

## ХАРАКТЕРИСТИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ НА ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКЕ

С.П. Кнуренко, И.С. Петров

Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия  
igor.petrov@ikfia.ysn.ru

## CHARACTERISTICS OF ULTRA-HIGH ENERGY COSMIC RAYS, DEFINED USING THE RADIO EMISSION FROM AIR SHOWERS MEASURED AT YAKUTSK ARRAY

S.P. Knurenko, I.S. Petrov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia  
igor.petrov@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** Измерениями радиоизлучения на Якутской установке показано, что этим методом можно независимо от измерения других компонент ливня изучать физику широких атмосферных ливней. Имеется в виду определять по амплитуде радиосигнала энергию первичной частицы, образующей ливень. Восстанавливать продольное развитие ливня в атмосфере (в нашем случае глубину максимума развития ливня  $X_{\max}$ ) по отношению амплитуд радиосигналов на выбранных расстояниях от оси ШАЛ. Используя многолетние наблюдения на Якутской установке, была создана база данных ШАЛ с радиоизмерениями. По массиву ШАЛ независимо от других измеряемых компонент были определены энергия и  $X_{\max}$  каждого ливня. По этим данным была найдена зависимость  $X_{\max}$  от энергии. В рамках выбранной модели QGSjetII-04, используя зависимость  $X_{\max}$  от энергии, была сделана оценка массового состава космических лучей в области сверхвысоких энергий. За время наблюдений на Якутской установке впервые было зарегистрировано радиоизлучение в событиях ШАЛ с энергией  $E_0 \sim 10^{20}$  эВ и получены их характеристики. Для ливней с энергией  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ было найдено их расположение на карте неба в галактических координатах с целью поиска источников космических лучей предельных энергий.

**Ключевые слова:** радиоизлучение, ШАЛ, Якутская установка, галактические координаты.

**Abstract.** Measurements of radio emission at the Yakutsk facility have shown that this method can be used as independent technique to study the physics of extensive air showers. Primary characteristics of air shower can be determined radio emission measurements such as energy of the shower by amplitude of radio signal. Reconstruction of the longitudinal development of the shower in the atmosphere (in our case, the depth of the maximum development of a shower  $X_{\max}$ ) is done as ratio of the amplitudes of the radio signals at selected distances from the EAS axis. The energy and  $X_{\max}$  of each shower were determined by the air shower array, independently of other measured components. From long-term measurements at the Yakutsk array, we selected data with radio emission. From these data, the dependence of  $X_{\max}$  on energy was found. Mass composition of cosmic rays in the region of ultrahigh energies was estimated in the framework of the QGSjetII-04 model, using the dependence of  $X_{\max}$  on energy. During the observations of radio emission at the Yakutsk was first recorded in EAS events with energy  $E_0 \sim 10^{20}$  eV and their characteristics were obtained. For showers with an energy of  $E_0 \geq 10^{19}$  eV, their location on the sky map in galactic coordinates was found in order to search for sources of cosmic rays of highest energies.

**Keywords:** radio emission, EAS, Yakutsk array, galactic coordinates.

### ВВЕДЕНИЕ

Метод регистрации радиоизлучения от частиц широкого атмосферного ливня (ШАЛ) основан на движении заряженных частиц в магнитном поле Земли [Kahn, Lerche, 1966; Falcke, Gorham, 2003] и эффекте Аскарьяна [Аскарьян, 1961]. По-видимому, оба метода эффективно работают при прохождении потока частиц ливня через атмосферу. Вклад их в генерацию радиоизлучения зависит от условий развития ливня в атмосфере: высоты максимума каскадной кривой, зенитного угла прихода диска ливня на плоскость установки, энергии ШАЛ. Полно исследовать эти механизмы образования радиоизлучения доступно только на установках с комплексной регистрацией частиц ШАЛ: электронов, мюонов, черенковского, ионизионного и радиоизлучений.

Этот метод позволяет не только оценить энергию, но и восстановить картину продольного развития ливня, а именно, глубину максимума развития ШАЛ  $X_{\max}$  [Apel et al., 2014; Knurenko, Petrov, 2015]. Используя глубину максимума определить тип частицы, вызвавшей ливень в атмосфере.

