

УДК 524.1

ФЛУКТУАЦИИ ГЛУБИНЫ МАКСИМУМА РАЗВИТИЯ ШАЛ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ 10^{17} ЭВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧАСТОТАХ 30–35 МГц

© 2019 г. С. П. Кнуренко¹, И. С. Петров¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение
“Институт космических исследований и аэронавтики имени Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук”, Якутск, Россия

*E-mail: igor.petrov@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

В работе представлены результаты по продольному развитию широких атмосферных ливней (ШАЛ) сверхвысоких энергий, полученные из наблюдений радиоизлучения на Якутской установке за период 1986–1989 и 2009–2014 гг. А, именно, определена глубина максимума индивидуальных ливней и проведен статистический анализ X_{max} , с целью оценки флуктуаций развития ШАЛ $\sigma(X_{max})$ в области энергий 10^{17} – 10^{18} эВ. Показано, что $\sigma(X_{max})$ в области энергий 10^{17} – 10^{18} эВ имеют величину равную 50 – 60 г · см², что не противоречит смешанному составу космических лучей – протонам и ядрам гелия. На это указывают и данные о зависимости величины X_{max} от энергии.

DOI: 10.1134/S0367676519080192

ВВЕДЕНИЕ

Метод регистрации радиоизлучения является еще одним методом для исследования космических лучей (КЛ) [1]. Антенны радиоизлучения регистрируют ту же компоненту ливня, что и оптические детекторы – электромагнитную. В отличие от оптических детекторов, регистрация антеннами не зависит от времени суток, мало зависит от прозрачности атмосферы и от погодных условий (кроме гроз [2–4]). На данный момент метод радиоизлучения является идеальным дополнительным методом регистрации ШАЛ для увеличения получаемой информации для существующих установок с детекторами заряженных частиц. В данной работе представлены результаты анализа флуктуации $\sigma(X_{max})$ ливней предельно высоких энергий, а также восстановление параметров ливня по данным радиоизлучения. Широко известно, что величина $\sigma(X_{max})$ и форма распределения X_{max} на заданной энергии чувствительна к массовому составу частиц, которые инициируют ШАЛ. Следовательно, анализируя флуктуации X_{max} можно подойти к изучению природы галактической и метagalacticкой компонент КЛ.

ления радиосигнала ШАЛ ($P = A_1/A_2$) к глубине максимума развития ливня (X_{max}). Связь параметра P и X_{max} носит экспоненциальный характер и может быть описана следующей формулой:

$$X_{max} = 856.1 \cdot \ln \left(0.3149 \frac{A_{175}}{A_{725}} \right)^{0.434}, \quad (\text{г} \cdot \text{см}^{-2}), \quad (1)$$

где A_{175} – амплитуда радиосигнала на расстоянии 175 м, A_{725} – амплитуда радиосигнала на расстоянии 725 м.

На Якутской установке связь $P = A(R_1)/A(R_2)$ с X_{max} была получена эмпирически, используя синхронные измерения радио и черенковского излучений [5]:

$$X_{max} = (660 \pm 15) + (100 \pm 5) \frac{P - 11.5}{3}, \quad (\text{г} \cdot \text{см}^{-2}). \quad (2)$$

Формула (2) с достаточной точностью справедлива для интервала глубин $\Delta X_{max} = 600$ – 800 г · см^{–2}, ниже этих глубин ошибки определения X_{max} возрастают.

Используя формулу (2) по форме ФПР радиоизлучения ШАЛ, была получена оценка X_{max} при разных первичных энергиях (рис. 1).

СВЯЗЬ ФОРМЫ ФУНКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ (ФПР) С X_{max} РАЗВИТИЯ ШАЛ

В расчетах была показана чувствительность наклона функции пространственного распре-

ЗАВИСИМОСТЬ X_{max} ОТ ЭНЕРГИИ ЛИВНЯ. СРАВНЕНИЕ С МОДЕЛЬНЫМИ РАСЧЕТАМИ

Данные Якутской установки, полученные из измерений черенковского света (точки) и радиоизлу-

