Письма в ЖЭТФ, том 104, вып. 5, с. 306 – 310

Радиоизлучение широких атмосферных ливней с энергией $E_0 \geq 10^{19}$ эВ по данным регистрации на Якутской комплексной установке

С. П. Кнуренко, И. С. Петров[1)]

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Шафера СО РАН, 677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 27 мая 2016 г.
После переработки 22 июля 2016 г.

Приводится краткое описание радиоустановки и результаты, полученные из измерений радиоизлучения на частоте 32 МГц от частиц широкого атмосферного ливня (ШАЛ) с энергией $E_0 \geq 1 \cdot 10^{19}$ эВ. Данные получены на Якутской установке ШАЛ за 1987–1989 гг. (первая серия наблюдений) и за 2009–2014 гг. (новая серия измерений). Впервые на Якутской установке было зарегистрировано радиоизлучение от ШАЛ с энергией выше 10^{20} эВ, в том числе, и радиоизлучение в ливне с рекордной для Якутской установки энергией $\sim 2 \cdot 10^{20}$ эВ.

DOI: 10.7868/S0370274X16170033

1. Введение. В основе радиоастрономического метода регистрации космических частиц сверхвысокой энергии лежит эффект Аскарьяна, заключающийся в образовании избыточного отрицательного заряда в каскадном ливне, сопровождающем прохождение частицы ультравысокой энергии через вещество [1]. Избыток электронов в ливне, согласно этому эффекту, вызван аннигиляцией позитронов с электронами, входящими в состав атомов среды. Движение избыточного отрицательного заряда со скоростью, превышающей скорость света в среде, является причиной радиоизлучения в широком диапазоне частот [2]. В последующие за этим открытием годы было проведено множество экспериментальных исследований радиоизлучения широких атмосферных ливней (ШАЛ), в том числе и на Якутской комплексной установке ШАЛ [3]. Краткий обзор работ по радиоизлучению ШАЛ можно найти в работах [4, 5]. В работе [5] указывалось о возможности регистрации ШАЛ с энергиями выше 10^{19} эВ, используя радиоустановки, расположенные на поверхности Земли и регистрируя радиоизлучение от ливней сверхвысоких энергий со спутников, вращающихся на околоземных орбитах.

Поисковые измерения радиоизлучения от ШАЛ активно проводились в 1960–70-е гг. Например, на установке МГУ в 1970-е гг. регистрировалось радиоизлучение ШАЛ при энергиях 10^{16}–10^{17} эВ [6, 7]. Позже, в 1986–1989 гг., на Якутской установке были проведены измерения радиоизлучения ШАЛ в области энергий выше 10^{17} эВ [3, 8].

В последнее время интерес к радиоизлучению ШАЛ, как независимому методу по изучению физики ШАЛ значительно вырос и для регистрации радиоизлучения ШАЛ были построены радиоустановки значительных размеров [9, 10]. Этот метод позволяет не только оценить энергию, но и восстановить картину продольного развития ливня, а именно, глубину максимума развития ШАЛ $X_{\max}$ [11, 12]. Особенно это важно для больших установок, где неопределенность в оценке энергии ливня при разных методах регистрации ШАЛ достигает порядка 20–40 %. Например, для установок Pierre Auger Observatory и Telescope Array разница составляет 20 % и до сих пор причина расхождения остается не выясненной [13]. В этом смысле, радиоизлучение, совместно с другими методами регистрации ШАЛ, могло бы быть использовано для взаимной калибровки больших установок.

В настоящей работе приводятся данные о радиоизлучении ШАЛ сверхвысоких энергий, полученные на Якутской установке за периоды 1987–1989 гг. и 2009–2014 гг.

2. Наблюдение радиоизлучения ШАЛ сверхвысоких энергий.

