ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 8, с. 1169–1172

УДК 524.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ РАДИОМЕТОДОМ НА ЧАСТОТЕ 30–35 МГц НА ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКЕ

© 2021 г. С. П. Кнуренко[1], И. С. Петров[1, *]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт космофизических исследований и аэрономии имени Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академия наук, Якутск, Россия*

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

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.
После доработки 12.03.2021 г.
Принята к публикации 28.04.2021 г.

Приводятся результаты исследования ливней предельных энергий $E \geq 10^{18}$ эВ, с помощью радиоантенн в диапазоне частот 30–35 МГц на Якутской установке. Описываются методы определения основных характеристик космических лучей: энергии широкого атмосферного ливня, глубины максимума X_{max}, углов прихода по измерениям радиоизлучения. Для ливней с энергией $E \geq 10^{19}$ эВ было найдено их расположение на карте неба в галактических координатах с целью поиска источников космических лучей предельных энергий.

DOI: 10.31857/S0367676521080123

ВВЕДЕНИЕ

Радиоизлучение широкого атмосферного ливня (ШАЛ) производится заряженными частицами в магнитном поле Земли [1, 2] и благодаря эффекту Аскарьяна [3], который возникает при избытке отрицательного заряда в диске ШАЛ в атмосфере. Амплитуда излучения зависит от условий развития ливня в атмосфере: высоты максимума каскадной кривой, зенитного угла прихода диска ливня на плоскость установки и энергии ШАЛ.

Радиометод позволяет не только оценить энергию, но и восстановить картину продольного развития ливня, а именно, глубину максимума развития ШАЛ X_{max} [4, 5]. Используя глубину максимума и энергию, можно определить тип частицы, вызвавшей ливень в атмосфере.

В работе использованы данные по радиоизлучению, зарегистрированные на Якутской установке за 1986–1989 и 2009–2018 гг. За этот период было зарегистрировано ~7000 ливней с радиоизлучением различных энергий. Энергия ливней определялась методом баланса энергий всех измеряемых на установке компонент ШАЛ [6]. Для установления зависимости амплитуды радиосигнала от энергии и связи формы ФПР радиоизлучения с глубиной максимума развития ШАЛ X_{max} был использован 421 ливень с энергией $\geq 10^{17}$ эВ и зенитными углами ≤45°. Дополнительным условием было наличие измерений черенковского света в этих ливнях.

РАДИОУСТАНОВКА

На Якутской установке [7] для выбора оптимальной частоты регистрации радиоизлучения было проведено сканирование частотного спектра от 1 до 100 МГц [8], как в [9]. На частотах до 20 МГц из-за наличия сильных шумов природного происхождения (в основном грозы), не представляется возможным различить импульсы ШАЛ с достаточной эффективностью. Выше 20 МГц, амплитуда галактических шумов уменьшается намного медленнее с частотой, чем грозовые шумы и на частоте 32 МГц составляет 1.0–2.0 мкВ · м$^{-1}$ · МГц$^{-1}$. Тепловые шумы антенны намного ниже галактических шумов на частотах до 100 МГц и, почти никак не влияют на наши измерения. Поэтому, оптимальная полоса частот это 30–40 МГц, где ожидается наилучшее отношение сигнал–шум, из-за того, что на более высоких частотах спектр ограничен сильными шумами антропогенного характера, например, помехами, создаваемыми широковещательными станциями.

Установка состоит из 12 скрещенных на 90° приемных антенн, ориентированных по направлениям В–З, С–Ю, периферийного регистрирующего устройства (ПРУ) и электронного накопителя данных на базе персонального компьютера.