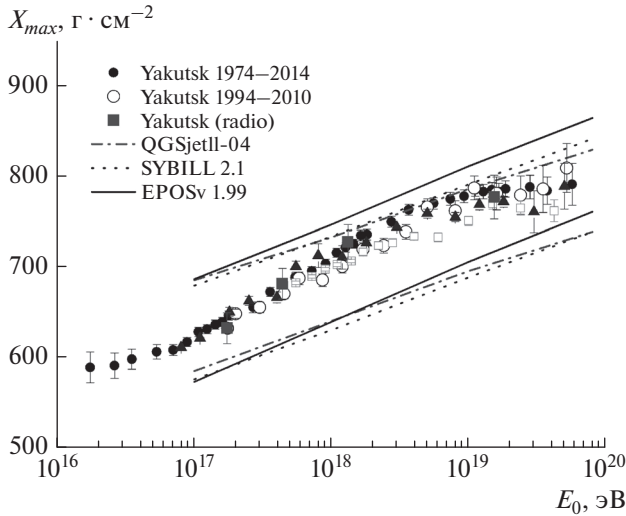


Рис. 1. Зависимость X_{max} от энергии, полученная по данным наблюдений черенковского излучения за период 1974–2014 и 1994–2010 гг. на Якутской установке ШАЛ. Сравнение с X_{max} полученной на радио установке и с модельными расчетами. Точки – данные Якутской установки, полученные из измерений черенковского света, квадраты – данные Якутской установки, полученные по радиоизлучению ШАЛ, открытые квадраты – результаты установок Auger, черные треугольники – HiRes.

чения ШАЛ (квадраты) вместе с данными установок Auger (открытые квадраты) и HiRes (черные треугольники), показаны на рис. 1. Видно, что экспериментальные данные всех установок в пределах достигнутых точностей хорошо согласуются между собой и указывают на неравномерное продвижение X_{max} вглубь атмосферы. Если рассмотреть разные интервалы по энергии, то видим, что ER имеет следующие значения 48 ± 6 , 78 ± 5 , 63 ± 6 , 50 ± 7 . Такое продвижение X_{max} скорее всего означает, что атомный вес первичных частиц изменяется при переходе от одного интервала по энергии к другому и связано это с процессами происходящими в источниках и взаимодействием частиц в процессе дрейфа в магнитных полях космического пространства. Также на рис. 1 нанесены и расчеты по моделям адронных взаимодействий QGSjet-01 [6], QGSjetII-04 [7] и EPOSv1.99 для протона и ядра железа. Сравнение с данными Auger [8] и HiRes [9, 10]. Рис. 1 указывает на переменный массовый состав первичных частиц. В области энергий 10^{16} – 10^{17} эВ состав скорее имеет больше тяжелых ядер, при энергиях 10^{17} – 10^{18} эВ – состав преимущественно состоит из протонов и легких ядер, выше 10^{19} эВ состав обогащается тяжелыми ядрами. Этому не противоречит и анализ скорости смещения X_{max} в широкой области энергий.

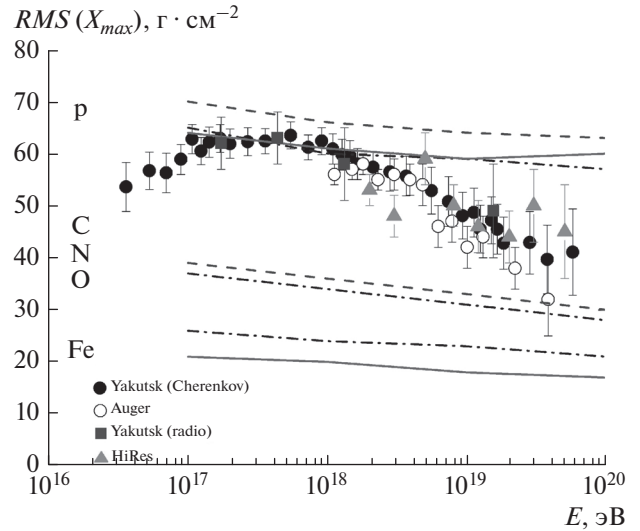


Рис. 2. Флуктуации глубины максимума развития ШАЛ в области энергий $3 \cdot 10^{16}$ – 10^{20} эВ. Линии расчеты по моделям QGSjet-01, QGSjetII-04 и EPOSv1.99 для первичного протона, ядер CNO (модели QGSjet-01, QGSjetII-04) и ядра железа. Сравнение с данными Auger и HiRes.

