

## ИЗУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА АСТРОФИЗИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ TAIGA: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЛАНЫ

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

<sup>a</sup> 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

EDN: DQDGUG

### 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  $0.1 \text{ км}^2$  (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-

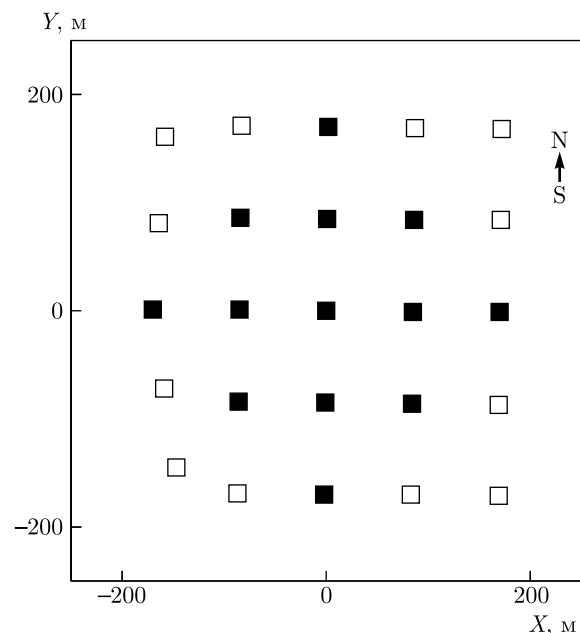


Рис. 1. Расположение детекторов в установке Тунка-25. Черными квадратами показаны детекторы, участвующие в выработке триггера установки

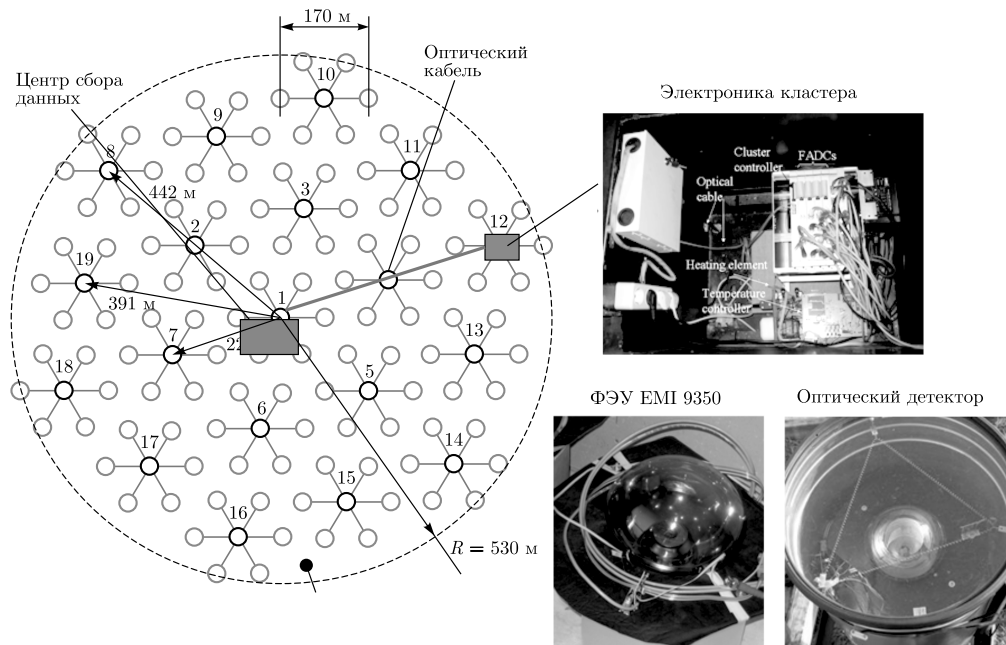


Рис. 2. Расположение детекторов центральной части установки Тунка-133

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<sup>2</sup> (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<sup>16</sup> 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 сцинтиляционных счетчиков, объединенных в 19 станций, каждая из которых состоит из наземной и подземной частей. Наземная часть содержит 12 счетчиков общей площадью около 8 м<sup>2</sup>, регистрирующих заряженные частицы ШАЛ. Подземная часть, расположенная под слоем грунта толщиной 1.5 м, состоит из 8 счетчиков общей площадью около 5 м<sup>2</sup> и предназначена для регистрации мюонной составляющей ШАЛ. Электроника сцинтиляционной 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<sup>2</sup>, расстояние между станциями 106 м (рис. 3). Станции сгруппированы в 4 кластера с независимыми центрами сбора данных. Каждая станция соединена с