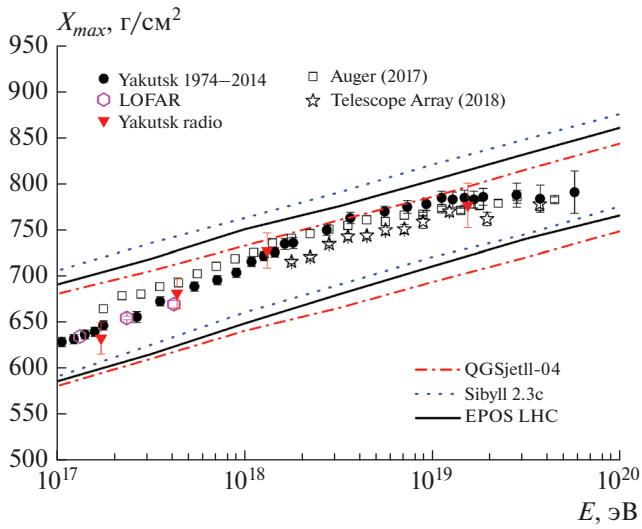

Рис. 1. Зависимость $\langle X_{max}\rangle$ радиоизлучения от энергии E. Для сравнения приведены экспериментальные данные по черенковским измерениям Якутской установки, экспериментальные данные других установок: Auger, TA и LOFAR. Также, нанесены модельные расчеты QGSJetII-04, Sibyll 2.3c и EPOS-LHC.

ПРУ размещалось непосредственно на территории антенного поля. Антенное поле располагались вблизи центра основной установки ШАЛ и состояло из двух независимых кустов, синхронизация которых осуществлялась с помощью системы GPS. Расстояние между антеннами было 50, 100 и 500 м. Располагались антенны на удалении 50–100 м от станций наблюдения [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимость амплитуды радиоизлучения от энергии ливня

Для нахождения зависимости амплитуды радиоизлучения от энергии ливня использовались ливни, зарегистрированные одновременно и радиоантеннами и черенковскими детекторами [10].

Так как большая часть антенн с радиосигналами находилась на расстоянии 200–500 м от оси ШАЛ, то для нормировки амплитуд радиосигналов было взято медианное расстояние равное $\langle R_{med}\rangle = 350$ м. Сигналы с антенн на разных расстояния от оси ливня приводились к $\langle R_{med}\rangle$ Нормированные сигналы были использованы для нахождения корреляции между амплитудой радиоизлучения и энергией ливня. Энергия ливня определялась согласно работе [6], точность оценки энергии составляла ~25% [10]. При оценке энергии ливня по амплитуде радиосигнала была учтена зависимость амплитуды от зенитного угла, энергии и глубины максимума развития ШАЛ. Формула связи амплитуды и энергии ливня хорошо описывается выражением вида (1). Коэффициенты в уравнении (1) найдены методом максимального правдоподобия.

$$\varepsilon = (188 \pm 1.6)\left(\frac{E}{5\times 10^{17}}\right)^{0.83\pm 0.03}(1.16 - \cos\alpha)\times$$
$$\times\cos\theta\exp\left(-\frac{R}{162\pm 8 + (84\pm 3)[(X-675)/100}\right). \quad (1)$$

Зависимость формы ФПР радиоизлучения от X_{max}

Как было показано в работах [11–14], функция пространственного развития радиоизлучения ШАЛ отражает продольный профиль развития ливня. По форме ФПР можно определить глубину максимума развития (X_{max}), для этого используется отношение амплитуд на разных расстояниях от оси ливня $P = A_1/A_2$, где A_1 – амплитуда радиоизлучения на расстоянии 175 м, A_2 – амплитуда радиоизлучения на расстоянии 725 м. На Якутской установке связь $P = A(R_1)/A(R_2)$ с X_{max} была получена эмпирически, используя совместные измерения радио и черенковского излучений [9]:

$$X_{\max} = (660\pm 15) + (100\pm 5)\frac{P-11.5}{3}. \quad (2)$$

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 [15]. Точность определения X_{max} составляет ~55 г/см^2, что обусловлено погрешностью определения оси ШАЛ и малым количеством антенн [16].

Далее формула (2) использовалась для определения X_{max} в индивидуальных радиоливнях. Используя массив отобранных ливней, по формуле (2), была получена средняя оценка $\langle X_{max}\rangle$ при разных первичных энергиях (рис. 1).