ФЛУКТУАЦИИ $\sigma(X_{max})$. СРАВНЕНИЕ С РАСЧЕТАМИ ДЛЯ РАЗНЫХ ЯДЕР

Для анализа флуктуаций X_{max} была использована база данных по черенковскому свету ШАЛ за период с 1970 по 2015 гг. Так как статистика ливней позволяла, массив данных был разбит на мелкие интервалы по энергии с шагом 1.5 и в каждом интервале найдена величина $\sigma(X_{max})$. Результаты Якутской установки приведены на рис. 2. Там же нанесены данные других установок и расчеты по современным моделям адронных взаимодействий (рис. 2) для первичного протона, ядер CNO и ядра железа. Экспериментальные данные всех установок в пределах статистических ошибок согласуются между собой, поэтому можно говорить, что полученная зависимость флуктуаций X_{max} обусловлена вероятно изменяющимся с энергией массовым составом первичных частиц. В интервале энергий 10^{16} – 10^{17} эВ флуктуации X_{max} составляют 50 – 60 г·см⁻² и имеют тенденцию к росту. В области энергий 10^{17} – 10^{18} эВ они почти постоянные и выше 10^{18} эВ заметно уменьшаются, достигая значений 50 – 40 г·см⁻². Сравнивая экспериментальные данные $\sigma(X_{max})$ с модельными расчетами для разных ядер, можно сказать, что эксперимент указывает на изменение массового состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Якутская комплексная установка более 45 лет работает в непрерывном режиме, измеряя элект-

троны, мюоны и черенковский свет ШАЛ. При этом зарегистрировано более $5 \cdot 10^6$ ливней в области энергий выше 10^{15} эВ. С 2009 г. в непрерывном режиме на установке ведется регистрация радиоизлучения от частиц ШАЛ на частоте 30–35 МГц. Полученные данные по радиоизлучению расширяют возможности экспериментального изучения характеристик ливней и сравнения их с характеристиками, полученными по другим компонентам ШАЛ. Как видно из рис. 1 и 2, эти результаты хорошо согласуются с данными других экспериментов. Используя большую базу экспериментальных данных, нами проанализирована черенковская компонента ШАЛ, по которой было восстановлено продольное развитие ливней в области энергий 10^{16} – 10^{20} эВ и выявлена зависимость X_{max} и $\sigma(X_{max})$ от энергии. Показано, что продвижение X_{max} с ростом энергии имеет неравномерный ход. Скорость смещения X_{max} на декаду по энергии E . R принимает значения 48 ± 6 , 78 ± 5 , 63 ± 6 , 50 ± 7 в интервалах, указанных выше в тексте. Как видно, точки перегиба приходятся на энергию $\sim 10^{17}$ и $\sim 8 \cdot 10^{18}$ эВ, т.е. на область “second knee” и “bump–deer”. Из этого можно предположить, что такой характер продвижения X_{max} к уровню моря связан с изменением массового состава космических лучей. Сравнивая экспериментальные данные $\sigma(X_{max})$ с модельными расче-

тами для разных ядер, можно сказать, что эксперимент в Якутске указывает на изменение массового состава. При энергии 10^{17} – 10^{18} эВ доля протонов достигает максимума и составляет 60–80%, далее постепенно уменьшается и в области энергий 10^{19} – 10^{20} эВ космические лучи состоят из ядер гелия, CNO и более тяжелых элементов.

Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ № 16-29-13019-офи_м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schröder F. // *Progr. Part. Nucl. Phys.* 2017. V. 93. P. 1.
2. Buitink S., Apel W.D., Asch T. et al. // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 467. P. 385.
3. Apel W.D., Arteaga J.C., Bähren L. et al. // *Adv. Space Res.* 2011. V. 48. P. 1295.
4. Schellart P., Trinh T.N.G., Buitink S. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 114. Art. № 165001.
5. Ellingson S., Simonetti J., Patterson C. // *IEEE Trans. Anten. Propag.* 2007. V. 55. P. 826.
6. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S. // *Phys. Atom. Nucl.* 1993. V. 56. P. 346.
7. Ostapchenko S. // *Nucl. Phys. B.* 2006. V. 151. P. 143.
8. Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. Art. № 091101.
9. Cazon L., Ulrich R. // *Astropart. Phys.* 2012. V. 38. P. 41.
10. Abbasi R., Abu-Zayyad T., Al-Seady M. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. Art. № 161101.