

ИЗУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ 5 ЭэВ РАДИОМЕТОДОМ

© 2024 г. И. С. Петров¹⁾, *, С. П. Кнуренко¹⁾

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.; после доработки 09.10.2023 г.; принята к публикации 09.10.2023 г.

На Якутской установке с 1986 г. было начато регулярное измерение радиоизлучения, генерируемое релятивистскими частицами ШАЛ. В результате изучения шумового поля в районе установки была выбрана частота регистрации 30–35 МГц, так как на этой частоте шумы были минимальными. За это время были зарегистрированы ливни с максимальными энергиями в 100 ЭэВ. Совместное изучение заряженных частиц, черенковского света ШАЛ и радиоизлучения показало, что амплитуда радиосигнала пропорциональна энергии ливня, а форма пространственного распределения радиоизлучения на уровне моря связана с максимумом развития каскада частиц ливня. По этим характеристикам с применением расчетов по модели QGSjetII-04 была дана оценка атомного веса первичных частиц, образующих ШАЛ.

DOI: 10.31857/S0044002724020029, EDN: KRWDGO

1. ВВЕДЕНИЕ

Детектирование космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий осуществляется с помощью традиционных методов регистрации ионизирующего излучения, в основе которых лежит применение сцинтилляционных и других счетчиков [1]. Из-за крайне низкой интенсивности КЛ сверхвысоких и предельных энергий на 1 км² падает одна частица с энергией 10¹⁹ эВ в год [2], на современных установках для регистрации таких ливней количество счетчиков может быть велико, а площади установок могут достигать до 3000 км². За 50 лет, прошедших с момента регистрации первого события КЛ с энергией выше 10²⁰ эВ (1962 г., детектор Volcano Ranch, США [3]), на пяти крупнейших установках космических лучей удалось зарегистрировать лишь около десяти событий ШАЛ с энергией $E \geq 10^{20}$ эВ и менее сотни событий с $E \geq 5 \times 10^{19}$ эВ. Для детального изучения КЛ таких энергий необходимо значительно увеличить статистику ливней. Существующие установки близки к пределу по площади обзора, достижимой на уровне моря. По-видимому, дальнейшее расширение энергетического диапазона экспериментальных установок и увеличение статистики КЛ предельных энергий могут быть связаны с детектированием КЛ установками, созданными в космическом пространстве [2]. Как показали первые наблюдения, этот вид регистрации ШАЛ имеет практическую перспективу. Не

требует сложной аппаратной части при регистрации ШАЛ и является менее затратным в финансовом отношении.

Радиоизлучение ШАЛ было впервые зарегистрировано в Америке Джелли и др. в 1965 г. на частоте 44 МГц [4]. С тех пор с разной периодичностью радиоизлучение исследуется на малых и крупных установках ШАЛ. Целью этих исследований является установление механизмов генерации радиоизлучения ШАЛ и применения его как независимого метода для изучения характеристик ШАЛ сверхвысоких и предельных энергий вплоть до энергий 10²⁰ эВ.

Радиометод основан на регистрации радиоизлучения, генерируемого при движении заряженных частиц ШАЛ в магнитном поле Земли [5, 6], и эффекте Аскарьяна [7]. Вклад обоих механизмов зависит от условий развития ШАЛ в атмосфере: глубины максимума развития, направления прихода и энергии первичной частицы ливня.

Зависимость радиоизлучения от развития электромагнитного каскада ШАЛ в атмосфере и величины магнитного поля вблизи уровня наблюдения позволяет определить энергию ливня независимо от других методов регистрации ШАЛ. Радиоизлучение также чувствительно к продольному развитию ливня [8], что позволяет по измеренному радиоизлучению ШАЛ определить глубину максимума развития ливня X_{\max} .

Первые измерения радиоизлучения от ливней сверхвысокой энергии, проведенные в 1986–1989 гг. на Якутской комплексной установке широких атмосферных ливней, показали перспективность

¹⁾Институт космофизических исследований и аэронауки имени Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия.

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

таких измерений на частоте 30–35 МГц. За это время был набран массив экспериментальных данных, анализ которых позволил получить первые представления о характере затухания радиосигнала, амплитуде и флуктуациях сигнала в зависимости от мощности N_{el} и расстояния до оси ливня $R_{x,y}$. На установке впервые было зарегистрировано радиоизлучение в ливнях с энергией выше 10^{19} эВ и даже 10^{20} эВ. В частности, 07.05.1989 г. на Якутской установке ШАЛ было зарегистрировано радиоизлучение в ливне с максимальной энергией $\sim 2 \times 10^{20}$ эВ [9, 10].

