

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 524.1

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И МАССОВЫЙ СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ АСТРОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА TAIGA

© 2021 г. В. В. Просин^{a, *}, И. И. Астапов^b, П. А. Безъязыков^c, А. Н. Бородин^d, М. Брюкнер^e,
Н. М. Буднев^c, А. Булан^a, А. Вайдянатан^e, Р. Вишневецкий^e, П. Волчугин^a, Д. Воронин^f,
А. Р. Гафаров^c, А. Ю. Гармаш^{f, g}, В. М. Гребенюк^{d, h}, О. А. Гресс^c, Т. И. Гресс^c, А. А. Гринюк^d,
О. Г. Гришин^c, А. Н. Дячок^c, Д. П. Журов^c, А. В. Загородников^c, А. Л. Иванова^c, Н. Н. Калмыков^a,
В. В. Киндин^b, С. Н. Кирюхин^c, В. А. Кожин^a, Р. П. Кокоулин^b, К. Г. Компаниец^b,
Е. Е. Коростелева^a, Е. А. Кравченко^{f, g}, А. П. Крюков^a, Л. А. Кузьмичев^a, А. Кьявассаⁱ,
М. Лаврова^c, А. А. Лагутин^k, Ю. Лемешев^c, Б. К. Лубсандоржиев^l, Н. Б. Лубсандоржиев^a,
Р. Р. Миргазов^c, Р. Мирзоян^{c, m}, Р. Д. Монхоев^c, Э. А. Осипова^a, А. Пан^c, Л. В. Паньков^c,
А. Л. Пахоруков^c, А. А. Петрухин^b, В. А. Полещук^c, М. Попескуⁿ, Е. Г. Попова^a, А. Порелли^e,
Е. Б. Постников^a, В. С. Птускин^o, А. А. Пушкин^c, Р. И. Райкин^k, Г. И. Рубцов^a, Е. В. Рябов^c,
Я. И. Сагань^{d, h}, В. С. Самолига^c, Л. Г. Свешникова^a, А. Ю. Сидоренков^l, А. А. Силаев^a,
А. А. Силаев (мл.)^a, А. В. Скурихин^a, М. Слунечка^d, А. В. Соколов^{f, g}, Я. Суворкин^b,
В. А. Таболенко^c, А. Танаев^b, Б. А. Тарашанский^c, М. Терновой^b, Л. Г. Ткачев^{d, h},
М. Тлужиконтⁱ, Н. Ушаков^f, Д. Хорнсⁱ, И. И. Яшин^b

^a Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^b Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

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

^d Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

^e ДЭЗИ, Цойтен, D-15738 Германия

^f Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, 630090 Россия

^g Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, Новосибирск, 630090 Россия

^h Университет “Дубна”, Дубна, Московская обл., 141982 Россия

ⁱ Институт экспериментальной физики университета Гамбурга, Гамбург, D-20148 Германия

^j Физический факультет университета Турина и Национальный институт ядерной физики, Турин, 10125 Италия

^k Алтайский государственный университет, Барнаул, 656049 Россия

^l Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^m Институт физики им. М. Планка, Мюнхен, D-80805 Германия

ⁿ Институт космических наук, Илфов, 077125 Румыния

^o Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Московская обл., 108840 Россия

*E-mail: v-prosin@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.06.2021 г.

После доработки 23.06.2021 г.

Принята к публикации 05.07.2021 г.

По данным установки Тунка-133 за 7 лет работы (2009–2017 гг.) и установки TAIGA-HiSCORE за сезон 2019–2020 гг. получены дифференциальный энергетический спектр первичных космических лучей в диапазоне энергий $3 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{18}$ эВ и уточненная зависимость средней глубины максимума ($X_{\max}$) широкого атмосферного ливня (ШАЛ) от энергии в диапазоне энергий 10^{15} – $3 \cdot 10^{17}$ эВ. На предельно больших энергиях наши результаты совпадают с результатами обсерватории имени Пьера Ожэ, полученными прямым методом измерения глубины максимума путем наблюдения флюоресцентного света от ШАЛ. Приводится пересчет от $\langle X_{\max} \rangle$ к параметру $\langle \ln A \rangle$, характеризующему средний состав первичных космических лучей (ПКЛ).