2.1. Радиоустановка. В середине 1980-х гг. на Якутской установке была создана радиоустановка для регистрации напряженности электрического поля в полосе пропускания 30–40 МГц генерируемого заряженными частицами широкого атмосферного ливня [14]. Функционально установка состояла

[1)]e-mail: igor.petrov@ikfia.sbras.ru

из двух частей, аналоговой и цифровой. Аналоговая часть включает прием, усиление радиосигнала от ШАЛ, схемы согласования выходных сигналов по уровню и частоте с параметрами цифрового регистратора. Цифровая часть установки преобразует входные аналоговые сигналы в цифровой код и осуществляет запись информации о состоянии шумового излучения и полезного сигнала от ливня в буферное оперативное запоминающее устройство. Затем информация о шумовом поле и радиоимпульсе от ШАЛ переписывалась на жесткий диск накопителя ЭВМ. Регистрация радиоизлучения ШАЛ осуществлялась с помощью двадцати приемных антенн, установленных на десяти опорах, как показано на рис. 1.

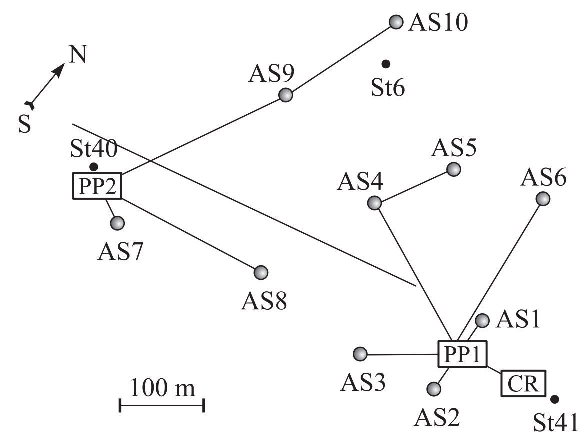

Рис. 1. План размещения антенн радиоустановки ШАЛ первой очереди в 1987–1989 гг. AS – антенная площадка, PP – периферийный (промежуточный) пункт сбора информации о ШАЛ, CR – центральный регистратор, St – станция наблюдения основной установки ШАЛ

Расстояние между опорами было переменным и составляло 50, 100, 200, 300 и 500 м. На одной опоре устанавливались две антенны, выполненные в виде двух независимых полуволновых диполей с ориентацией В–З и С–Ю. Антенны располагались на высоте $\lambda/4$, что обеспечивало максимум диаграммы направленности для излучения приходящего сверху. Площадь радиоустановки составляла 0.35 км^2.

На рис. 2 показано расположение антенн на одной из опор радиоустановки. В нижней части опоры под антеннами закреплен термодемпфированный контейнер, в котором были размещены предварительные усилители и высокочастотные реле для дистанционной калибровки приемных устройств. Симметрирование входов приемного тракта с антеннами обеспечивалось кабельным U-коленом. Для усиления сигналов радиоимпульсов применялись унифицированные широкополосные приемники прямого усиления с полосой пропускания 30–35 МГц. Подавление усиления на частоте 29 МГц больше 40 дБ, при частоте ниже 28 МГц больше 60 дБ. Конструктивно приемники выполнены в виде двух блоков. В блоке, расположенном под антенной, размещался малошумящий усилитель с коэффициентом усиления $K_u \cong 40$ дБ и с выходом, согласованным с кабелем. Во втором блоке, который находится в теплом фургоне, размещался оконечный усилитель с мощным выходом и с $K_u \cong 40$ дБ. Для сопряжения с полосой пропускания аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на выходе усилителей стоят амплитудные детекторы. Для повышения линейности детектирования применялись мощные полевые транзисторы типа КП901 и КП902.

Рис. 2. Пункт приема радиоизлучения на Якутской установке ШАЛ. Пункт состоит из двух приемных антенн, ориентированных по направлению В–З и С–Ю

Вся регистрирующая аппаратура: оконечные усилители детекторы и АЦП размещались в двух теплых фургонах. Там же находились калибровочные генераторы и высокочастотные переключатели.

