

УДК 524.1

ГЛУБИНА МАКСИМУМА ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ (ШАЛ) И СРЕДНИЙ СОСТАВ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 10^{15} – 10^{18} эВ ПО ДАННЫМ УСТАНОВОК ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ШАЛ В ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЕ ТУНКА-133 И TAIGA-HISCORE

© 2021 г. В. В. Просин¹*, И. И. Астапов², П. А. Безъязыков³, А. Н. Бородин⁴, М. Брюкнер⁵, Н. М. Буднев³, А. Булан¹, А. Вайдянатан⁵, Р. Вишневецкий⁵, П. Волчугов¹, Д. Воронин⁶, А. Р. Гафаров³, А. Ю. Гармаш^{6,7}, В. М. Гребенюк^{4,8}, О. А. Гресс³, Т. И. Гресс³, А. А. Гринюк⁴, О. Г. Гришин³, А. Н. Дячок³, Д. П. Журов³, А. В. Загородников³, А. Л. Иванова³, Н. Н. Калмыков¹, В. В. Киндин², С. Н. Кириухин³, В. А. Кожин¹, Р. П. Кокоулин², К. Г. Компаниец², Е. Е. Коростелева¹, Е. А. Кравченко^{6,7}, А. П. Крюков¹, Л. А. Кузьмичев¹, А. Кьявасса¹⁰, М. Лаврова³, А. А. Лагутин¹¹, Ю. Лемешев³, Б. К. Лубсандоржиев¹², Н. Б. Лубсандоржиев¹, Р. Р. Миргазов³, Р. Мирзоян^{3,13}, Р. Д. Монхоев³, Э. А. Осипова¹, А. Пан³, **М. И. Панасюк**¹, Л. В. Паньков³, А. Л. Пахоруков³, А. А. Петрухин², В. А. Полещук³, М. Попеску¹⁴, Е. Г. Попова¹, А. Порелли⁵, Е. Б. Постников¹, В. С. Птускин¹⁵, А. А. Пушкин³, Р. И. Райкин¹¹, Г. И. Рубцов¹², Е. В. Рябов³, Я. И. Сагань^{4,8}, В. С. Самолига³, Л. Г. Свешникова¹, А. Ю. Сидоренков¹², А. А. Силаев¹, А. А. Силаев (мл.)¹, А. В. Скурихин¹, М. Слунечка⁴, А. В. Соколов^{6,7}, Я. Суворкин², В. А. Таболенко³, А. Танаев², Б. А. Тарашанский³, М. Терновой², Л. Г. Ткачев^{4,8}, М. Тлужиконт⁹, Н. Ушаков⁶, Д. Хорнс⁹, И. И. Яшин²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Иркутский государственный университет”, Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутск, Россия

⁴Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁵Немецкий электронный синхротрон (DESY), Цойтен, Германия

⁶Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

⁷Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук”, Нижний Новгород, Россия

⁸Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области “Университет “Дубна”, Дубна, Россия

⁹Институт экспериментальной физики университета Гамбурга, Гамбург, Германия

¹⁰Физический факультет университета Турина и Национальный институт ядерной физики, Турин, Италия

¹¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Алтайский государственный университет”, Барнаул, Россия

¹²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

¹³Институт Макса Планка, Мюнхен, Германия

¹⁴Институт космических наук, Бухарест, Румыния

¹⁵Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

По данным установки Тунка-133 за 7 лет работы (2009–2017 гг.) и установки TAIGA-HiSCORE за сезон 2019–2020 гг. получена уточненная зависимость глубины максимума от энергии в широком диапазоне энергий от 10^{15} до 10^{18} эВ. На предельных энергиях наши результаты совпадают с результатами обсерватории Пьера Ожэ. Приводится пересчет к параметру $\langle \ln A \rangle$, характеризующему средний состав ПКЛ.

DOI: 10.31857/S036767652104030X

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Установка Тунка-133 [1] набирала данные в течение 7 зимних сезонов 2009–2014 и 2015–2017 гг. Накоплена информация за 350 ясных безлунных ночей. Полное время набора данных 2175 ч.