Ключевые слова: первичные космические лучи, энергетический спектр, массовый состав, широкие атмосферные ливни, черенковский свет

DOI: 10.56304/S2079562920060457

1. ВВЕДЕНИЕ

Энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей являются основными характеристиками, которые возможно получить путем регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), создаваемых частицами высоких и сверхвысоких энергий, бомбардирующих Землю практически изотропно. Электроны и позитроны ливня, двигаясь со скоростью выше скорости света в воздухе, генерируют черенковский свет, который можно зарегистрировать в ясные безлунные ночи. Полный поток черенковского света пропорционален полной энергии, рассеянной ливнем в атмосфере, а расстояние от регистрирующей установки до максимума развития ливня определяет пространственно-временное распределение света на уровне наблюдения, которое в свою очередь характеризует массу первичной частицы.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ УСТАНОВОК

Для экспериментальной реализации указанных возможностей в Тункинской долине на расстоянии 50 км к западу от берега озера Байкал были последовательно созданы несколько установок, регистрирующих черенковский свет ШАЛ. Наиболее результативными из них были установки Тунка-25 [1] (2000–2005 гг.), состоявшая из 25 детекторов с чувствительной площадью 0.1 м² каждый, расположенных на площади около 0.1 км² (рис. 1) и Тунка-133 [2] (2006–2017 гг.), состоявшая из 175 детекторов с чувствительной площадью

0.03 м², расположенных на площади около 3 км² (рис. 1).

В настоящее время эстафету продолжает установка TAIGA-HiSCORE [3], входящая в экспериментальный комплекс TAIGA [4], который в настоящее время находится в стадии непрерывного расширения и модернизации. По состоянию на начало 2021 г. установка TAIGA-HiSCORE состоит из трех кластеров в среднем по 30 станций с чувствительной площадью по 0.5 м² в каждой и занимает площадь 0.85 км² (рис. 2). Наиболее чувствительную часть комплекса составляют три атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) с анализом изображения — TAIGA-IACT. Площадь зеркал каждого телескопа 10 м². К концу 2021 г. в комплексе TAIGA будет 120 станций TAIGA-HiSCORE, сгруппированных в четыре кластера на площади около 1 км², и три АЧТ, расположение которых показано на рис. 2.

В том же сезоне в составе комплекса прошел успешные испытания прототип малого широкоугольного телескопа SIT (Small Imaging Telescope) с регистрирующей камерой на основе новых фоточувствительных приборов — кремниевых фотоумножителей (SIPM). На основе этого опыта в дальнейшем планируется создание серии телескопов с чувствительной площадью порядка 1 м² апертурой около 20° и с анализом формы изображения [5].

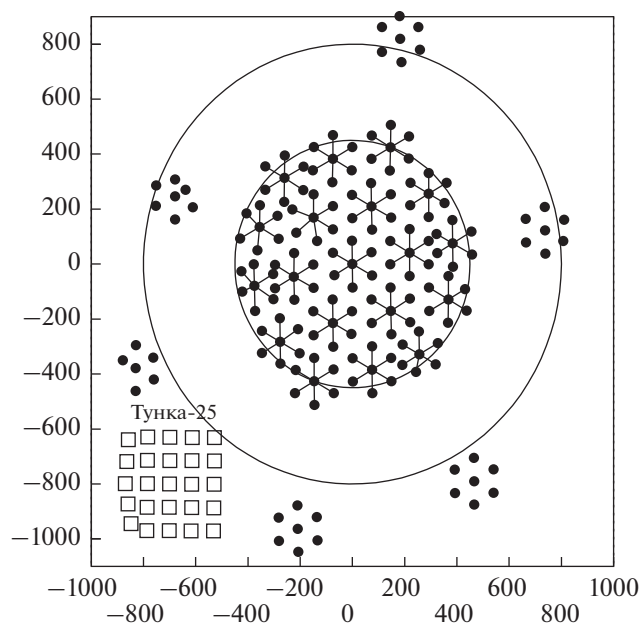


Рис. 1. План установки Тунка-133 в сравнении с установкой Тунка-25. Окружности ограничивают эффективные площади.