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

В середине 1980-х гг. на Якутской установке была введена в эксплуатацию радиоустановка на частоте регистрации 30–35 МГц, которая представляла независимый метод регистрации ШАЛ [9]. Всего было установлено 10 антенн. Расстояние между антеннами было 50, 100, 200, 300 и 500 м на площади примерно 0.35 км^2 . Антенны представляли собой два полуволновых диполя с диаграммой направленности Восток–Запад и Север–Юг, поднятые на высоту $\lambda/4$. В ходе первых наблюдений по регистрации радиоизлучения в 1986–1989 гг. были зарегистрированы сигналы в 6250 ливнях с энергией выше 10^{17} эВ, в том числе несколько событий с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ [11].

В 2009 г. на Якутской установке ШАЛ были возобновлены наблюдения радиоизлучения, для

этого были установлены шесть антенн [12]. Приемные антенны для регистрации радиоизлучения располагались на расстоянии 300, 350 и 500 м от центра установки. Регистрация радиоизлучения ШАЛ, как и в первом случае, проводилась на частоте 30–35 МГц [13]. Для регистрации радиоизлучения ШАЛ также были выбраны полуволновые диполи (рис. 1), поднятые на высоту $\lambda/4$ от земли. Одна антенна была ориентирована в направлении Восток–Запад (по магнитному параллели), другая на Север–Юг (по магнитному меридиану).

Радиоизлучение ШАЛ регистрировалось при наличии одного из двух триггеров Якутской установки: триггер от сцинтилляционных детекторов, расположенных на удалении друг от друга 500 м, и триггер от детекторов черенковского света ШАЛ, расположенных на удалении друг от друга на 50, 100, 250 м.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Функция пространственного распределения радиоизлучения

Для построения средней функции пространственного распределения (ФПР) радиоизлучения ШАЛ из базы данных был отобран 421 ливень. Ливни были зарегистрированы в период 2009–2012 гг. и отбирались по следующим критериям: оси ливней должны находиться в круге 500 м от центра радиоустановки, энергия ливней $E_0 \geq 10^{17}$ эВ, зенитный угол $\theta \leq 60^\circ$ и амплитуда сигнала должна была в 5 раз превышать амплитуду шумов.

Затем ливни были разбиты на три интервала по энергии: $(1-4) \times 10^{17}$, $(4-8) \times 10^{17}$, $(8-12) \times 10^{17}$ эВ. Полученное в каждом интервале по энергии облако точек разбивалось с равномерным шагом по расстоянию, $\Delta \lg R = 0.4$, и затем с учетом спадающего



Рис. 1. Антенна для регистрации радиоизлучения на Якутской установке.

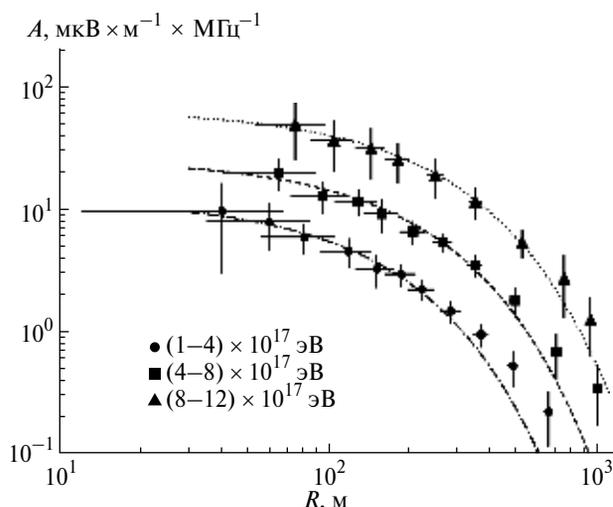


Рис. 2. ФПР радиоизлучения на частоте 30–35 МГц в ливнях с энергиями $(1-4) \times 10^{17}$ эВ, $(4-8) \times 10^{17}$ эВ и $(8-12) \times 10^{17}$ эВ.

Таблица 1. Список ливней с радиоизлучением с энергией выше 10^{19} эВ

Дата	θ , град	ϕ , град	E_0 , эВ	A , мкВ \times м $^{-1}$ \times МГц $^{-1}$	R , м
16.11.86	74	180	3.1×10^{19}	58	300
16.12.87	71	178	3×10^{19}	40	367
21.02.88	70	210	10^{19}	3.1, 3.8	1030, 950
09.03.88	36	125	9×10^{18}	6.2	792
07.05.89	59	168	2×10^{20}	62.5	750
10.03.2011	51	239	1.1×10^{19}	89, 43, 5.8	350, 413, 604
16.05.2011	69	99	1.6×10^{19}	33, 29, 40	501, 564, 479
31.12.2011	15	165	1.1×10^{19}	1.2, 1.0, 2.9	950, 980, 860
12.04.2012	8	222	1.3×10^{19}	4.1, 2.8, 6.0	762, 785, 626
04.05.2013	46	295	1.1×10^{19}	5.3, 6.0, 12	776, 768, 368
12.12.2013	15	297	1.2×10^{19}	5.1, 8.4, 3.6	855, 806, 988
03.10.2013	21	21	1.1×10^{19}	9.1, 11, 2.7	419, 396, 815
22.03.2013	46	4	1.8×10^{19}	41, 48, 78	418, 432, 366
02.01.2014	48	207	7.9×10^{19}	16.3, 19.4	1013, 988
22.01.2014	47	189	1.1×10^{19}	107.6, 119.6	297, 266
05.02.2014	26	343	3.5×10^{19}	3.4, 5.6	671, 627
02.03.2014	30	217	1.2×10^{19}	4.9, 6.0, 7.8	782, 749, 708
04.01.2018	26	211	1.6×10^{19}	1.3	1038
05.01.2018	45	303	2.1×10^{19}	180, 150	106, 118