2.2. Калибровка. При калибровке вход антенного усилителя отключается от антенны и подключается к выходу калибровочного генератора через радиочастотный кабель. Калибровка выполнялась автоматически без участия оператора через заданные интервалы по времени. Для этой цели использовались дистанционно-управляемые генераторы Г4-151 и ВЧ-переключатели на реле РЭВ-15, которые управлялись центральной ЭВМ. Для повышения точности временной привязки была введена дополнительная синхронизация АЦП от кварцевых генераторов.

2.3. АЦП. На первом этапе эксперимента использовались АЦП Ф-4226 с параметрами: время преобразования – 50 нс, точность – 8 разрядов (256 амплитудных точек), емкость ОЗУ–1024 слова (51 мкс). Непрерывная работа преобразователя позволяла сохранять в памяти информацию о радиоимпульсе до поступления на вход АЦП сигнала запуска от "мастера" основной установки ШАЛ. 9-й бит информационного слова являлся признаком данных, находящихся в ОЗУ до запуска.

Дополнительная синхронизация с ШАЛ обеспечивалась специальным каналом, предназначенным для регистрации синхроимпульсов на частоте 207 МГц от основной установки. Точность синхронизации составляла 100 нс.

3. Результаты. За 10 лет работы радиоустановки время наблюдения составило 50400 часов. Было зарегистрировано 14700 событий ШАЛ с радиоизлучением, чьи оси находились в круге с радиусом 1.5 км, а энергия превышала 10^{17} эВ. За это время были зарегистрированы и ливни, чьи энергии превышали 10^{19} эВ. По этим данным установлена связь радиоизлучения с параметрами ШАЛ [15] и доказана возможность использования их для изучения физики и астрофизики космических лучей (КЛ) в области самых больших энергий [16].

На рис. 3a представлено облако точек, построенное по данным, приведенным в табл. 1. Основная масса ливней имеет энергии от 10^{19} до $3.5 \cdot 10^{19}$ эВ и два ливня имеют энергии более 10^{20} эВ. На рис. 3b точки приведены к средней энергии $\langle E_0 \rangle = 1.54 \cdot 10^{19}$ эВ и среднему зенитному углу $\langle \theta \rangle = 43.1°$ и показаны в логарифмическом масштабе.

На рис. 3b обращают на себя внимание точки (обозначены треугольниками), которые находятся значительно выше относительно общей массы точек. Эти радиосигналы зарегистрированы в двух ливнях с максимальными энергиями. Мы специально не нормировали их по энергии, чтобы подчеркнуть особый статус этих точек, т.к. они относятся к ливням с энергией $E_0 \geq 10^{20}$ эВ и, соответственно, имеют на порядок большие амплитуды, чем остальные ливни. Как видно из табл. 1, было зарегистрировано два ливня с энергией выше 10^{20} эВ. Первый ливень (7 мая 1989 г.) был зарегистрирован только одной антенной. Второй ливень (4 января 2014 г.) удалось зарегистрировать двумя антеннами, находящимися на разных расстояниях (1013 и 988 м от оси ливня); это отмечено двумя треугольниками в правой части рис. 3b.

Видно, что после нормировки облако точек указывает на быстрое затухание радиосигнала и отражает функцию пространственного распределения