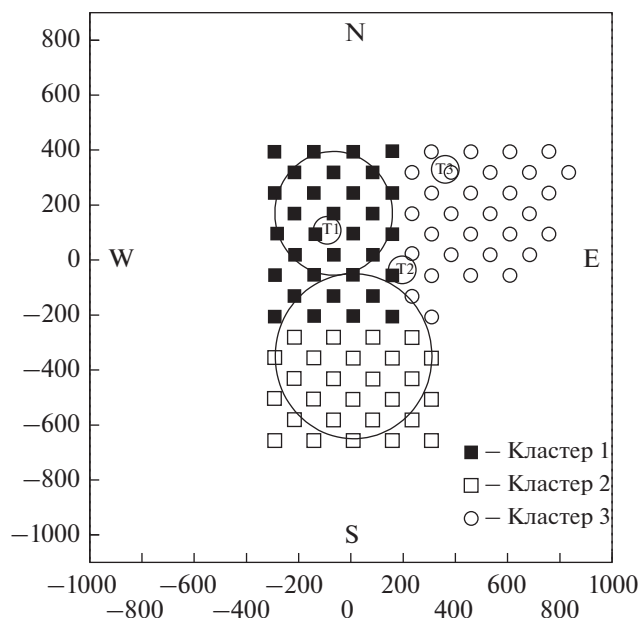


Рис. 2. План комплекса TAIGA в сезоне 2019–2020 гг.: кластеры установки TAIGA-HiSCORE и три телескопа TAIGA-IACT. Окружности ограничивают эффективные площади для отбора событий в настоящей работе.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Установка Тунка-133 [2], набирала данные широких атмосферных ливней (ШАЛ) по черенковскому свету в течение семи зимних сезонов 2009–2014 и 2015–2017 гг. Накоплена информация за 350 ясных безлунных ночей. Полное время набора данных 2175 ч. Регистрировались события в случае совпадения импульсов в трех и более станциях. Средний темп счета был около 2 Гц. В результате полный банк данных составил около $1.7 \cdot 10^7$ событий.

В настоящей работе для установки TAIGA-HiSCORE приводятся данные, полученные с помощью 67 станций (двухкластеров) первой очереди за 69 ясных безлунных ночей 2019–2020 гг. Полное время набора данных 327 ч. Темп счета импульсов на каждой станции устанавливался около 10 Гц. Совпадения импульсов в трех и более станциях находились при обработке данных. Их темп составляет около 20 Гц, и изменения этого темпа отражают изменение состояния атмосферы над установкой. Полный банк данных за указанное время составляет около $2.3 \cdot 10^7$ ливней.

4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

Обработка экспериментальных данных проводится с помощью программ, в которых все аппроксимирующие и пересчетные функции получены из анализа искусственных событий, сгенерированных по программе CORSIKA для диапазона энергий от $3 \cdot 10^{14}$ до 10^{18} эВ [2]. Для каждого ливня восстанавливаются направление прихода, координаты оси на плоскости наблюдения, энергия первичной частицы и крутизна функции пространственного распределения (ФПР) черенковского света. Обработка данных для установки Тунка-133 описана в работе [2]. Для восстановления положения оси используется не ФПР, а функция зависимости амплитуды импульса от расстояния до оси ШАЛ (ФАР), описанная также в работе [2] и обеспечивающая лучшую точность. Энергия ШАЛ определяется по плотности потока черенковского света на расстоянии 200 м от оси. Согласно расчетам, приведенным в [2],

$$\begin{aligned} \lg(E_0) &= C_A + 0.94Q(200), \\ &\text{для } 10^{15} < E_0 < 10^{17} \text{ эВ,} \\ \lg(E_0) &= C_B + 0.95Q(200), \\ &\text{для } 10^{17} < E_0 < 10^{18} \text{ эВ.} \end{aligned} \quad (1)$$

Нормировочная константа C_A находится экспериментально путем сравнения интегрального энергетического спектра, полученного за данную ночь, с эталонным спектром, полученным в эксперименте QUEST [6, 7]. Нормировочная константа C_B связана с C_A очевидным соотношением: $C_B = (0.95C_A - 0.0117)/0.94$.

Основные параметры ШАЛ по данным установки TAIGA-HiSCORE восстанавливаются с использованием тех же алгоритмов и фитирующих функций, что и для установки Тунка-133. Однако, методика определения энергии первичной частицы требует измерения плотности потока света на расстоянии 200 м от оси ШАЛ. Для установки TAIGA-HiSCORE это требование выполняется для 100% случаев лишь при энергии выше 10^{15} эВ. Для меньших энергий пришлось разработать другой алгоритм. Используется плотность потока света в центре или на минимально возможном расстоянии от центра ливня. Положение оси определяется по центру тяжести амплитуд импульсов при числе станций не более пяти. Плотность потока света в центре рассчитывается как среднее значение для двух станций, ближайших к оси. Расчет по программе CORSIKA показал, что из-за больших флуктуаций плотности потока света в центре ошибка измерения энергии существенно больше, чем для 200 м, но в среднем пересчет к энергии возможен по формуле: $\lg(E_0) = C + 0.87Q(200)$. Нормировка этой ветви спектра проводится путем сравнения плотностей, измеренных двумя методами в диапазоне $10^{15} - 2 \cdot 10^{15}$ эВ.

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР В ДИАПАЗОНЕ $3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{18}$ ЭВ

Спектр, полученный описанным выше образом по данным двух установок, приведен на рис. 3 в сравнении с полученным ранее спектром по данным установки Тунка-25. Спектр до классического излома (или “колена”) при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ может быть описан степенным законом с показателем $\gamma_1 = 2.70 \pm 0.01$. Вид, подобный степенному, в достаточно большом диапазоне энергий наблюдается при $2 \cdot 10^{16} < E_0 < 3 \cdot 10^{17}$ эВ. Показатель в этом диапазоне $\gamma_2 = 2.99 \pm 0.01$. Выше энергии $3 \cdot 10^{17}$ эВ (второго “колена”) показатель увеличивается до $\gamma_3 = 3.29 \pm 0.09$. В целом можно констатировать, что с помощью единой методики восстановления энергии первичных частиц по черенковскому свету от широких атмосферных ливней получен энергетический спектр всех частиц в широком диапазоне от $3 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{18}$ эВ (четыре порядка).