локального градиента подсчитывалась средневзвешенная амплитуда [14]. Результаты зависимости амплитуды от расстояния для каждого из интервалов по энергии показаны на рис. 2.

Кривыми на рисунке показана аппроксимация вида

$$A = \epsilon \exp\left(-\frac{R}{R_0}\right), \quad (1)$$

где A — амплитуда сигнала; ϵ — коэффициент пропорциональности (зависит от энергии);

R — расстояние от оси ливня до антенны радиоизлучения; R_0 — показатель наклона.

На рис. 3 показано пространственное распределение радиосигналов, зарегистрированное в ливнях с энергиями выше 10^{19} эВ (табл. 1). Большая часть ливней имеет энергии $10^{19} - 3.5 \times 10^{19}$ эВ и два ливня с энергией выше 10^{20} эВ [15]. Точки нормированы на среднюю энергию $\langle E_0 \rangle = 1.5 \times 10^{19}$ эВ и приведены к среднему зенитному углу $\langle \theta \rangle = 43^\circ$. Данные представлены в логарифмическом масштабе. Кривой показана аппроксимация точек согласно формуле (1). Сигналы ливней с энергией 10^{20} эВ обозначены треугольниками. Горизонтальной линией показаны ошибки лоцирования оси ливня, а вертикальными — ошибки измерения сигнала радиоизлучения ШАЛ.

3.2. Оценка энергии ливня

Для нахождения корреляции амплитуды радиосигнала от энергии ШАЛ были использованы ливни, совместно зарегистрированные детекторами черенковского света и антеннами радиоизлучения. Энергия определялась по потоку черенковского света ШАЛ на расстоянии 400 м от оси ливня [16]. Амплитуда радиоизлучения бралась на расстоянии 350 м по направлению Восток—Запад. Большинство отобранных для анализа ШАЛ зарегистрировано в сезонах 2009–2012 гг. Ливни с максимальной энергией выше 10^{19} эВ взяты из наблюдений в сезонах 1987–1989 и 2009–2018 гг. На рис. 4 показана корреляция энергии ШАЛ E_0 и амплитуды радиосигнала A_{\max} . Здесь энергия определялась по полному потоку черенковского света ШАЛ.

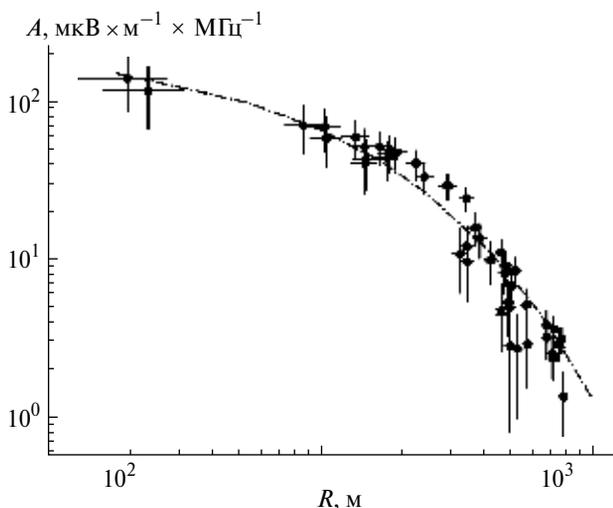


Рис. 3. ФПР ливней с энергией $E \geq 10^{19}$ эВ. Точки нормированы на среднюю энергию $\langle E_0 \rangle = 1.5 \times 10^{19}$ эВ и приведены к среднему зенитному углу $\langle \theta \rangle = 43^\circ$. Данные представлены в логарифмическом масштабе.

