Tluczykont, D. Hampf, D. Horns et al., Astropart. Phys. **56**, 42 (2014).
16. I. Astapov, N. Barbashina, A. Bogdanov et al., Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **81**, 460 (2017).
17. L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev et al., EPJ Web Conf. **145**, 01001 (2017).
18. M. Tluczykont, N. Budnev, I. Astapov et al., EPJ Web Conf. **136**, 03008 (2017).
19. A. D. Panov, I. I. Astapov, A. K. Awad et al., arXiv:2109.09637.
20. P. Bezyazeev, N. Budnev, O. Gress et al., Nucl. Instrum. Meth. A **802**, 89 (2015).
21. D. Kostunin, P. Bezyazeev, N. Budnev et al., PoS ICRC2019 **319** (2019); arXiv:1908.1035.
22. A. Ivanova, N. Budnev, A. Chiavassa et al., JINST **15**, C06057 (2020).
23. I. Astapov, P. Bezyazeev, A. Borodin et al., Nucl. Instrum. Meth. A **936**, 254 (2019).
24. L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev et al., Nucl. Instrum. Meth. A **952**, 161830 (2020).
25. N. Budnev, I. Astapov, P. Bezyazeev et al., JINST **15**, C09031 (2020).
26. B. Acharya, M. Actis, T. Aghajani et al., Astropart. Phys. **43**, 3 (2013).
27. A. Grinyuk, E. Postnikov, P. Volchugov et al., PoS ICRC2021 **395**, 713 (2021).

28. E. Postnikov, A. Grinyuk, L. Kuzmichev et al., EPJ Web Conf. **145**, 19005 (2017).
29. D. Chernov, I. Astapov, P. Bezyazeev et al., JINST **15**, C09062 (2020).
30. K.-H. Kampert and M. Unger, Astropart. Phys. **35**, 660 (2012).
31. E. Korosteleva, V. Prosin, L. Kuzmichev et al., Nucl. Phys. B Proc. Supp. **165**, 74 (2007).
32. A. Karle, M. Merck, R. Plaga et al., Astropart. Phys. **3**, 321 (1995).
33. W. Apel, J. Arteaga-Velázquez, L. Bahren et al., Phys. Lett. B **763**, 179 (2016).
34. V. Prosin, I. Astapov, P. Bezyazeev et al., Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **83**, 1016 (2019).
35. V. Prosin, I. Astapov, P. Bezyazeev et al., Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **85**, 395 (2021).
36. A. Panov, J. Adams, jr., H. Ahn et al., Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **73**, 564 (2009).
37. A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, D. Karmanov et al., Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **85**, 353 (2021).
38. R. Alfaro, C. Alvarez, R. Arceo et al., Phys. Rev. D **96**, 122001 (2017).
39. W. Apel, J. Arteaga Velázquez, K. Bekk et al., Astropart. Phys. **36**, 183 (2012).
40. M. G. Aartsen, R. Abbasi, Y. Abdou et al., Phys. Rev. D **88**, 042004 (2013).
41. J. Abraham, P. Abreu, M. Aglietta et al., Phys. Lett. B **685**, 239 (2010).
42. R. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al., Astrophys. J. **858**, 76 (2018).
43. A. Yushkov, A. Aab, P. Abreu et al., PoS ICRC2019 **482** (2019); arXiv:1909.09073.
44. R. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al., Astrophys. J. **909**, 178 (2021).
45. S. Ostapchenko and M. Bleicher, Phys. Rev. D **93**, 051501 (2016).
46. B. Bartoli, P. Bernardini, X. J. Bi et al., Phys. Rev. D **92**, 092005 (2015).
47. D. Podorozhny, D. Karmanov, A. Panov et al., Bull. Russ. Acad. Sci., Phys. **83**, 637 (2019).