На рис. 4 наш спектр сравнивается с результатами некоторых других экспериментов. Хорошая стыковка как с прямыми баллонными [8] и спутниковыми [9], так и горными [10] измерениями на низких энергиях, так и с измерениями гигантских установок на сверхвысоких энергиях (Pierre Auger Observatory [11], Telescope Array [12]) свидетельствует о достигнутом правильном измерении энергий во всем доступном диапазоне.

Спектр имеет сложную структуру с несколькими особенностями, отражающими происхождение космических лучей от многих источников.

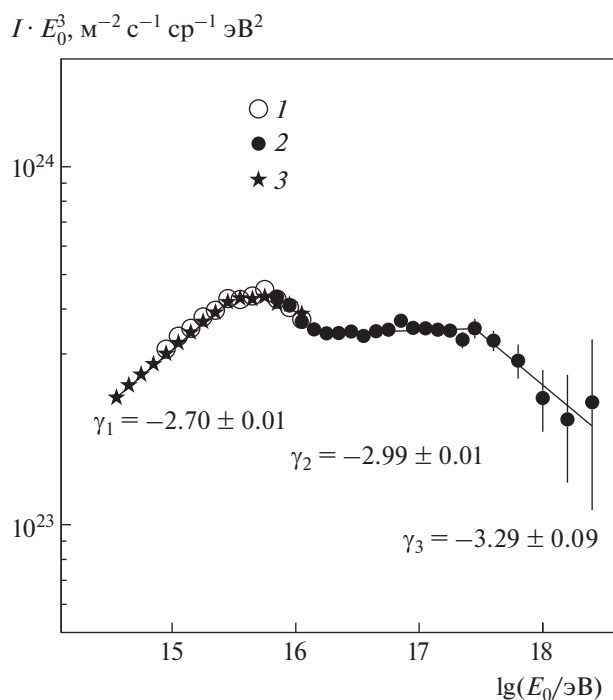


Рис. 3. Дифференциальный энергетический спектр: 1 – Тунка-25 [1], 2 – Тунка-133 [2], 3 – TAIGA-HiSCORE.

6. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ МАКСИМУМА

Восстановление положения оси ливней для задачи измерения глубины максимума ШАЛ несколько отличается от описанного выше тем, что на заключительном этапе исключаются из обработки станции, расположенные на расстоянии более 300 м от оси. После этого положение оси и крутизна ФПР (параметр P) определяются по ограниченному таким образом набору станций. В этом случае диапазон расстояний используемых станций от оси ШАЛ оказывается практически одинаковым для всего энергетического диапазона.

Новое моделирование по программе CORSIKA для большого диапазона энергий подтвердило, что крутизна функции пространственного распределения однозначно определяется только толщиной атмосферы между экспериментальной установкой и глубиной максимума ШАЛ ($\Delta X_{\max} = 965/\cos\theta - X_{\max}$ [г/см²]) независимо от энергии, зенитного угла ливня и сорта первичного ядра. Здесь 965 г/см² – полная глубина атмосферы в месте расположения установок.

Выбор параметра крутизны ФПР, с одной стороны, измеряемого в каждом событии на наших установках в широком диапазоне энергий, а с другой стороны, дающего линейную связь с $\Delta X_{\max}$ в достаточно широком диапазоне изменения этого параметра привел к параметру $P = Q(80)/Q(200)$.