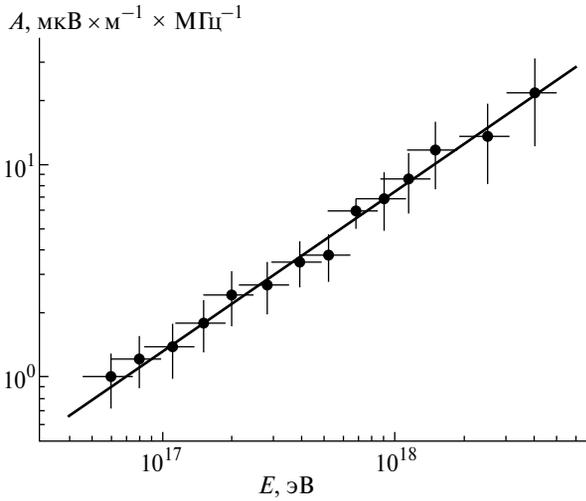


Рис. 4. Зависимость амплитуды радиосигнала A_{\max} от энергии, определенной по потоку черенковского света ШАЛ на расстоянии 400 м от оси ливня.

Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией дает следующую эмпирическую формулу связи амплитуды радиосигнала с энергией ливня со значением $\chi^2 = 0.13$:

$$A_{EW} = (1.35 \pm 0.06) \left(\frac{E_0}{10^{17}} \text{эВ} \right)^{0.74 \pm 0.03}. \quad (2)$$

3.3. Глубина максимума развития ШАЛ

Глубина максимума развития ШАЛ X_{\max} на Якутской установке определяется из каскадной кривой, восстановленной по ФПР черенковского света методом решения обратной задачи [17]. Алгоритм детально описан в работах [18, 19]. Суть метода состоит в следующем. Плотность потока черенковского света ШАЛ можно представить

в виде уравнения Фредгольма первого типа ((3), см. ниже). Это основа данного алгоритма, который в нашем случае решался адаптивным методом [20]:

$$Q_{\text{exp}} = \delta_Q + \int_{X_1}^{X_2} G(R, X / X_2) N(E_0, X) K(\lambda, X) dX, \quad (3)$$

где $G(R, X/X_2)$ — функция, которая определяется пространственно-угловым распределением электронов и в частично электрон-фотонном каскаде; $N(E_0, X)$ — каскадная кривая; δ_Q — уровень “шумов”, зависящий от неопределенности измерений, статистической обработки данных, функции $G(R, X/X_2)$ и т.п.; $K(\lambda, X)$ — коэффициент пропускания атмосферы; X_1 и X_2 — верхний и нижний пределы атмосферы.

Как видно из формулы (3), метод учитывает физику развития электрон-фотонной компоненты и характеристики атмосферных условий в период регистрации черенковского излучения [21].

Далее для каждого ливня была получена эмпирическая связь формы ФПР черенковского света $P(Q200/Q550)$, где $Q200$ и $Q550$ — плотности потока черенковского света ШАЛ на расстоянии 200 и 550 м от оси ливня, с X_{\max} [22].

Аналогично для нахождения связи между радиоизлучением и X_{\max} использовались ливни с энергией выше 10^{17} эВ и амплитудами выше уровня шумов в 5 раз, которые были одновременно зарегистрированы детекторами черенковского света и радиоантеннами. Таким образом, был отобран 421 ливень. Полная статистика ливней приводится в табл. 2. На Якутской установке, таким образом, была установлена эмпирическая связь X_{\max} с отношением амплитуд радиосигнала, измеренными на расстояниях 80–200 м и 175–725 м. Корреляция X_{\max} с параметром $P_1 = A(80) / A(200)$ и $P_2 = A(175) / A(725)$