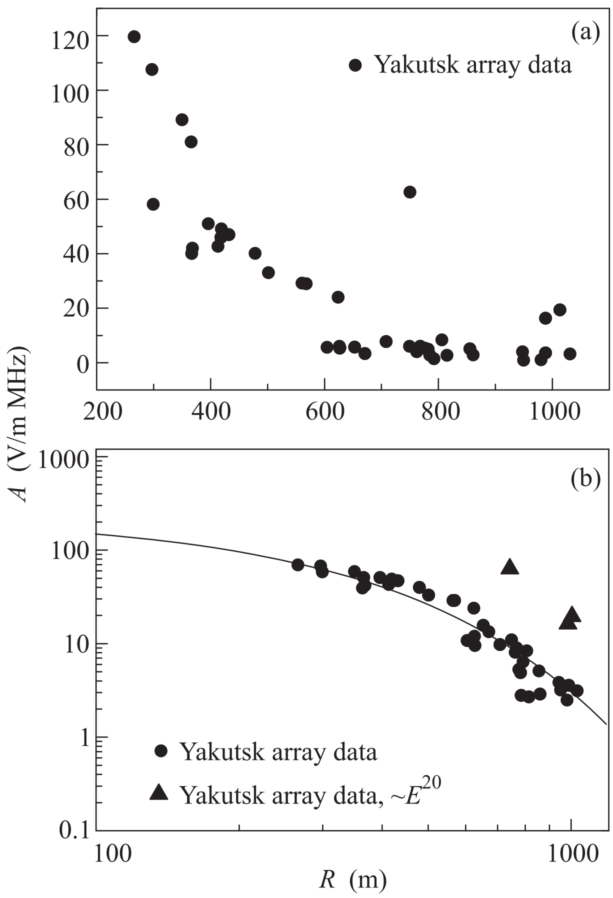

Рис. 3. Зависимость пространственного распределения напряженности электромагнитного поля ε_ν от расстояния до оси ШАЛ. Точки нормированы к средней энергии $\langle E_0 \rangle = 1.54 \cdot 10^{19}$ эВ. (a) – Линейный масштаб. (b) – Логарифмический масштаб. Треугольники – амплитуды сигналов, зарегистрированные в ливнях с энергией $\sim 10^{20}$ эВ

(ФПР) радиосигнала в зависимости от удаления антенн от оси ШАЛ.

Как можно видеть из рис. 3a, полученная зависимость амплитуды радиосигнала от расстояния близка к простому экспоненциальному виду:

$$E = \varepsilon \exp\left(\frac{R}{R_0}\right). \tag{1}$$

Для описания экспериментальных данных методом минимизации была подобрана функция вида (2):

$$\varepsilon = (29.5 \pm 1.6)\left(\frac{E}{5 \cdot 10^{17}}\right)^{(0.83 \pm 0.03)} \times$$
$$\times\, (1 - \cos\theta)^{(1.16 \pm 0.03)} \times$$
$$\times \exp\left\{-\frac{R}{(162 \pm 8) + (84 \pm 3)\left[\frac{X_{\max} - 675}{100}\right]}\right\}, \tag{2}$$

Таблица 1. Список ливней с радиоизлучением от ШАЛ с энергией выше 10^{19} эВ, зарегистрированных на установке в Якутске: date – дата регистрации ливня, θ – зенитный угол, ψ – азимутальный угол, E_0 – энергия первичной частицы, A_ν – амплитуда радиосигнала ($мкВ \cdot м^{-1} \cdot МГц^{-1}$), R – расстояние от оси ливня до антенн

date	θ, deg	ψ, deg	E_0, эВ	A_ν	R, m
16.11.86	74	180	$3.1 \cdot 10^{19}$	58.0	300
16.12.87	71	178	$3 \cdot 10^{19}$	40	367
21.02.88	70	210	10^{19}	3.1, 3.8	1030, 950
09.03.88	36	125	$9 \cdot 10^{18}$	6.2	792
07.05.89	59	168	$2 \cdot 10^{20}$	62.5	750
10.03.11	51	239	$1.1 \cdot 10^{19}$	89, 43, 5.8	350, 413, 604
16.05.11	69	99	$1.6 \cdot 10^{19}$	33, 29, 40	501, 564, 479
31.12.11	15	165	$1.1 \cdot 10^{19}$	1.2, 1.0, 2.9	950, 980, 860
12.04.12	8	222	$1.3 \cdot 10^{19}$	4.1, 2.8, 6.0	762, 785, 626
04.05.13	46	295	$1.1 \cdot 10^{19}$	5.3, 6.0, 12	776, 768, 368
12.12.13	15	297	$1.2 \cdot 10^{19}$	5.1, 8.4, 3.6	855, 806, 988
03.10.13	21	21	$1.1 \cdot 10^{19}$	9.1, 11, 2.7	419, 396, 815
22.03.13	46	4	$1.8 \cdot 10^{19}$	41, 48, 78	418, 432, 366
02.01.14	48	207	$1.0 \cdot 10^{20}$	16.3, 19.4	1013, 988
22.01.14	47	189	$1.1 \cdot 10^{19}$	107.6, 119.6	297, 266
05.02.14	26	343	$3.5 \cdot 10^{19}$	3.4, 5.6	671, 627
02.03.14	30	217	$1.2 \cdot 10^{19}$	4.9, 6.0, 7.8	782, 749, 708

где E_0 – энергия первичной частицы, θ – зенитный угол, R – расстояние от оси ШАЛ до антенны, $X_{\max}$ – глубина максимума развития ливня.

