

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ И ГЛУБИНЫ МАКСИМУМА РАЗВИТИЯ ШАЛ МЕТОДОМ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧАСТОТЕ 30–35 МГц

С.П. Кнуренко, И.С. Петров

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

DETERMINING ENERGY AND DEPTH OF THE EAS MAXIMUM BY RADIO EMISSION METHOD AT A FREQUENCY OF 30–35 MHz

S.P. Knurenko, I.S. Petrov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia

Аннотация. В работе приводятся результаты по оценке энергии и продольного развития ШАЛ методом регистрации радиоизлучения на частоте 30–35 МГц на Якутской установке. Приводятся формулы связи амплитуды радиоизлучения с энергией ливня и отношения амплитуд радиоизлучения на разных расстояниях от оси ливня с глубиной максимума развития ШАЛ X_{\max} .

Ключевые слова: радиоизлучение, ШАЛ, Якутская установка, космические лучи.

Abstract. The paper presents the Yakutsk radio array description and methods of radio emission registration of air showers with ultra-high energies. Connection of radio emission amplitude with air shower characteristics are considered. Formulas of energy determination and depth of maximum by radio emission amplitude are presented.

Keywords: radio emission, EAS, Yakutsk array, cosmic rays.

Введение

Изучение космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий в первую очередь требует оценки энергии, спектра по энергиям, массам и анизотропии прихода первичных частиц. Сделать это можно только суммируя энергии всех вторичных частиц, образующихся в процессе взаимодействия первичной частицы с ядрами атомов воздуха [Дьяконов, 1991]. В первую очередь для этого используются интегральные потоки черенковского или ионизиционного излучений, регистрируемые на уровне моря [Кнуренко, 2006; Song, 2000]. По теоретическим расчетам потери энергии на ионизацию воздуха частицами составляют ~80 % от полной энергии первичной частицы [Беляев, 1980]. Оставшаяся часть энергии тратится на ядерные взаимодействия адронов (нуклонов) и уносится мюонами высоких энергий за уровень моря. При комплексной регистрации ШАЛ, т. е. электронной, мюонной и черенковской компонент можно эмпирически оценить энергию первичной частицы КЛ. Такая методика была создана и используется по настоящее время на Якутской комплексной установке ШАЛ. Описание этого метода приводится в работах [Кнуренко, 2006; Ivanov, 2009]. Как альтернатива методу баланса энергий, ниже приводится описание метода независимой оценки E_0 , полученной по измерению радиоизлучения ШАЛ на частоте 30–35 МГц на радиоустановке в Якутске.

1. Якутская комплексная установка ШАЛ и способы регистрации ШАЛ

Якутская установка ШАЛ состоит из 120 сцинтилляционных детекторов площадью 2 м^2 каждый с порогом 10 МэВ, которые размещены на площади

~17 км² (рис. 1). Основу Якутской установки составляют отдельные станции наблюдения, в которых установлено по 2 сцинтилляционных счетчика площадью 2 м^2 каждый и приемник черенковского излучения на основе одного или нескольких фотумножителей ФЭУ-49 (диаметр фотокатода 15 см). На рис. 1 приводится схема расположения станций и других детекторов установки. Логическая схема регистрации ливней разработана по принципу автономных измерений на станциях наблюдений [Глушков, 1993].

Разрешающее время схемы совпадения равно 2 мкс. Отбор ливневых событий производится при одновременном срабатывании трех соседних станций, образующих треугольник. При выработке мастера установки осуществляется опрос всех станций и детекторов, подключенных к центральному регистратору. Информация от станций и команды из центра на станции передаются по оптоволоконной линии связи. Кроме перечисленных методов регистрации различных компонент ливня на Якутской установке ШАЛ с 2009 г. проводятся измерения радиоизлучения от ливней с $E_0 > 10^{17}$ эВ.

2. Оценка энергии ШАЛ

2.1. Метод баланса

В основе метода определения энергии ливня на ЯКУШАЛ взято выражение (1), используемое в работах [Дьяконов, 1991; Кнуренко, 2006]:

$$E_0 = E e_i + E_{\text{eph}} + E_{\mu\nu} + E_d. \quad (1)$$

В первом приближении сумма представленных в (1) компонент будет составлять полную энергию первичной частицы. Все слагаемые E_0 , восставливались с использованием интегральных характеристик ШАЛ. В нашем случае они оценены сле-