Установка TAIGA-HiSCORE [2] находится в стадии непрерывного расширения и модернизации. Здесь приводятся данные, полученные с помощью 59 станций первой очереди, образующих 2 кластера (32 станции – в первом и 27 станций – во втором), за 69 ясных безлунных ночей 2019–2020 гг. Полное время набора данных 327 ч. 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 10^{14} до 10^{18} эВ [1]. Для каждого ливня восстанавливаются направление прихода, координаты оси на плоскости наблюдения, энергия первичной частицы и крутизна ФПР черенковского света.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

Обработка данных для установки Тунка-133 описана в работе [1].

Основные параметры ШАЛ по данным установки TAIGA-HiSCORE восстанавливаются с использованием тех же алгоритмов и фитирующих функций, что и для установки Тунка-133.

Новое моделирование по программе CORSIKA для большего диапазона энергий подтвердило, что крутизна функции пространственного распределения однозначно определяется только толщиной атмосферы между экспериментальной установкой и глубиной максимума ШАЛ:

$$\Delta X_{max} = X_0 / \cos \theta - X_{max} \quad (1)$$

независимо от энергии, зенитного угла ливня θ и сорта первичного ядра. Здесь X_0 – глубина атмосферы.

Выбор параметра ФПР, с одной стороны, чувствительного к глубине, а с другой стороны, измеряемого в каждом событии на наших установках в широком диапазоне энергий, привел к параметру $P = Q(80)/Q(200)$.

Использованы результаты расчетов для ливней от протонов и железа с энергиями от 10^{15} до 10^{18} эВ и зенитными углами 0° и 30° . Зависимость ΔX_{max} от параметра P хорошо фитируется двумя линейными отрезками

$$\Delta X_{max} = 1007 - 129.5P, \text{ [г/см}^2 \text{ для } P \leq 3.724, \quad (2)$$

$$\Delta X_{max} = 845 - 86.0P, \text{ [г/см}^2 \text{] для } P > 3.724. \quad (3)$$

Глубина максимума X_{max} события с зенитным углом θ определяется из ΔX_{max} , обращая формулу (1) для $X_0 = 965 \text{ г/см}^2$.

СРЕДНЯЯ ГЛУБИНА МАКСИМУМА ШАЛ

Новый параметр крутизны ФПР применен для анализа данных обеих установок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE. Для установки Тунка-133 ливни отбирались в круге радиусом 450 м с зенитными углами 0° – 30° и с энергией более 10^{16} эВ. По этим критериям отобрано 69000 ливней. Для установки TAIGA-HiSCORE отбирались ливни в круге радиусом 225 м, лежащем в первом кластере и в круге радиусом 300 м, расположенном внутри геометрии первого и второго кластеров, с зенитными углами 0° – 30° и с энергией более $1.5 \cdot 10^{15}$ эВ. По этим критериям отобрано 167000 событий. Полученные для двух установок средние глубины максимума ШАЛ в зависимости от энергии первичной частицы приведены на рис. 1. Данные обеих установок, несмотря на разницу в их геометрии, хорошо стыкуются между собой, обеспечивая широкий энергетический диапазон от 10^{15} до 10^{18} эВ. Наши экспериментальные данные сравниваются с результатами прямых измерений глубины максимума, полученными с помощью наблюдения ионизационного света ШАЛ на установках Auger (РАО) [3] и Telescope Array (ТА) [4]. Наблюдается хорошая стыковка наших данных с данными РАО при энергии $\sim 3 \cdot 10^{17}$ эВ.

Все экспериментальные результаты сравниваются с теоретическими кривыми, рассчитанными по модели QGSJET-II-04 [5, 6] для первичных протонов и ядер железа. Отметим, что указанная модель дает самое высокое положение максимума среди всех используемых в настоящее время. Модель EPOS-LHC [6] дает при энергии 10^{17} эВ глубину максимума на $\sim 10 \text{ г/см}^2$ больше, а модель SIBYLL 2.3c [6] – на $\sim 25 \text{ г/см}^2$ больше, чем QGSJET-II-04.