### 1. РАДИОУСТАНОВКА

На Якутской установке для выбора оптимальной частоты регистрации радиоизлучения было проведено сканирование частотного спектра от 1 до 100 МГц [Kozlov et al., 2012], как в работе [Ellingson et al., 2007]. 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<sup>-1</sup>·МГц<sup>-1</sup>. 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, широкоэвещательные станции. Установка состоит из 12 скрещенных под 90° приемных антенн, ориентированных по направлениям В-З, С-Ю,

периферийного регистрирующего устройства (ПРУ) и электронного накопителя данных на базе персонального компьютера. ПРУ размещалось непосредственно на территории антенного поля (рис. 1). Антенное поле располагалось 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 [Knurenko et al., 2017].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Массовый состав КЛ

Для определения глубины максимума развития ШАЛ  $X_{\max}$  была использована связь формы функции пространственного распределения с продольным развитием ливня в атмосфере описанного в работе [Кнуренко, Петров, 2016]. Зная глубину максимума  $X_{\max}$  и среднее значения  $X_{\max}$  для протона и ядра железа по модели адронных взаимодействий QGSJetII-04 [Ostapchenko, 2011] значения  $\langle \ln A \rangle$  может быть определено методом интерполяции по формуле (1) [Berezhko et al., 2012; Hörandel, 2006]:

$$\langle \ln A \rangle = \frac{X_{\max}^{\text{exp}} - X_{\max}^p}{X_{\max}^{\text{Fe}} - X_{\max}^p} \ln A_{\text{Fe}}, \quad (1)$$

где  $X_{\max}^{\text{exp}}$  — это глубина максимума развития определенная из эксперимента;  $\ln A_{\text{Fe}}$  — это логарифм атомного веса железа.

Значения  $\langle \ln A \rangle$  для разных энергий показаны на рис. 2 в сравнении с данными черенковских детекторов Якутской установки [Knurenko, Petrov, 2019], ТА [Abbasi et al., 2019] и Оже [Bellido et al., 2018].

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

На рис. 3 на карте неба показано распределение ШАЛ с  $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$  эВ, приходящих друг за другом с интервалом по времени меньше 24 ч. Отобранные по критериям из работы [Кнуренко, Петров, 2019] ливни имели близкие характеристики: энергию, зенитный и азимутальный углы. В какой-то мере их можно считать парными ШАЛ, хотя галактические координаты в парных ливнях расходятся на 10 и более градусов.

Там же 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. Также, треугольниками показаны ливни с энергией  $E_0 \sim 10^{20}$  эВ.

На рис. 3 для сравнения нанесены границы наиболее активных областей, откуда регистрируются рентгеновское, радио и оптическое излучения: созвездие Медведицы, Девы, M82 и Маркарян 421. Также, нанесена горячая область (hot spot) найденная по данным ТА [Matthews et al., 2017]. Можно видеть, что часть ливней по своим координатам совпадает или находятся близко к границам этих областей, что указывает на то, что активные области

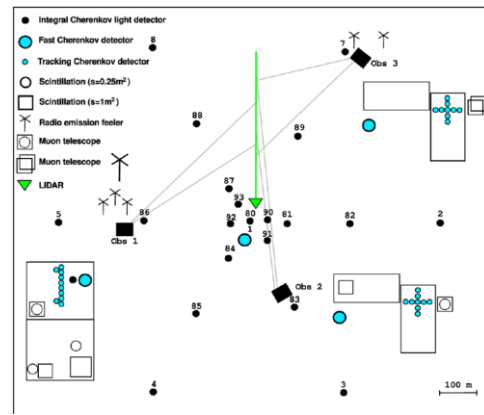


Рис. 1. Схема расположения антенн на Якутской установке

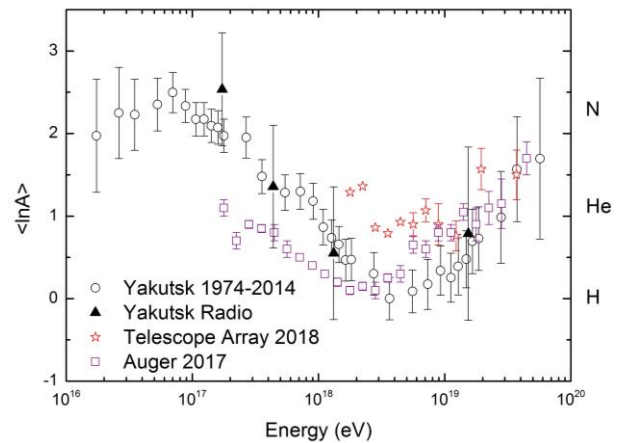


Рис. 2. Массовый состав космических лучей, определенный по модели QGSJetII-04 [Ostapchenko, 2011]