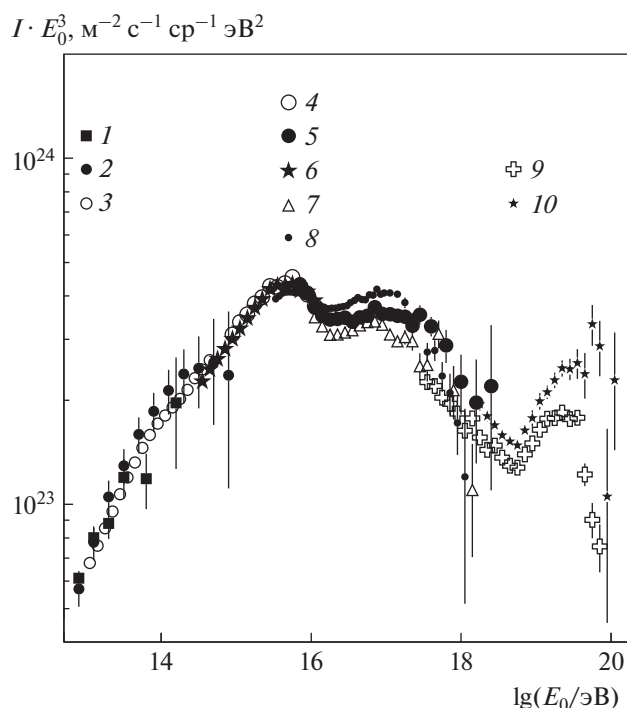


Рис. 4. Сравнение энергетических спектров, полученных в различных работах в широком диапазоне энергий: 1 – ATIC-2 [8], 2 – НУКЛОН [9], 3 – HAWC [10], 4 – Тунка-25, 5 – TAIGA-HiSCORE, 6 – Тунка-133, 7 – KASCADE-Grande [13], 8 – Ice-Top [14], 9 – PAO [11], 10 – TA [12].

Здесь $Q(R)$ – плотность потока черенковского света на расстоянии R в метрах. Расчетная связь параметра P с толщиной атмосферы между положением максимума и установкой приведена на рис. 5. На рисунок нанесены точки для протонов (модели QGSjetII-04 и Sybill2.3) и гелия (модель QGSjetII-04) с энергиями 10^{15} , $3 \cdot 10^{15}$, 10^{16} , $3 \cdot 10^{16}$, 10^{17} эВ и зенитными углами 0° и 30° . Точки могут быть аппроксимированы зависимостью:

$$\begin{aligned} \Delta X_{\max} &= 929 - 103P, \text{ [г/см}^2\text{]} \text{ для } P \leq 3.9 \\ \Delta X_{\max} &= 882 - 91P, \text{ [г/см}^2\text{]} \text{ для } P > 3.9. \end{aligned} \quad (2)$$

Расчетная зависимость близка к линейной для диапазона по параметру P от 2.5 до 9. Стандартное отклонение точек от фитирующей линии для этого диапазона около 15 г/см².

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 практически не работает.

Глубина максимума находится по формуле:

$$X_{\max} = 965/\cos\theta - \Delta X_{\max} \text{ [г/см}^2\text{]}, \quad (3)$$

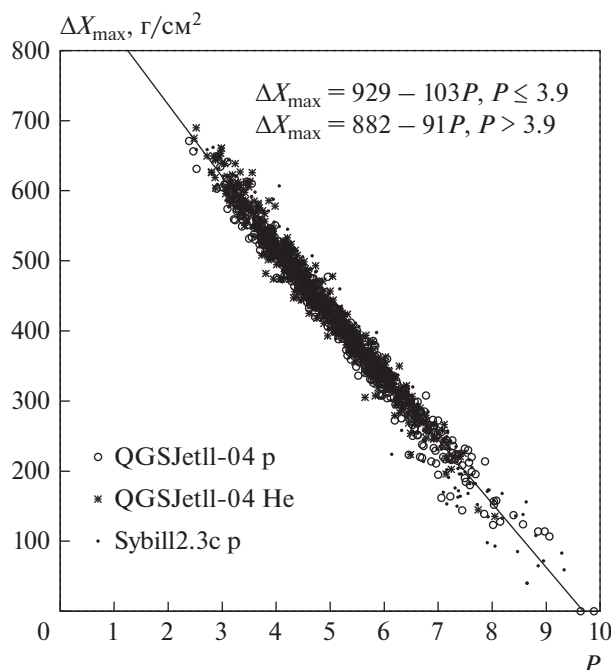


Рис. 5. CORSIKA: модельная зависимость для пересчета от параметра крутизны ФПР P к относительному положению максимума $\Delta X_{\max}$.

где 965 г/см^2 — полная глубина атмосферы в месте расположения установок.

7. СРЕДНЯЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ГЛУБИНА МАКСИМУМА ШАЛ

Новый параметр крутизны ФПР применен для анализа данных обеих установок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE. Для получения неискаженных оценок глубины максимума ливни отбираются по зенитному углу $\theta \leq 30^\circ$ и энергии, обеспечивающей эффективность отбора ливней около 100%, для установки Тунка-133 более $1.25 \cdot 10^{16} \text{ эВ}$, а для установки TAIGA-HiSCORE более $1.25 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$. Полученные распределения экспериментальных событий по параметру P с указанными выше ограничениями приведены на рис. 6. Видно, что более 99% событий попадают в указанный выше диапазон параметров, пригодный для определения глубины максимума.