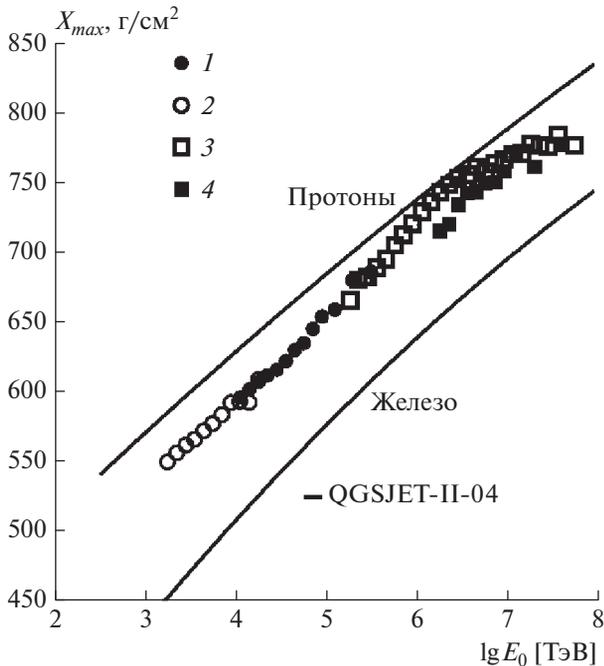


Рис. 1. Средняя глубина максимума ШАЛ: 1 – Тунка-133 (2009–2017), 2 – TAIGA-HiSCORE (2019–2020), 3 – Pierre Auger Observatory (2019), 4 – Telescope Array (2018).

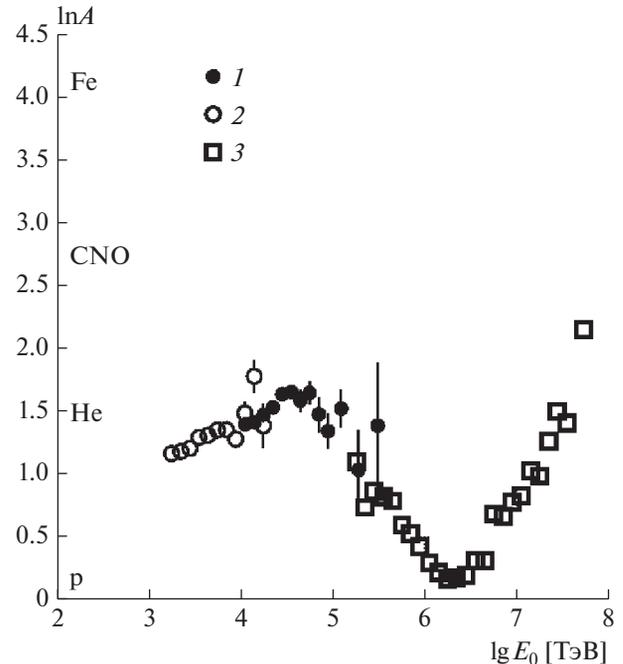


Рис. 2. Результаты пересчета от средней глубины максимума ШАЛ к параметру $\langle \ln A \rangle$ по модели QGSJET-II-04: 1 – Тунка-133 (2009–2017), 2 – TAIGA-HiSCORE (2019–2020), 3 – Pierre Auger Observatory (2019).

СРЕДНИЙ СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Средний состав первичных космических лучей для наземных установок, регистрирующих ШАЛ и имеющих плохое зарядовое разрешение, характеризуется традиционно параметром $\langle \ln A \rangle$ – усредненным значением логарифма 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. 2 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 работах [7]. Состав утяжеляется в диапазоне энергий 10^{15} – $5 \cdot 10^{16}$ 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 [7]. Если раньше в максимуме рассматриваемой кривой он был ближе к группе CNO, то теперь максимум более соответствует ядрам гелия (He). Новые оценки состава существенно лучше, чем прежние, стыкуются с результатами прямых измерений глубины максимума в PAO.

Следует отметить, что модель EPOS-LHC [6] 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 [6] увеличивает оценку $\langle \ln A \rangle$ при $5 \cdot 10^{16}$ эВ на 0.60 также с одновременным увеличением оценки этого параметра в PAO.

Результаты работы требуют дальнейшего уточнения с помощью модельных расчетов.