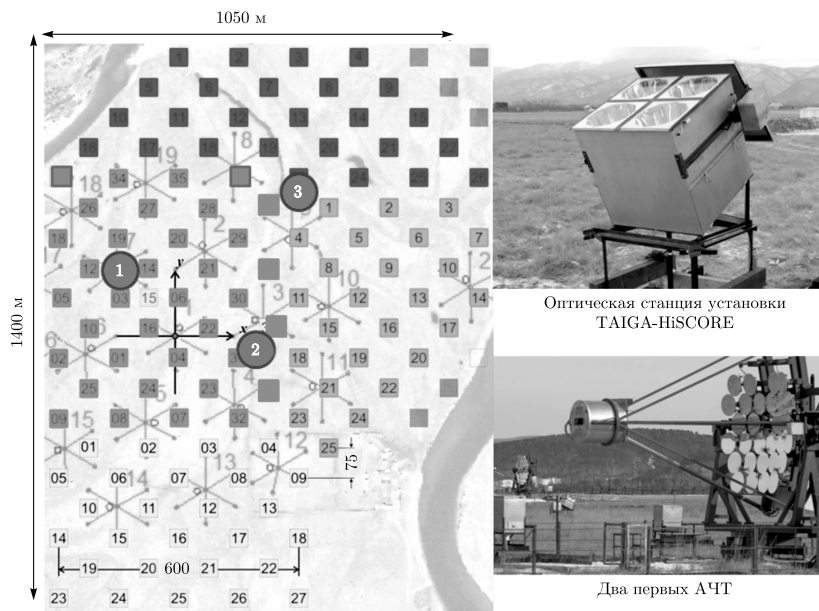


Рис. 3. Слева: Расположение оптических станций установки TAIGA-HiSCORE (квадраты) и трех АЧТ установки TAIGA-IACT (круги). Справа: Оптическая станция TAIGA-HiSCORE и два первых АЧТ

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  $30^\circ$  (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  $\sim 80$  ТэВ для ШАЛ от заряженных частиц космических лучей и  $\sim 40$  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  $3 \text{ км}^2$ . 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  $1 \text{ м}^2$  [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 м<sup>2</sup>.

### 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  $\sim 10$  м<sup>2</sup> 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  $\sim 1$  м<sup>2</sup>. 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  $\sim 60$ – $80$  г/см<sup>2</sup> 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  $65 \text{ г/см}^2$ . 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]:

$$E_0 = CQ_{200}^g, \quad (2)$$

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-

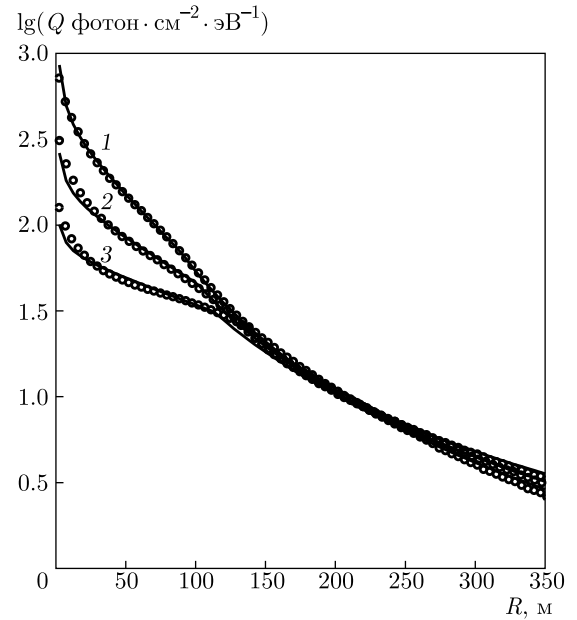


Рис. 4. Функция пространственного распределения света от ШАЛ энергией  $5 \cdot 10^{15}$  эВ, рассчитанная по программе CORSIKA, для различных расстояний от положения максимума ШАЛ до установки,  $H_{max}$  3.2 км (1), 4.1 км (2), 5 км (3)