Полученные для двух установок средние глубины максимума ШАЛ в зависимости от энергии первичной частицы приведены на рис. 7. Данные обеих установок, несмотря на разницу в их геометрии, хорошо стыкуются между собой, обеспечивая широкий энергетический диапазон от 10^{15} до $3 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$. Наши экспериментальные данные сравниваются с результатами прямых измерений глубины максимума, полученными с помощью наблюдения флуоресцентного света ШАЛ на уста-

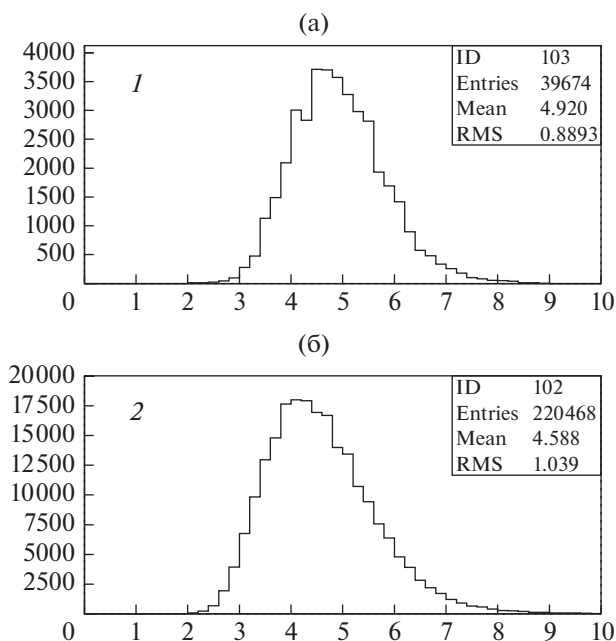


Рис. 6. Распределение экспериментальных событий по параметру P : (а) Тунка-133, (б) TAIGA-HiSCORE.

новках РАО [15] и Telescope Array (TA) [12]. Наблюдается хорошая стыковка наших данных с данными РАО при энергии $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ эВ}$.

Все экспериментальные результаты сравниваются с теоретическими кривыми, рассчитанными по модели QGSJET-II-04 [16] для первичных протонов и ядер железа. Следует отметить, что указанная модель дает самое высокое положение максимума среди всех используемых в настоящее время. Модель EPOS-LHC [17] дает при энергии 10^{17} эВ глубину максимума на $\sim 10 \text{ г/см}^2$ больше, а модель SIBYLL 2.3c [17] — на $\sim 25 \text{ г/см}^2$ больше, чем QGSJET-II-04.

8. СРЕДНИЙ СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Средний состав первичных космических лучей для наземных установок, регистрирующих ШАЛ и имеющих плохое зарядовое разрешение, характеризуется традиционно параметром $\langle \ln A \rangle$ — средним логарифмом атомного номера первичных ядер. Этот параметр линейно связан со средней глубиной максимума ШАЛ, поэтому пересчет к среднему составу для всех установок, включая Auger, производится методом линейной интерполяции между расчетами глубины максимума для протонов и железа. На рис. 8 показаны результаты пересчета от средней глубины максимума к среднему составу по модели QGSJET-II-04. Качественно поведение среднего массового состава повторяет то, что было опубликовано в наших прежних рабо-

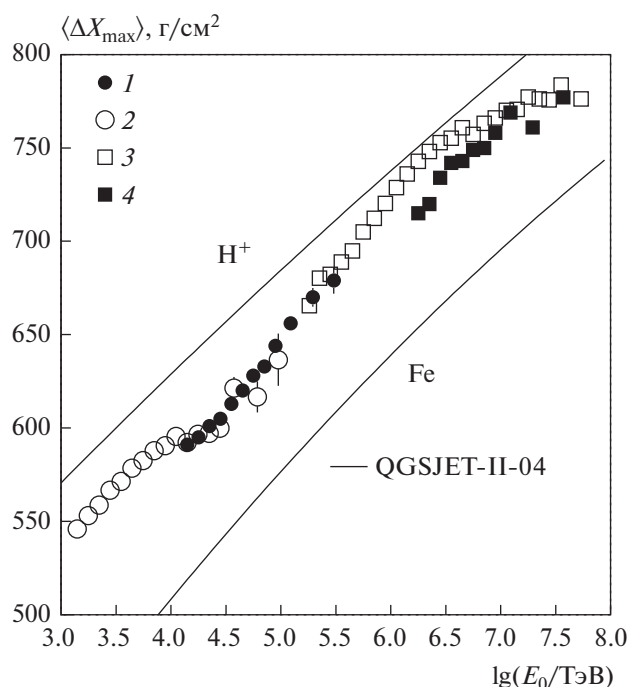


Рис. 7. Зависимость средней глубины максимума ШАЛ $\langle X_{\max} \rangle$ от энергии максимума ШАЛ $\langle X_{\max} \rangle$ от энергии первичной частицы: 1 – Тунка-133, 2 – TAIGA-HiSCORE, 3 – PAO [12], 4 – TA [11].