Формула (2) хорошо описывает пространственное распределение радиосигнала на средних и больших расстояниях от оси ливня. На рис. 3b аппроксимация показана сплошной линией.

Воспользовавшись этим, мы определили амплитуду сигнала на расстоянии 175 и 725 м и вычислили значение глубины максимума ливня $X_{\max}$ по формуле (3):

$$X_{\max} = (660 \pm 15) + (100 \pm 5)\left(\frac{P - 11.5}{3}\right), \qquad (3)$$

где P – параметр, характеризующий отношение амплитуд радиосигнала на выбранных расстояниях от оси ливня, $P = A_1/A_2$.

Применив установленную нами в работе [15] связь наклона ФПР с $X_{\max}$, мы оценили среднюю высоту максимума $X_{\max} = 760 \pm 30\,г \cdot см^{-2}$ для гипотетического ливня с энергией $1.54 \cdot 10^{19}$ эВ.

Используем теперь величину $X_{\max}^{\exp}$, полученную выше экспериментально, для оценки атомного веса первичной частицы космического излучения $\langle \ln A \rangle$, породившей ШАЛ с такой энергией. Это можно сделать методом интерполяции по формуле (4) [17]:

$$\langle \ln A \rangle = \left(\frac{X_{\max}^{\exp} - X_{\max}^{p}}{X_{\max}^{\mathrm{Fe}} - X_{\max}^{p}}\right) \cdot \ln A_{\mathrm{Fe}}, \qquad (4)$$

где $X_{\max}^{\exp}$ – глубина максимума развития ШАЛ по радиоданным, $X_{\max}^{p}$ – расчетная глубина максимума ливня от первичного протона, $X_{\max}^{\mathrm{Fe}}$ – расчетная глубина максимума от первичного ядра железа, $\ln A_{\mathrm{Fe}}$ – натуральный логарифм атомного веса железа. Расчеты глубин максимумов ливня проводились по модели адронных взаимодействий QGSjetII-04.

Полученное по данным радиоизмерений значение $\langle \ln A \rangle = (1.61 \pm 0.40)$ оказалось близким к значениям $\langle \ln A \rangle = (0.8–2.0)$, полученным по данным измерений черенковского света ШАЛ [18]. В этом случае можно говорить, что поток первичных частиц КЛ, образующих ШАЛ с энергией выше 10^{19} эВ, состоит преимущественно из протонов p, ядер гелия He и ядер углерода C.

Таким образом, регистрируя радиоизлучение в области гигантских энергий, можно, подобно установкам, состоящим из сцинтилляционных и оптических детекторов, получать такие физические характеристики ШАЛ, как энергия E, мощность N_s и продольное развитие ливня $X_{\max}$.

На радиоустановках с большой площадью статистика ливней с энергией выше 10^{19} эВ значительно увеличится. Это позволит в будущем получить и астрофизические характеристики космического излучения такие, как энергетический спектр и массовый состав первичных частиц.

4. Заключение. Долговременные наблюдения радиоизлучения ШАЛ на Якутской комплексной установке доказали существование радиоизлучения при энергии выше 10^{19} эВ. Это позволило установить некоторые характеристики радиоизлучения при таких энергиях.