дующим образом. Энергия, рассеянная электронами в атмосфере над уровнем наблюдения согласно формуле [Кнуренко, 2006, Иванов, 2007]:

$$E_{ei} = \kappa(x, P_\lambda) F. \quad (2)$$

Энергия, проносимая электронами за уровень наблюдения, взята, согласно выражения (3) [Глушков, 1993]:

$$E_{epb} = 2.2 \cdot 10^6 \cdot N_s(X_0) \lambda_{эфф}, \quad (3)$$

Энергия, передаваемая в мюоны с пороговой энергией ≥ 1 ГэВ, оценивалась согласно формуле:

$$E_\mu = \epsilon_\mu N_\mu, \quad (4)$$

Оставшуюся, незначительную часть (~5 %) первичной энергии, мы взяли из расчетов. Величину ионизационных потерь мюонной компоненты как $E_{\mu i} = (0.12 \pm 0.09) E_\mu$. Потери энергии на расщепление ядра в воздухе как 0.5 ГэВ и ионизационные потери адронной компоненты в атмосфере как $E_{hi} = (5.6 \pm 2.2) \cdot 10^{-2} E_{ei}$. Энергию, уносимую нейтринной компонентой согласно $E_v = (0.64 \pm 0.18) E_\mu$.

Точность используемого метода оценки полной энергии ШАЛ в нашем случае составляет 25 %. В дальнейшем эта оценка энергии использовалась для установления связи амплитуды радиосигнала с энергией ШАЛ [Кнуренко, 2015].

2.2. Оценка энергии по радиоизлучению ШАЛ

Величина напряженности электрического поля наведенного на антеннах радиостановки, согласно работе [Horneffer, 2008], может быть представлена в следующем виде:

$$\epsilon_v = ((4\pi v^2 \mu_0 / G_{(\theta, \phi)} c) / K_{ele(v)} R_{ADC})^{-2} V_{ADC} / \Delta v, \quad [\text{мкВ} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}] \quad (5)$$

Там же показано, что максимум амплитуды радиоимпульса A_{\max} пропорционален энергии электромагнитной компоненты ШАЛ:

$$E_{EM} = c \cdot A_{\max}, \quad [\text{мкВ} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{ГэВ}^{-1}] \quad (6)$$

На рис. 2 приводится корреляция амплитуды радиоизлучения от энергии ливня. Энергия ливня была определена по данным черенковских детекторов.

1.2. Современный статус радиостановки

В 2009 г. в районе Якутской установки для выбора оптимальной частоты регистрации радиоизлучения было повторно, с использованием цифрового анализатора спектра ASA-2332, проведено сканирование частотного спектра от 1 до 100 МГц [Kozlov, 2012], как в работе [Ellingson, 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 $1.0\text{--}2.0 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{МГц}^{-1}$. 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, широкоэмитальные 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. 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 м, 100 м и 500 м. Располагались антенны на удалении 50–100 м от станций наблюдения.

Для регистрации высокочастотных сигналов, как и при первых поисковых измерениях радиосигналов от ШАЛ, были использованы полуволновые диполи, ориентированные в направлении В–З, С–Ю и поднятые на высоту $\lambda/4$.

Полоса пропускания радио тракта по уровню 0.7 была 4 МГц, чувствительность ~10 мкВ ($2 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{МГц}^{-1}$), динамический диапазон усилителя 50 дБ. Приемные каналы построены по принципу прямого усиления сигнала с последующим детектированием. Антенные усилители были помещены в специальные термостабилизирующие контейнеры и располагались непосредственно у антенн. Основные тракты усиления построены по каскадной схеме с рассогласованными контурами. В качестве регистратора используется компьютер типа IBM PC/AT. В качестве аналого-цифровых преобразователей используются быстрые 8-разрядные АЦП ЛА-н10М8РС1.

Регистрация радиоизлучения использует в качестве триггера один из двух мастеров Якутской установки. Один из двух возможных триггеров — это основная Якутская установка, которая регистрирует ливни на площади 12 км^2 с энергией выше 10^{17} эВ.

Малая черенковская установка (рис. 1) регистрирует ливни на площади 1 км^2 с энергией $10^{15}\text{--}5 \cdot 10^{17}$ эВ [Петров, 2012]. На рис. 1 приведена схема малой черенковской установки, на которой установлены антенны регистрации радиоизлучения.

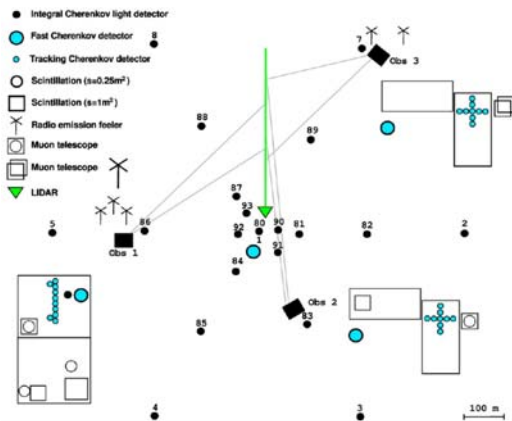


Рис. 1. Схема расположения антенн на Якутской установке

Устройство управления регистрацией, сбора и хранения данных было выполнено на базе промышленной ЭВМ с 19 слотами PCI. У АЦП ЛА-н10М8 число разрядов равно 8, частота дискретизации 100 МГц, емкость буферного запоминающего устройства 2 мегабайта. Частота дискретизации, время «предыстории» и коэффициент передачи входного делителя задаются программно. Для регистрации время дискретизации составляло 10 нс (100 МГц), размер «предыстории» 25 мкс (и 15 мкс истории после триггера), максимальный входной сигнал 1 В. Окончательная запись информации осуществлялась на жесткий диск с параллельным выводом на дисплей ЭВМ.