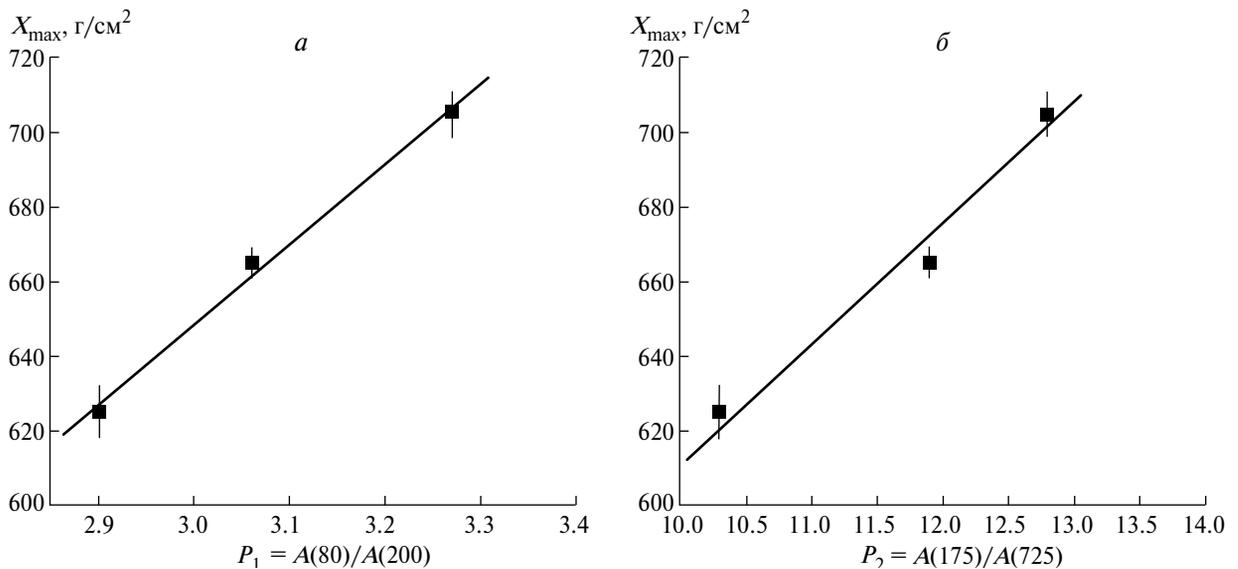


Рис. 5. Корреляция X_{\max} с отношением амплитуд радиосигнала, измеренных на разных расстояниях от оси ШАЛ: а — на расстоянии 80 и 200 м; б — на расстояниях 175 и 725 м.

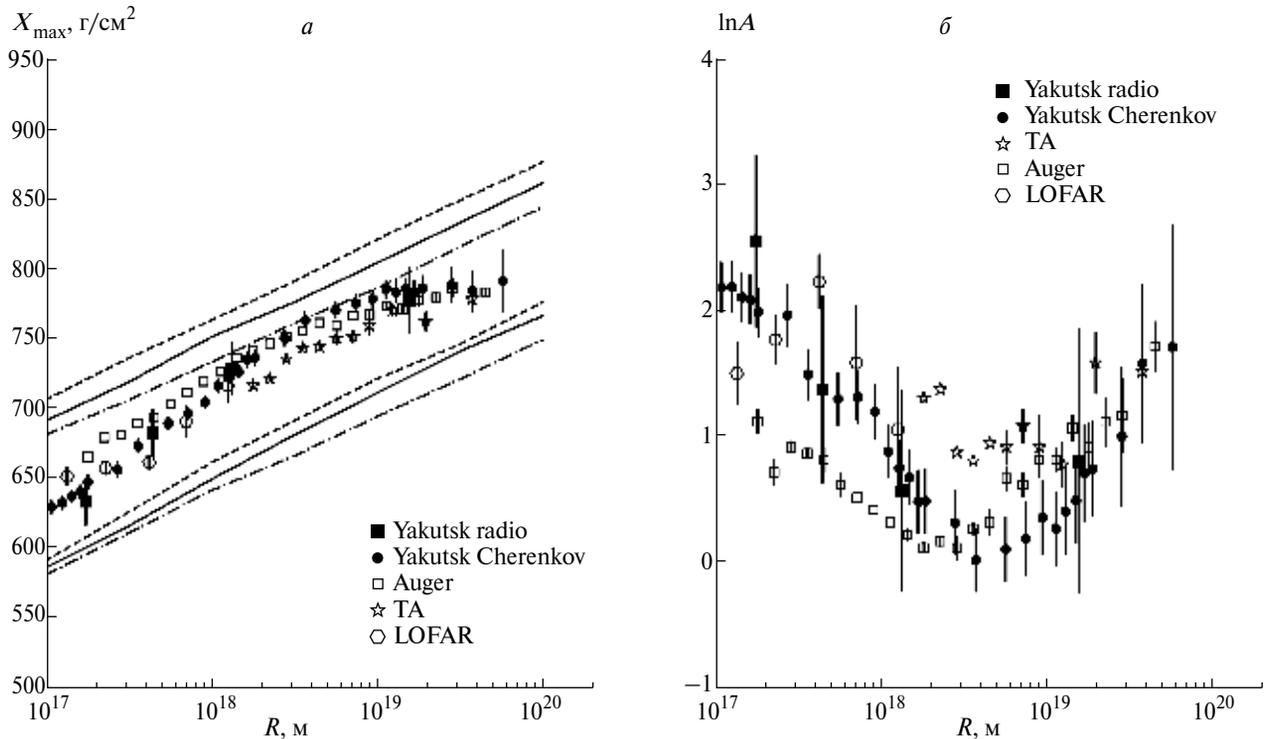


Рис. 6. *a* — зависимость X_{\max} от энергии; *б* — зависимость массового состава $\langle \ln A \rangle$ от энергии.