тах [18]. Состав утяжеляется в диапазоне энергий $3 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$ эВ и становится более легким при дальнейшем росте энергии. Но средний состав во всем рассматриваемом диапазоне энергий оценивается как существенно более легкий, чем в работе [18]. Если раньше в максимуме он был ближе к группе ядер CNO, то теперь максимум более соответствует ядрам гелия (He). Новые оценки среднего состава космических лучей существенно лучше, чем прежние, стыкуются с результатами прямых измерений глубины максимума в PAO.

Следует отметить, что модель EPOS-LHC дает одновременное увеличение как наших оценок $\langle \ln A \rangle$ (при $5 \cdot 10^{16}$ эВ на 0.35), так и оценок этого параметра в PAO. Модель Sibill2.3c увеличивает оценку $\langle \ln A \rangle$ при $5 \cdot 10^{16}$ эВ на 0.60 также с одновременным увеличением оценки этого параметра в PAO.

9. ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА ДЛЯ ЭНЕРГИЙ МЕНЕЕ 10^{15} ЭВ.

Одно из новых направлений исследования массового состава, возможных на астрофизическом комплексе TAIGA, это анализ данных, полученных при совместной работе широкоугольных АЧТ на основе кремниевых фотоумножителей (SIPM) и установки TAIGA-HiSCORE.

Для анализа массового состава предполагается использовать параметры, восстанавливаемые как по данным HiSCORE (E_0 – энергия первичной

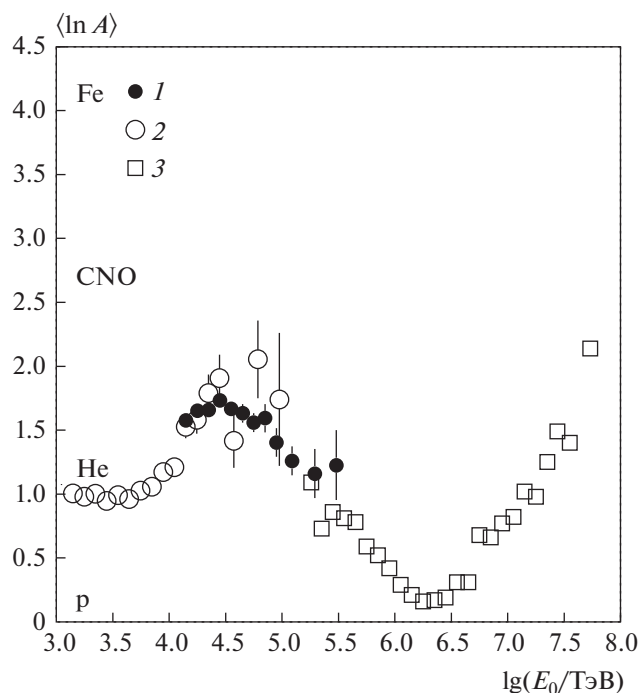


Рис. 8. Зависимость среднего логарифма массы $\langle \ln A \rangle$ от энергии первичной частицы: 1 – Тунка-133, 2 – TAIGA-HiSCORE, 3 – PAO [12].

частицы и параметр P , характеризующий крутизну функции пространственного распределения), так и параметры, восстанавливаемые по данным телескопа (полное число фотоэлектронов в имидже (size), ширина (width) и длина (length) имиджа, отношение длины к ширине и расстояние от центра тяжести имиджа до положения источника на камере). Разработка методики определения массового состава по совместному анализу перечисленных параметров пока не завершена. На данный момент наиболее перспективным представляется двухпараметрический анализ (длина/ширина и P), позволяющий выделить легкую компоненту космических лучей (протоны и гелий).

10. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на УНУ “Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ” (соглашение 13.УНУ.21.0007), поддержана министерством науки высшего образования (проекты FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024), грантом РНФ 19-72-20230 (раздел 2,8), грантом РНФ 19-72-20067 (раздел 5,7) и грантами РФФИ (19-52-44002, 19-32-60003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Budnev N. et al. // Astropart. Phys. 2013. V. 50. P. 18.
2. Budnev N.M. et al. // Astropart. Phys. 2020. V. 117. P. 102406.
3. Prosin V. et al. // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. P. 01003.