В частности, была получена функция затухания радиосигнала ШАЛ от расстояния при энергиях выше 10^{19} эВ и ее градиент. Далее было доказано наличие радиосигнала ШАЛ при энергиях $\geq 10^{20}$ эВ, т.е. в самых больших ливнях, зарегистрированных на Якутской установке [8]. Было также показано присутствие значительного сигнала в сильно-наклонных ливнях и отмечено влияние магнитного поля на форму ФПР. Последнее еще раз подтверждает роль геомагнитного механизма в генерации радиоизлучения [14]. Наконец, в рамках модели QGSJETII-04, оценка массового состава КЛ при энергиях выше 10^{19} эВ, полученная по радиоданным, хорошо согласуется с нашими результатами из работы [18]. Оценка указывает на химический состав КЛ с преобладанием легких ядер. Этот вывод не противоречит также результатам по массовому составу, полученному на самых больших установках ШАЛ [19].

Авторы выражают благодарность всему коллективу Якутской комплексной установки ШАЛ за возможность использования экспериментальных данных и полезные обсуждения в ходе подготовки статьи. Отдельно мы благодарим рецензентов за предложения и помощь, оказанную авторам, при окончательном оформлении статьи. Это значительно улучшило ее качество.

1. Г. А. Аскарьян, ЖЭТФ **41**, 2(8), 616 (1961).
2. Г. А. Аскарьян, ЖЭТФ **48**(3), 988 (1965).
3. В. П. Артамонов, В. Б. Атрашкевич, Т. А. Егоров, А. Н. Ефимов, Т. В. Рехлясова, Н. И. Слепцов, С. А. Шудря, *Широкие атмосферные ливни с энергией выше* 10^{17} *эВ*, сб. научных трудов, ЯФ СО АН СССР, Якутск (1987), с. 109.
4. А. Д. Филоненко, Успехи физических наук **172**(4), 439 (2002).
5. В. А. Царев, Физика элементарных частиц и атомного ядра **35**(1), 1 (2004).
6. С. Н. Вернов, А. Т. Абросимов, В. Д. Воловик, И. И. Залюбовский, Г. Б. Христиансен, Письма ЖЭТФ **5**, 157 (1967).
7. В. Б. Атрашкевич, О. В. Веденеев, Х. Р. Алан, Дж. К. Джонс, Н. Мандолези, Г. Мориджи, Дж. Дж. Палмбо, Ядерная физика **28**, 3(9), 712 (1978).
8. V. P. Artamonov, T. E. Egorov, A. N. Efimov et al., Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conference, Adelaide **9**, 210 (1990).
9. P. Schellart, A. Nelles, S. Buitink et al. (Collaboration), A&A **560**, A98 (2013).
10. B. Fuchs et al. (for the Pierre Auger Coll.), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **93**, A692 (2012).
11. W. D. Apel, J. C. Arteaga-Velazquez, L. Bähren et al. (Collaboration), Phys. Rev. D **90**, 062001 (2014).
12. S. Knurenko and I. Petrov, J. Phys.: Conf. Ser. **632** 012100 (2015).
13. T. Abu-Zayyad et al. (Telescope A. Collaboration), A. Aab et al. (The Pierre Auger Collaboration), Rio de Janeiro, Brazil, July 2013; arXiv:1310.0647 [astro-ph.HE].
14. З. Е. Петров, Д. С. Борщевский, С. П. Кнуренко, В. И. Козлов, И. С. Петров, М. И. Правдин, Вестник СВФУ **8**(4), 5 (2011).
15. С. П. Кнуренко, И. С. Петров, Изв. РАН, сер. Физ. **79**(3), 448 (2015).
16. S. Knurenko, I. Petrov, and Z. Petrov, *Proc. 34 Int. Cosmic Ray Conference*, PoS 255 (2015); http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=236.
17. E. G. Berezhko, S. P. Knurenko, and L. T. Ksenofontov, Astroparticle Physics **36**, 31 (2012).
18. S. Knurenko and I. Petrov, EPJ Web of Conferences **99**, 04003 (2015).
19. E. Barcikowski, J. Bellido, J. Belz, Y. Egorov, S. Knurenko, V. de Souza, Y. Tsunesada, and M. Unger, EPJ Web of Conferences **53**, 01006 (2013).