показана на рис. 5. Прямыми линиями на рис. 5 показаны аппроксимации данных простой линейной функцией вида

$$X_{\max} = (8 \pm 28) + P_1(217 \pm 11), \quad (4)$$

$$X_{\max} = (281 \pm 9) + P_2(33 \pm 2). \quad (5)$$

Далее формулы (4) и (5) использовались для определения X_{\max} в индивидуальных событиях ШАЛ. Точность, с которой определялась глубина максимума X_{\max} , находилась в пределах 20–35 г/см² для высот максимума ливня 600–790 г/см². С приближением X_{\max} к уровню моря точность

определения X_{\max} ухудшается. Средние значения X_{\max} , определенные в разных интервалах по энергии, даны на рис. 6, *a*.

3.4. Массовый состав

Для определения глубины максимума развития ШАЛ X_{\max} была использована связь формы ФПР с продольным развитием ливня в атмосфере, описанного в работе [22]. Зная средние значения глубины максимума $\langle X_{\max} \rangle$ и средние значения X_{\max} для протона и ядра железа по модели адронных взаимодействий QGSJetII-04 [23], можно определить значения $\langle \ln A \rangle$ методом интерполяции по формуле (6) [24, 25]:

$$\langle \ln A \rangle = \frac{X_{\max}^{\text{exp}} - X_{\max}^p}{X_{\max}^{\text{Fe}} - X_{\max}^p} \ln A_{\text{Fe}}, \quad (6)$$

где X_{\max}^{exp} — глубина максимума развития, определенная из эксперимента; $\ln A_{\text{Fe}}$ — натуральный логарифм атомной массы железа.

Значения $\langle \ln A \rangle$ для разных энергий показаны на рис. 6, *б* в сравнении с данными черенковских детекторов Якутской установки [26], ТА [27] и Оже [28]. Как видно, данные по радиоизлучению согласуются с другими экспериментами.

По данным измерения радиоизлучения ШАЛ на Якутской установке видно, что для области энергии меньше 10¹⁷ эВ массовый состав космических лучей более тяжелый, а в области энергий 10¹⁷–10¹⁹ эВ состав становится более легким.

Таблица 2. Статистика зарегистрированных ливней по сезонам регистрации на Якутской установке (*t* — время работы установки (часы); N_{EAS} — полное число событий ШАЛ; t_{Cher} — время работы Малой черенковской установки (часы); N_{Cher} — число черенковских событий; N_{rad} — число событий с радиоизлучением)

Сезон	<i>t</i> , ч	N_{EAS}	N_{Cher}	t_{Cher} , ч	N_{rad}
2009–2010	6154.14	113138	9897	621.78	822
2010–2011	6455.25	137830	8611	508.39	1017
2011–2012	6533.94	155351	9227	482.11	1183
2012–2013	6515.54	149381	10219	591.77	1151
2013–2014	6446.44	147589	7164	396.00	1123
2014–2015	6365.05	140101	7838	429.34	840
2015–2016	5671.43	127490	4819	314.60	867