4. Kuzmichev L. et al. // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. P. 1375.
5. Chernov D. et al. // J. Instrum. 2020. V. 15. P. 09062.
6. Korosteleva E. et al. // Int. J. Mod. Phys. A. 2005. V. 20. P. 6837.
7. Korosteleva E.E. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Supp.) 2007. V. 165. P. 74.
8. Panov A.D. et al. // Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys. 2009. V. 73. No. 5. P. 564.
9. Turundaevskiy A.N. et al. // Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 353.
10. Alfaro R. et al. (HAWC Collab.) // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. P. 122001.
11. Schulz A. (for P. A. Collab.) // Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro. 2013. P. 769.
12. Abbasi R.U. et al. (T. A. Collab.) // Astrophys. J. 2018. V. 858. P. 76.
13. Apel W.D. et al. // Astropart. Phys. 2012. V. 36. P. 183.
14. Aartsen M.G. et al. // Phys. Rev. Lett. D. 2013. V. 88. P. 042004.
15. Yushkov A. (for P. A. Collab.) // Proc. 36th ICRC, Madison. USA. 2019. PoS(ICRC2019). P. 482.
16. Ostapchenko S., Bleicher M. // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. P. 051501; arXiv: 1601.06567.
17. Tanguy P. // EPJ Web Conf. 2019. V. 208. P. 02002.
18. Prosin V.V. et al. // EPJ Web Conf. 2016. V. 121. P. 03004.

Energy Spectrum and Mass Composition of Cosmic Rays from the Data of the Astrophysical Complex Taiga

V. Prosin^{1, *}, I. Astapov², P. Bezyazeekov³, A. Borodin⁴, M. Brückner⁵, N. Budnev³, A. Bulan¹,
A. Vaidyanathan⁵, R. Wischnewski⁵, P. Volchugov¹, D. Voronin⁶, A. Gafarov³, A. Garmash^{6, 7},
V. Grebenyuk^{4, 9}, O. Gress³, T. Gress³, A. Grinyuk⁴, O. Grishin³, A. Dyachok³, D. Zhurov³,
A. Zagorodnikov³, A. Ivanova³, N. Kalmykov¹, V. Kindin², S. Kiryuhin³, V. Kozhin¹,
R. Kokoulin², K. Kompaniets², E. Korosteleva¹, E. Kravchenko^{6, 7}, A. Kryukov¹,
L. Kuzmichev¹, A. Chiavassa¹⁰, M. Lavrova³, A. Lagutin¹¹, Yu. Lemeshev³, B. Lubsandorzhev¹²,
N. Lubsandorzhev¹, R. Mirgazov³, R. Mirzoyan^{3, 13}, R. Monkhoev³, E. Osipova¹, A. Pan³, L. Pankov³,
A. Pakhorukov³, A. Petrukhin², V. Poleschuk³, M. Popescu¹⁴, E. Popova¹, A. Porelli⁵, E. Postnikov¹,
V. Ptuskin¹⁵, A. Pushnin³, R. Raikin¹¹, G. Rubtsov¹², E. Rjabov³, Y. Sagan^{4, 8}, V. Samoliga³,
L. Sveshnikova¹, A. Sidorenkov¹², A. Silaev¹, A. Silaev (junior)¹, A. Skurikhin¹, M. Slunicka⁴,
A. Sokolov^{6, 7}, Y. Suvorkin², V. Tabolenko³, A. Tanaev², B. Tarashansky³, M. Ternovoy², L. Tkachev^{4, 8},
M. Tluczykont⁹, N. Ushakov⁶, D. Horns⁹, and I. Yashin².

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

³Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia

⁴Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

⁵Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Zeuthen, D-15738 Deutschland

⁶Dipartimento di Fisica Generale Università di Torino e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Torino, 10125 Italy

⁷Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, 630090 Russia

⁸Budker Institute of Nuclear Physics (BINP), Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

⁹Dubna State University, Dubna, Moscow oblast, 141982 Russia

¹⁰Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Hamburg, D-20148 Deutschland

¹¹Altai State University, Barnaul, 656049 Russia

¹²Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

¹³Max-Planck-Institut für Physik, München, D-80805 Deutschland

¹⁴Institute of Space Science, Magurele, Ilfov, 077125 Romania

¹⁵Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN),
Troitsk, Moscow oblast, 108840 Russia

*e-mail: v-prosin@yandex.ru

Received June 19, 2021; revised June 23, 2021; accepted July 5, 2021

The differential energy spectrum of cosmic rays in the energy range of $3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{18}$ eV and the corrected dependence of the mean depth of the maximum $\langle X_{\max} \rangle$ of an extensive air shower (EAS) inside the wide energy range of $10^{15} - 3 \cdot 10^{17}$ eV have been obtained by the data of the Tunka-133 array for 7 years of operation (2009–2017) and the TAIGA-HiSCORE array for the 2019–2020 season of operation. At the extremely high energy our results agree with the results of the Pierre Auger observatory based on direct measurements of the maximum depth by the observation of fluorescent light from EAS. The recalculation from the $\langle X_{\max} \rangle$ to the parameter $\langle \ln A \rangle$, which characterizes the average composition of the primary cosmic rays is presented.

Keywords: primary cosmic rays, energy spectrum, mass composition, extensive air showers, Cherenkov light