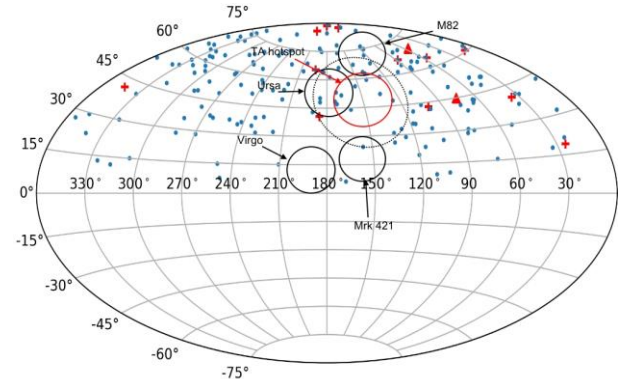


Рис. 3. Распределение прихода событий ШАЛ с  $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$  эВ

наряду с другими источниками могут являться источниками космических лучей предельных энергий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По многолетним данным радиоизлучения на Якутской установке в рамках модели QGSJetII-04 была получена оценка массового состава КЛ при энергиях  $10^{17}$ – $10^{19}$  эВ, хорошо согласуется с данными черенковских детекторов (рис. 2). При энергиях  $10^{17}$ – $10^{18}$  эВ в химическом составе преобладают легкие ядра, при энергиях выше  $10^{19}$  эВ состав становится тяжелее. Используя данные наблюдения 1986–1989 гг. и 2009–2018 гг., были выделены ливни с

энергией выше  $5 \cdot 10^{18}$  эВ, которые были нанесены на карту неба. Несмотря на низкую статистику, данные говорят, что имея радиоустановку большой площади, можно изучать анизотропию прихода ливней этим методом и заниматься поиском источников, генерирующих частицы предельных энергий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аскарьян Г.А. Избыточный отрицательный заряд электронно-фотонного ливня и когерентное радиоизлучение от него // ЖЭТФ. 1961. Т. 41, № 2. С. 616–618.

Кнуренко С.П., Петров И.С. Периодичность регистрации широких атмосферных ливней с энергией выше 5 ЕэВ на Якутской установке. Астрофизический аспект // Ядерная физика 2019. (В печати).

Кнуренко С.П., Петров И.С. Радиоизлучение широких атмосферных ливней с энергией  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ по данным регистрации на Якутской комплексной установке // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104, № 5. С. 305–309.

Abbasi R., Abe M., Abu-Zayyad T., et al. Mass composition of ultra-high-energy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector Data // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. 02002.

Apel W., Arteaga-Velazquez J.C., Bähren L., et al., Reconstruction of the energy and depth of maximum of cosmic-ray air showers from LOPES radio measurements // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. P. 062001.

Bellido J., Aab A., Abreu P., et al. Depth of maximum of air-shower profiles at the Pierre Auger Observatory: Measurements above  $10^{17.2}$  eV and Composition Implications // Proc. of Science. 2018. V. 301. P. 506.

Berezhko E., Knurenko S., Ksenofontov L. Composition of cosmic rays at ultra high energies // Astropart. Phys. 2012. V. 36. P. 31–36.

Ellingson S., Simonetti J., Patterson C. Design and evaluation of an active antenna for a 29–47 MHz Radio Telescope Array // IEEE Trans. Antennas and Propag. 2007. V. 55, N. 3. P. 826–831.

Falcke H., Gorham P. Detecting radio emission from cosmic ray air showers and neutrinos with a digital radio telescope // Astroparticle Phys. 2003. V. 19. P. 477–494.

Hörandel J. A Review of experimental results at the knee // J. Phys.: Conf. Ser. 2006. V. 47. P. 41–50.

Kahn F., Lerche I. Radiation from cosmic ray air showers // Proc. of R. Soc. A. 1966. V. 289. P. 206.

Knurenko S., Petrov I. Radio signal correlation at 32 MHz with extensive air showers parameters // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 632. P. 012100.

Knurenko S., Petrov I. Characteristics of air showers with energy more than  $10^{17}$  eV reconstructed by the Yakutsk array radio emission measurements // EPJ Web of Conferences. 2019. V. 208. 08017.

Knurenko S.P., Petrov Z.E., Petrov I.S. Radio emission of air showers with extremely high energy measured by the Yakutsk Radio Array // NIM A. 2017. V. 866, P. 230–241.

Kozlov V., Knurenko S., Mullayarov V., Petrov Z., Pravdin M. Radio measurements at the Yakutsk EAS array // Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Electromagnetic Method of Environmental Studies. 2012. P. 215–217.

Matthews J.N. For the Telescope Array Collaboration. Highlights from the Telescope Array Experiment // Proc. of Science. 2018. V. 301. P. 1096.

Ostapchenko S. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: QGSJET-II model // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. 014018.