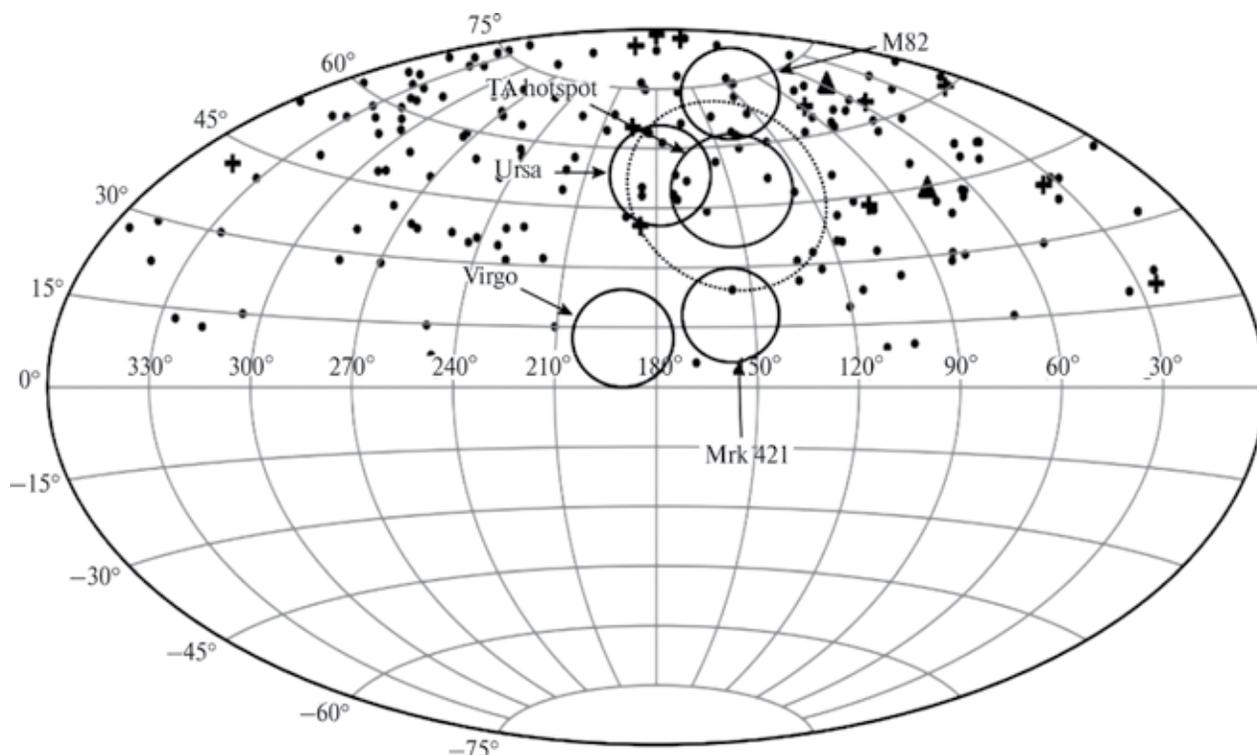


Рис. 7. Распределение прихода событий ШАЛ на небесной сфере.

3.5. Предполагаемые источники

На рис. 7 представлена карта неба, на которую нанесены ливни с энергиями выше 5×10^{18} эВ в экваториальных координатах. Крестиками показаны ливни с энергиями $E_0 \geq 10^{19}$ эВ, зарегистрированные с помощью радиантенн Якутской установки за периоды наблюдения 1986–1989 и 2009–2018 гг. Представлены ливни из табл. 1. Треугольниками отмечены ливни с энергией $E_0 \geq 10^{20}$ эВ.

Дополнительно точками показаны ливни из работы [29], это ливни, зарегистрированные на Якутской установке с энергиями выше 5×10^{18} эВ, с близкими характеристиками и пришедшие друг за другом в течение 24 ч.

Практически ливни с радиоизлучением вписываются в равномерное распределение на карте неба в совокупности с другими ливнями. Малая статистика ливней пока не позволяет сделать выводы о сгущении ливней в одной точке небесной сферы. Представленные на сфере вероятные источники космических лучей: созвездия Медведицы, Девы, M82, Маркарян 421 и горячая область (hot spot) по данным ТА [30] — не группируют вокруг себя значимое количество ливней. По этой причине пока нельзя утверждать, что данные источники порождают ливни с энергиями выше 10^{19} эВ.

Как можно видеть, при достаточном количестве радиантенн можно с хорошей точностью определить направление прихода ШАЛ: зенитный и азимутальный углы, определить

экваториальные координаты ливней и вести поиск источников КЛ с энергиями выше $E_0 \geq 5 \times 10^{18}$ эВ по радиоизлучению.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было восстановлено продольное развитие в области энергий 10^{17} – 10^{19} эВ и показано продвижение X_{\max} с ростом энергии, которая имеет неравномерный ход.

По данным измерения радиоизлучения ШАЛ на Якутской установке видно (см. рис. 6, б), что для области энергии менее 10^{17} эВ массовый состав космических лучей более тяжелый — большее содержание ядер CNO и Fe. В области энергий 10^{17} – 10^{19} эВ состав, по-видимому, состоит из протонов и ядер гелия. Выше энергии 2×10^{19} эВ данные указывают на тенденцию увеличения средних ядер типа CNO в составе космических лучей.

В периоды наблюдений 1986–1989 и 2009–2018 гг. радиостановкой были зарегистрированы ливни с энергией выше 10^{19} эВ, которые нанесены на карту неба в экваториальных координатах (см. рис. 7). Несмотря на низкую статистику показано, что, имея радиостановку большей площади, можно изучать анизотропию прихода ливней радиометодом и при большой статистике ливней — вести поиск источников частиц предельных энергий.