Работа поддержана Минобрнауки России (тема государственного задания FZZE-2020-0024, соглашение № 075-15-2019-1631) и РФФ (проект № 19-72-20067; раздел 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Budnev N.M., Chiavassa A., Gress O.A. et al. // Astropart. Phys. 2020. V. 117. Art. No. 102406.
2. Prosin V., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // EPJ Web Conf. 2019. V. 210. Art. No. 01003.
3. Yushkov A. for the Pierre Auger Collaboration // Proc. 361CRC (Madison, 2019). Art. No. 482.
4. Abbasi R.U., Abe M., Abu-Zayyad T. et al. (Telescope Array Collaboration) // Astrophys. J. 2018. V. 858. P. 76.
5. Ostapchenko S., Bleicher M. // Phys. Rev. D 93. 2016. Art. No. 051501.
6. Pierog T. // EPJ Web. Conf. 2019. V. 208. Art. No. 02002.
7. Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al. // EPJ Web Conf. 2016. V. 121. Art. No. 03004.

Extensive air shower (EAS) maximum depth and mean mass composition of the primary cosmic rays in the energy range 10^{15} – 10^{18} eV by the data of EAS Cherenkov light arrays TUNKA-133 and TAIGA-HISCORE

V. V. Prosin^a, I. I. Astapov^d, P. A. Bezyazeev^b, A. N. Borodin^c, M. Brückner^l, N. Budnev^b, A. Bulan^a, A. Vaidyanathan^e, R. Wischnewskiⁱ, P. Volchugov^a, D. Voronin^f, A. Gafarov^b, A. Garmash^{e, h}, V. Grebenyuk^{c, j}, O. Gress^b, T. Gress^b, A. Grinyuk^c, O. Grishin^b, A. Dyachok^b, D. Zhurov^b, A. Zagorodnikov^b, A. Ivanova^b, N. Kalmykov^a, V. Kindin^d, S. Kiryuhin^b, V. Kozhin^a, R. Kokoulin^d, K. Kompaniets^d, E. Korosteleva^a, E. Kravchenko^{e, h}, A. Kryukov^a, L. Kuzmichev^a, A. Chiavassaⁿ, M. Lavrova^c, A. Lagutinⁱ, Yu. Lemeshev^b, B. Lubsandorzhev^f, N. Lubsandorzhev^a, R. Mirgazov^b, R. Mirzoyan^{a, k}, R. Monkhoev^b, E. Osipova^a, A. Pan^c, **M. Panasyuk**^a, L. Pankov^b, A. Pakhorukov^b, A. Petrukhin^d, V. Poleschuk^b, M. Popescu^o, E. Popova^a, A. Porelli^l, E. Postnikov^a, V. Ptuskin^g, A. Pushnin^b, R. Raikinⁱ, G. Rubtsov^f, E. Rjabov^b, Y. Sagan^{c, j}, V. Samoliga^b, L. Sveshnikova^a, A. Sidorenkov^a, A. Silaev^a, A. Silaev, Jr.^a, A. Skurikhin^a, M. Sluncecka^c, A. Sokolov^{e, h}, Y. Suvorkin^b, V. Tabolenko^b, A. Tanaev^b, B. Tarashansky^b, M. Ternovoy^b, L. Tkachev^{c, j}, M. Tluczykont^m, N. Ushakov^f, D. Horns^m, I. Yashin^d

^aSkobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

^bInstitute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

^cJoint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

^dNational Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

^eNovosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

^fInstitute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

^gPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Russia

^hBudker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

ⁱAltai State University, Barnaul, Russia

^jDubna State University, Dubna, Russia

^kMax-Planck-Institute for Physics, Munich, Germany

^lDESY, Zeuthen, Germany

^mInstitut für Experimentalphysik, University of Hamburg, Hamburg, Germany

ⁿDipartimento di Fisica Generale Università di Torino and INFN, Torino, Italy

^oInstitute of Space Science, Bucharest, Romania

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

The corrected energy dependence of the EAS maximum depth was obtained in a wide energy range of 10^{15} – 10^{18} eV by the Tunka-133 array 7 years operation (2009–2017) results and the TAIGA-HiSCORE array 2019–2020 season results. At the highest energies, our results agree with those of the Pierre Auger Observatory. The conversion of EAS maximum depth to the $\langle \ln A \rangle$ parameter, which characterizes the average composition of the primary cosmic rays, is presented.