Калибровка радиоканалов осуществлялась подачей калибровочных радиоимпульсов на вход антенных усилителей. Калибровочные импульсы пропускались через весь тракт и записывались в цифровом виде на жесткий диск вместе с экспериментальными данными.

3. ФПР ливней с энергией выше 10 ЭэВ

На рис. 2 показана функция пространственного распределения (ФПР) радиоизлучения, полученная по ливням с энергиями выше 10^{19} эВ [Кнуренко, 2016].

Точки приведены к средней энергии $\langle E_0 \rangle = 1.54 \cdot 10^{19}$ эВ, среднему зенитному углу $\langle \theta \rangle = 43.1^\circ$ и показаны в логарифмическом масштабе. Как видно из рис. 2, амплитуда радиосигнала с расстоянием значительно падает, что указывает на связь формы ФПР с максимумом развития каскадной кривой ШАЛ. Расчеты подтверждают эту связь и значит, это свойство можно использовать для оценки X_{\max} ШАЛ. Предварительные оценки по X_{\max} уже получены на всех радиоустановках.

Как можно видеть из рис. 2, полученная зависимость амплитуды радиоизлучения от расстояния хорошо описывается простым экспоненциальным законом типа:

$$A = \varepsilon \cdot \exp\left(-\frac{R}{R_0}\right).$$

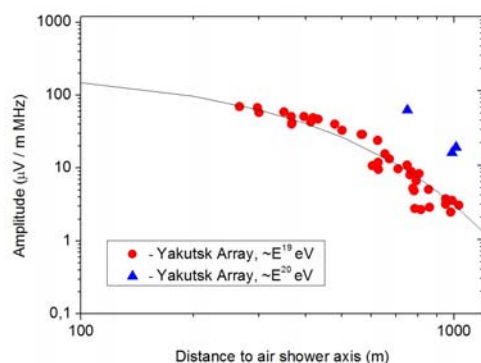


Рис.2. ФПР ливней с энергией $E \geq 10^{19}$ эВ

Заключение

Долговременные наблюдения радиоизлучения ШАЛ на Якутской установке доказали существование радиоизлучения при энергии ≥ 10 ЭэВ и это позволило получить некоторые характеристики радиоизлучения при таких энергиях:

- функцию затухания радиосигнала ШАЛ от расстояния при энергии $1.54 \cdot 10^{19}$ эВ и ее градиент;
- доказали наличие радиоизлучения ШАЛ при энергиях 10^{20} эВ, т. е. в самых больших ливнях, зарегистрированных на Якутской установке [Artamonov, 1990];
- Значительный сигнал в сильноклонных ливнях и влияние магнитного поля на форму ФПР, что еще раз подтверждает роль геомагнитного механизма в генерации радиоизлучения [Петров, 2011].

Список литературы

- Аскарьян Г.А. // ЖЭТФ. 1961. Т. 41, № 2. С. 616–618.
 Петров З.Е., Борщевский Д.С., Кнуренко С.П. и др. // Вестник СВФУ. 2011. Т. 8, № 4. С. 5–10.
 Петров З.Е., Борщевский Д.С., Кнуренко С.П. и др. // Наука и образование. 2012. Т. 65, № 1. С. 7–1.
 Кнуренко С.П., Петров И.С. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104, № 5. С. 305–309.
 Aab A. et al. // Phys. Rev. D. 2016. V. 93. P. 12005.
 Apel W. et al. // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. P. 062001.
 Apel W. et al. // Phys. Lett. B. 2016. V. 763. P. 179–185.
 Artamonov V.P., Egorov T.E., Efimov A.N., et al. // Proc. 21st ICRC. Adelaide, 1990. V. 9. P. 210.
 Bezyazeev P., Budnev N., Gress O., et al. // J. Cosmology and Astroparticle Phys. 2016. V. 01 P. 052.
 Ellingson S., Simonetti J., Patterson C. // IEEE Trans. Antennas and Propag. 2007. V. 55, N 3. P. 826–831.
 Falcke H., Gorham P. // Astroparticle Physics. 2003. V. 19. P. 477–494.
 Kahn F., Lerche I. // Proc. R. Soc. A. 1966. V. 289. P. 206.
 Knurenko S., Petrov I. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 632. P. 012100.
 Kozlov V., Knurenko S., Mullayarov V., et al. // Proc. 1st Int. Conf. Electromagnetic Method of Environmental Studies. 2012. P. 215–217.