Полученные результаты по данным измерения радиоизлучения расширяют возможности

экспериментального изучения характеристик ШАЛ. Как видно из рис. 6, результаты, полученные на Якутской радиоустановке, по измерению радиоизлучения ШАЛ хорошо согласуются с данными, полученными на больших установках другими методами, включая и радиоизлучение.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации 122011800084-7) с использованием данных, полученных на Уникальной научной установке “Якутская комплексная установка широких атмосферных ливней (ЯКУ ШАЛ) им. Д.Д. Красильникова” (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/73611/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Д. Филоненко, УФН **185**, 673 (2015) [Phys. Usp. **58**, 633 (2015)].
2. В. А. Царев, ЭЧАЯ **35**, 1 (2004).
3. J. Linsley, Phys. Rev. Lett. **10**, 146 (1963).
4. J. V. Jelley, J. H. Fruin, N. A. Porter, T. C. Weekes, F. G. Smith, and R. A. Porter, Nature **205**, 327 (1965).
5. F. D. Kahn and I. Lerche, Proc. Roy. Soc. London Ser. A **289**, 206 (1966).
6. O. Scholten, K. Werner, and F. Ruydy, Astropart. Phys. **29**, 94 (2008).
7. G. A. Askaryan, Sov. Phys. JETP **14**, 441 (1962).
8. F. G. Schröder, Prog. Part. Nucl. Phys. **93**, 1 (2017).
9. V. P. Artamonov, T. A. Egorov, N. N. Efimov, T. V. Rekhlyasova, N. I. Sleptsov, S. A. Shudrya, and V. B. Atrashkevich, in *Proceedings of the 21st ICRC, Adelaide, Australia* (1990), Vol. 9, p. 210.
10. L. G. Dedenko, A. V. Glushkov, S. P. Knurenko, I. T. Markarov, M. I. Pravdin, D. A. Podgrudkov, I. E. Sleptsov, T. M. Roganova, and G. F. Fedorova, JETP Lett. **90**, 787 (2009).
11. S. Knurenko, V. Kozlov, Z. Petrov, M. Pravdin, and A. Sabourov, in *Proceedings of the 22nd ECRS, Turku, Finland* (2010), p. 262.
12. S. P. Knurenko, Z. E. Petrov, and I. S. Petrov, Nucl. Instum. Methods A **866**, 230 (2017).
13. Р. Р. Каримов, С. П. Кнуренко, В. И. Козлов, И. Т. Макаров, З. Е. Петров, М. И. Правдин, А. А. Торопов, *Материалы XVI международного симпозиума* (Томск, Россия, 2009), с. 602.
14. S. P. Knurenko, D. S. Borschevsky, Z. E. Petrov, and I. S. Petrov, Proc. SPIE **8696**, 86960Q (2012).
15. С. П. Кнуренко, И. С. Петров, Письма в ЖЭТФ **104**, 305 (2016).
16. S. P. Knurenko, V. I. Kozlov, Z. E. Petrov, and M. I. Pravdin, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **77**, 1559 (2013).
17. A. Tikhonov and V. Arsenin, *Solution of Ill-Posed Problems* (Winston, New York, 1977), p. 258.
18. M. N. Dyakonov, S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, D. D. Krasilnikov, F. F. Lischenyuk, I. E. Sleptsov, and S. I. Nikolsky, Nucl. Instum. Methods A **248**, 224 (1986).
19. S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, and Z. E. Petrov, in *Proceedings of the 27th ICRC, Hamburg, Germany* (2001), Vol. 1, p. 157.
20. В. А. Кочнев, в Тр.: *Применение ЭВМ в задачах управления* (Красноярск, 1985. С. 62–71).
21. М. Н. Дьяконов, С. П. Кнуренко, В. А. Колосов, И. Е. Слепцов, Оптика атмосферы и океана **12**, 329 (1999).
22. С. П. Кнуренко, И. С. Петров, Изв. РАН. Сер. физ. **79**, 446 (2015).
23. S. Ostapchenko, Phys. Rev. D **83**, 014018 (2011).
24. E. G. Berezhko, S. P. Knurenko, and L. T. Ksenofontov, Astropart. Phys. **36**, 31 (2012).
25. J. Hörandel, J. Phys.: Conf. Ser. **47**, 41 (2006).
26. S. Knurenko and I. Petrov, EPJ Web Conf. **208**, 08017 (2019).
27. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, A. di Matteo, T. Fujii, K. Fujita, *et al.*, Phys. Rev. D **99**, 02002 (2019).
28. J. Bellido, A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta, I. Al Samarai, I. F. M. Albuquerque, I. Allekotte, A. Almela, J. Alvarez Castillo, J. Alvarez-Muñiz, G. A. Anastasi, L. Anchordoqui, B. Andrada, S. Andringa, C. Aramo, F. Arqueros, *et al.*, Proc. Sci. **301**, 506 (2018).
29. S. P. Knurenko, L. T. Ksenofontov, and I. S. Petrov, Adv. Space Res. **70**, 2767 (2022).
30. J. N. Matthews, R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, A. di Matteo, T. Fujii, *et al.*, Proc. Sci. **301**, 1096 (2018).

STUDY OF COSMIC RAYS WITH ENERGIES ABOVE 5 EeV USING RADIO METHOD

© 2024 I. S. Petrov¹⁾, S. P. Knurenko¹⁾

¹⁾ Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

At the Yakutsk array in 1986 regular measurements of radio emission produced by relativistic air shower particles were started. After monitoring of background noise in the array area frequency of 30–35 MHz was chosen, since noise level is minimal in this frequency range. During this time, air showers with highest energies of 100 EeV were registered. By using hybrid measurements of charged particles, Cherenkov light and radio emission it was shown that signal amplitude proportional to air shower energy and shape of lateral distribution at sea level correlates with the depth of maximum development. Using the obtained characteristics, atomic weight of primary particles that generated air shower was estimated within QGSjetII-04 framework simulation.