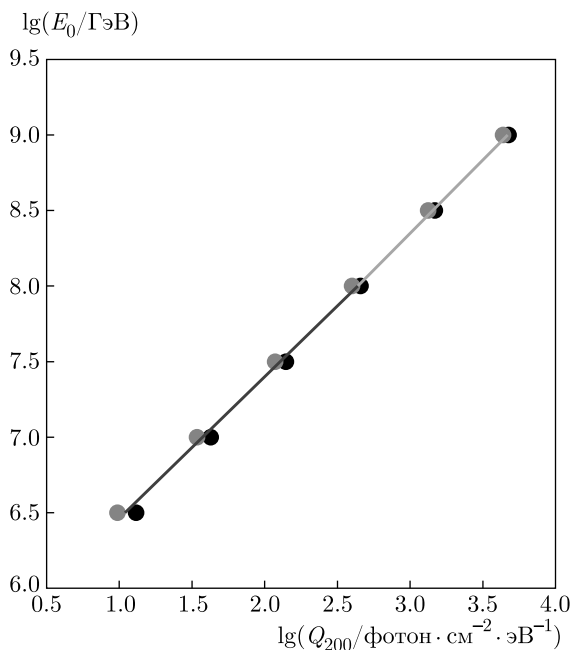


Рис. 5. (В цвете онлайн) Расчет (CORSIKA, QGSJET-II-04) корреляции энергии первичной частицы ( $E_0$ ) и плотности потока света на расстоянии 200 м от оси ( $Q_{200}$ ). Черные точки — средние значения  $Q_{200}$  для первичных протонов, красные точки — средние значения  $Q_{200}$  для первичных ядер 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  $\sim 80$  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]:

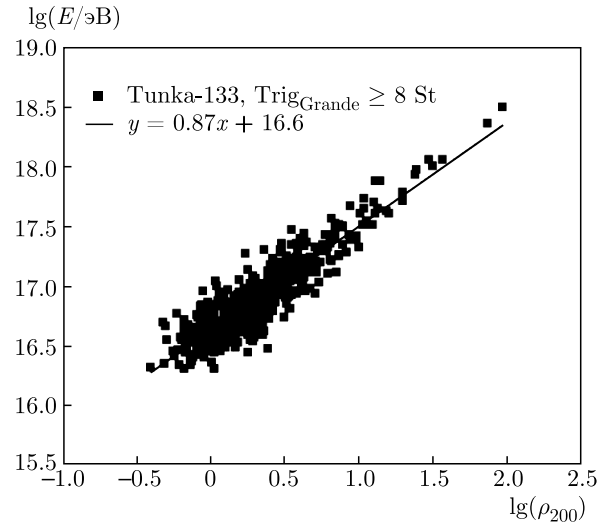


Рис. 6. Корреляция между энергией ШАЛ, восстановленной по данным установки Тунка-133, и плотностью заряженных частиц на расстоянии 200 м от оси по данным установки Тунка-Гранде

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

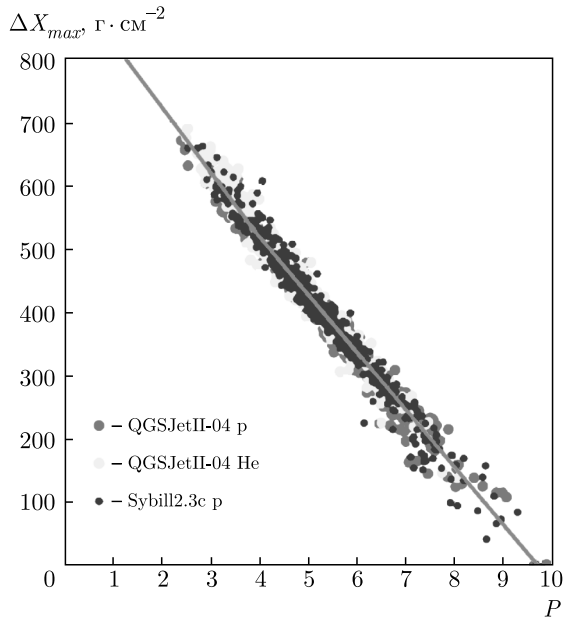
Коэффициенты  $C_a$  и  $C_b$  в этом выражении определяются путем подстановки энергии ШАЛ, восстановленной по данным установки Тунка-133, в левую часть уравнения для событий, зарегистрированных как установкой Tunka-Grande, так и установкой Тунка-133. Экспериментальная зависимость  $E$  от  $\rho_{200}$  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/см<sup>2</sup>]) и не зависит от энергии, зенитного угла ливня и сорта первичного ядра (см. рис. 7). Здесь 965 г/см<sup>2</sup> — глубина атмосферы в месте расположения установок [35]. Рассчитанная связь  $\Delta X_{max}$  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/см<sup>2</sup>.