Данные Якутской установки, полученные из измерений черенковского света 1974–2014 гг. (черные точки) и радиоизлучения ШАЛ (красные треугольники) показаны на рис. 1. На этом же рисунке для сравнения приводятся гибридные данные (BR/LR + SD) установки Telescope Array за 2018 год [17], установки Auger за 2019 год [18], данные радиотелескопа LOFAR [19]. На рис. 1 нанесены и расчеты по моделям адронных взаимодействий QGSJetII-04 [20], Sybill 2.3 c [21], EPOS LHC [22]. Видно, что экспериментальные данные всех установок указывают на неравномерное продвижение X_{max} вглубь атмосферы.

Широкие атмосферные ливни с энергией выше $5\cdot 10^{18}$ эВ

На рис. 2 на карте неба показано распределение ШАЛ с $E_0 \geq 5\cdot 10^{18}$ эВ, приходящих друг за

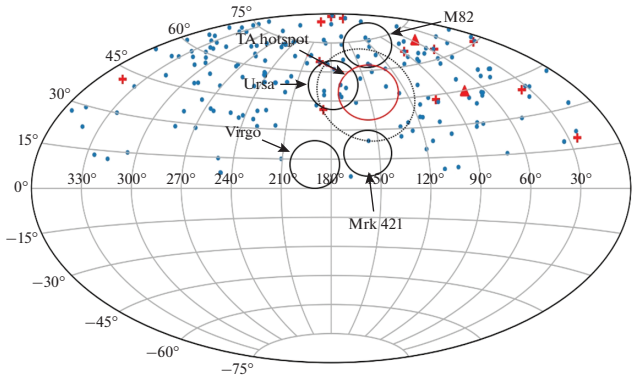

Рис. 2. Распределение на карте неба событий ШАЛ с $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ, зарегистрированных на Якутской установке. Крестики – ливни с радиоизлучением. Треугольники – ливни с энергией $E_0 \sim 10^{20}$ эВ. Точки – парные ливни.

другом с интервалом по времени меньше 24 ч [7]. Ливни имели близкие характеристики: энергию, зенитный и азимутальный углы. Точность определения зенитного угла в этих ливнях составляла 1.5°–2.5°. В какой-то мере близкие по времени прихода и физическим характеристикам ливни можно считать парными ШАЛ. Галактические координаты в этих ливнях близки, расхождение составляет 3°–5°. Эти ливни можно использовать для поиска источников космических лучей предельных энергий. В то же время имеются пары, у которых расхождение координат достигает 10° и более градусов. Если предположить, что эти ливни имеют одинаковую природу происхождения, то их расхождение по координатам может быть связано с разным характером взаимодействия пучка частиц с магнитными полями и реликтовым фоном Вселенной. Нельзя исключать и то, что парные события ШАЛ с предельными энергиями, могут быть образованы за счет серфинга в космической плазме.

На рис. 2 крестиками показаны ливни с энергиями $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ, зарегистрированные Якутской радиоустановкой, за периоды наблюдения 1986–1989 гг. и 2009–2018 гг. Треугольниками показаны ливни с энергией $E_0 \sim 10^{20}$ эВ. Зенитные и азимутальные углы в этих ливнях определялись по сцинтилляционным детекторам Якутской установки.

Вероятными источниками космических лучей могут быть такие активные области: созвездие Медведицы, Девы, M82 и Маркарян 421. Также, для сравнения, нанесена горячая область (hot spot) найденная экспериментом TA [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была построена зависимость средних $\langle X_{max} \rangle$ от энергии E по данным измерения детекторов черенковского света и данным радиоизлучения ШАЛ в области энергий с 10^{17} до $5.7 \cdot 10^{19}$ эВ (рис. 1). Средние значения глубины максимума $\langle X_{max} \rangle$ от энергии первичной частицы E изменяются неравномерно, что связано с изменением массового состава. Сравнение $\langle X_{max} \rangle$ с модельными расчетами указывает на то, что для энергий 10^{17}–10^{18} эВ в массовом составе преобладает доля протонов и ядер с малым атомным весом. Для энергий выше 10^{19} эВ массовый состав начинает изменяться в сторону более тяжелых ядер, CNO и Fe.