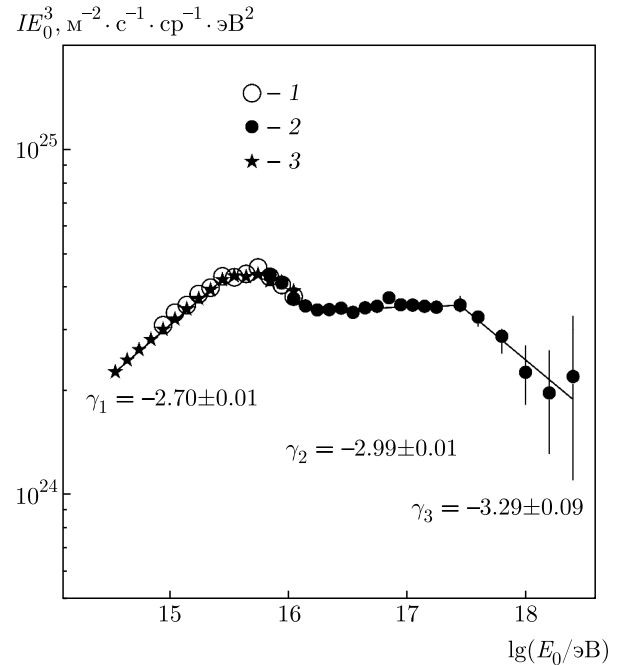
**Рис. 7.** (В цвете онлайн) Зависимость между параметром крутизны ФПР  $P = Q_{80}/Q_{200}$  и толщиной атмосферы между установкой и глубиной максимума ШАЛ  $\Delta X_{max}$  [35] по банку событий, полученных методом Монте-Карло

Расчетные точки для более тяжелых ядер или зенитных углов более  $30^\circ$  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

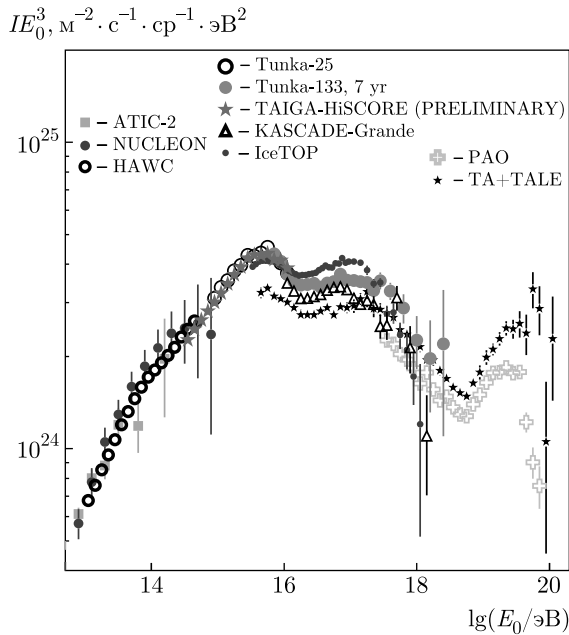
Для построения энергетического спектра космических лучей по данным Тункинского астрофизического комплекса были использованы данные установки Тунка-133, полученные за 2175 ч, и данные установки TAIGA-HiSCORE за 327 ч работы. Совместный энергетический спектр космических лучей [13, 34] показан на рис. 8 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  $2.70 \pm 0.01$ . В энергетическом диапазоне  $2 \cdot 10^{16}$ – $3 \cdot 10^{17}$  эВ спектр также описывается степенным законом с показателем  $2.99 \pm 0.01$ . При энергии выше  $3 \cdot 10^{17}$  эВ показатель наклона спектра увеличивается и становится равным  $3.29 \pm 0.09$ . 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 Р. 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.