Используя данные наблюдения на радиоустановке за 1986–1989 гг. и 2009–2018 гг., были выделены ливни с энергией выше $5 \cdot 10^{18}$ эВ, которые нанесены на карту неба. Ливни найденные по данным радиоизлучения не совпадают с известными источниками рентгеновских, радио и оптических излучений, но это не означает, что источников там нет. Скорее всего мы еще не знаем о других источниках, которые могут быть генераторами космических лучей предельных энергий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kahn F., Lerche I.* // Proc. Royal Soc. A. 1966. V. 289. P. 206.
2. *Falcke H., Gorham P.* // Astropart. Phys. 2003. V. 19. P. 477.
3. *Аскарьян Г.А.* // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. № 2. С. 616.
4. *Apel W., Arteaga-Velazquez J.C., Bahren L. et al.* // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. Art. No. 062001.
5. *Knurenko S., Petrov I.* // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632. Art. No. 012100.
6. *Кнуренко С.П., Иванов А.А., Слепцов И.Е., Сабуров А.В.* // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 83. С. 563.
7. *Кнуренко С.П., Петров И.С.* // Тр. БШФФ “Физ. проц. в косм. и околозем. среде”. XVI Конф. мол. уч. “Взаим. полей и изл. с вещ.” (Иркутск, 2019). С. 99.
8. *Kozlov V., Knurenko S., Mullayarov V. et al.* // Proc. 1st Int. Conf. Electromagn. Meth. Environ. Stud. 2012. P. 215.
9. *Ellingson S., Simonetti J., Patterson C.* // IEEE Trans. Antennas Propag. 2007. V. 55. No. 3. P. 826.
10. *Knurenko S.P., Petrov Z.E., Petrov I.S.* // NIM A. 2017. V. 866. P. 230.
11. *Huege T., Ulrich R., Engel R.* // Astropart. Phys. 2008. V. 30. P. 96.
12. *de Vries K.D., van den Berg A.M., Scholten O.* // Astropart. Phys. 2010. V. 34. P. 267.
13. *Kalmykov N.N., Konstantinov A.A.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2012. V. 12. Art. No. 029.
14. *Bezyazeekov P.A., Budnev N.M., Gress O.A. et al.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2016. V. 01. Art. No. 052.

15. *Кнуренко С.П., Петров И.С.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1111; *Knurenko S.P., Petrov I.S.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 8. P. 1010.
16. *Кнуренко С.П., Петров З.Е., Петров И.С., Дьячковский Н.А.* // Тр. XXIV междунар. симп. "Опт. атм. и океана. Физ. атм." (Томск, 2018). С. D175.
17. *Abbasi R., Abe M., Abu-Zayyad T. et al.* // Astrophys. J. 2018. V. 858. P. 76.
18. *Bellido J., Aab A., Abreu P. et al.* // Proc. Sci. 2018. V. 301. Art. No. 506.
19. *Buitink S., Corstanje A., Falcke H. et al.* // Nature. 2016. V. 531. P. 470.
20. *Ostapchenko S.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. Art. No. 014018.
21. *Riehn F., Engel R., Fedynitch A. et al.* // Proc. Sci. 2015. V. 236. Art. No. 558.
22. *Pierog T., Karpenko I., Katzy J. et al.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. Art. No. 034906.
23. *Matthews J.N., Abbasi R.U., Abe M. et al.* // Proc. Sci. 2018. V. 301. Art. No. 1096.

Study of the characteristics of cosmic rays with highest energies by radio method at frequency of 30–35 MHz at the Yakutsk array

S. P. Knurenko[a], I. S. Petrov[a, *]

[a] *Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, 677980 Russia*

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

We present the results of a study of showers with highest energies $E \geq 10^{18}$ eV using radio antennas in the frequency range 30–35 MHz at the Yakutsk array. Methods for determining the main characteristics of cosmic rays are described: EAS energy, depth of maximum X_{max} and angles of arrival from radio emission measurements. For air showers with energies $E \geq 10^{19}$ eV, the location on the sky map in galactic coordinates was found in order to search for sources of cosmic rays of highest energies.