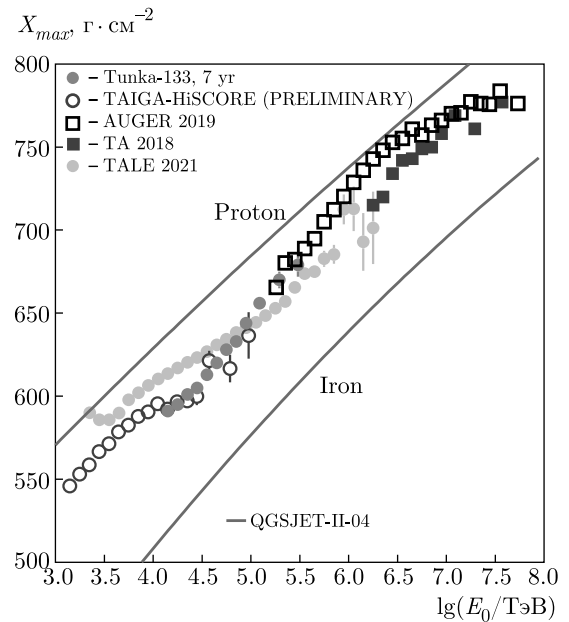


**Рис. 9.** (В цвете онлайн) Сравнение энергетических спектров космических лучей, полученных в различных экспериментах в широком диапазоне энергий: ATIC-2 [36], NUCLEON [37], HAWC [38], Tunka-25, TAIGA-HiSCORE, Tunka-133, KASCADE-Grande [39], IceTop [40], PAO [41], TA+Tale [42]

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-

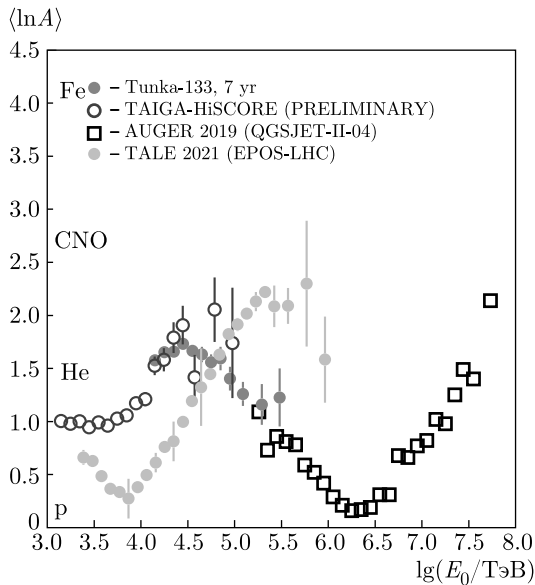


Рис. 11. (В цвете онлайн) Зависимость среднего логарифма атомного номера  $\langle \ln A \rangle$  от энергии: Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE [33], TA [42], TALE [43], Auger [44]

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

<sup>a</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына,

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

<sup>b</sup>Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутский государственный университет 664003, Иркутск, Россия

<sup>c</sup>Объединенный институт ядерных исследований 141980, Дубна, Московская обл., Россия

<sup>d</sup>Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ» 115409, Москва, Россия

<sup>e</sup>Новосибирский государственный университет 630090, Новосибирск, Россия

<sup>f</sup>Институт ядерных исследований Российской академии наук 117312, Москва, Россия

<sup>g</sup>Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук 108840, Москва, Россия

<sup>h</sup>Институт ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук 630090, Новосибирск, Россия

<sup>i</sup>Алтайский государственный университет 656049, Барнаул, Россия

<sup>j</sup>Университет «Дубна» 141982, Дубна, Московская обл., Россия

<sup>k</sup>Max Planck Institute for Physics 80804, Мюнхен, Германия

<sup>l</sup>DESY 15738, Цойтен, Германия

<sup>m</sup>Hamburg University 20148, Гамбург, Германия

<sup>n</sup>University 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. Bagdjev, 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).