

Основные результаты исследования космических лучей сверхвысоких энергий на Якутской установке ШАЛ

А. А. Иванов^a, С. П. Кнуренко, М. И. Правдин^b, И. Е. Слепцов

*Институт космофизических исследований и аэрономии имени Ю. Г. Шафера СО РАН.
Россия, 677980, Якутск, пр-т Ленина, д. 31.*

E-mail: ^aivanov@ikfia.ysn.ru, ^bm.i.pravdin@ikfia.ysn.ru

Статья поступила 17.12.2009, подписана в печать 15.01.2010

Излагаются современное состояние Якутской установки ШАЛ и перспективы, связанные с ее модернизацией, приводятся основные результаты по энергетическому спектру, составу и анизотропии космических лучей сверхвысоких энергий, полученные на установке за последнее время.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, энергетический спектр, анизотропия, массовый состав.

УДК: 524.1. PACS: 96.50.S-, 96.50.Sb, 96.50.Sd.

Введение

Вторая половина прошлого века ознаменовалась активными исследованиями космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий. Эти исследования базировались на экспериментальных данных, полученных на установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) большой светосилы: SUGAR в Австралии [1]; Havera Park в Англии [2]; Akemo-20, впоследствии AGASA в Японии [3, 4]; Fly's Eye, впоследствии HiRes в США [5, 6] и Якутская установка ШАЛ [7, 8] в СССР.

Создание в Якутске по инициативе председателя проблемного Совета АН СССР «Космические лучи» С. Н. Вернова в начале 1970-х гг. гигантской по тем временам установки для регистрации ШАЛ послужило в бывшем Советском Союзе началом исследований КЛ в области предельно высоких энергий, 10^{17} – 10^{20} эВ. Подготовку соответствующего проекта и его реализацию доверили только что созданному в Якутске Институту космофизических исследований и аэрономии (ИКФИА) Якутского филиала СО РАН. На всех этапах работ по созданию Якутской установки ШАЛ, включая работы по проектированию, большую помощь ИКФИА оказали специалисты Научно-исследовательского института ядерной физики при МГУ под руководством Г. Б. Христиансена и Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР под руководством С. И. Никольского.

Следует отметить, что многолетний опыт работы Якутской установки и полученные на ней важнейшие научные результаты наряду с зарубежными коллективами стимулировали скорейшее создание установок ШАЛ нового поколения еще большей светосилы. В последние годы реализованы международные проекты по созданию установок с площадью контроля тысячи и десятки тысяч km^2 : Pierre Auger Observatory (PAO) в Аргентине [9] и Telescope Array в США [10]. Эти установки нацелены на исследование КЛ с предельно высокой энергией, выше 10^{19} эВ.

1. Якутская комплексная установка ШАЛ

Якутская установка ШАЛ расположена в долине реки Лены в 55 км южнее г. Якутска (61.7° с.ш.,

129.4° в.д., 110 м над уровнем моря, толщина атмосферы — 1020 g/cm^2). Строительство установки, ее поэтапный ввод в действие были начаты в 1966 г. Прототип из 13 станций (пункт наблюдений), расположенный в круге с радиусом 1 км, был запущен в декабре 1970 г. В дальнейшем эти станции составили центральное ядро, вокруг которого шло расширение установки.

1.1. Современный статус установки

Якутская установка ШАЛ состоит из 60 отдельных станций с детекторами, которые расположены на общей площади около 12 km^2 , и центрального регистратора (ЦР). Кроме того, имеется несколько дополнительных экспериментальных пунктов. На рис. 1, а показан общий план расположения детекторов установки, а на рис. 1, б приведен план центральной части.

На стандартной станции установлены два сцинтиляционных детектора площадью 2 m^2 каждый и детектор черенковского излучения. Во всех детекторах используются ФЭУ-49 или аналоги, близкие по своим параметрам. Все станции связаны с центральным регистратором (ЦР) с помощью коаксиальных кабелей. При одновременном срабатывании обоих детекторов станции сигнал об этом передается в ЦР. События отбираются в ЦР при одновременном срабатывании трех станций, образующих треугольник. При отборе ливня информация из буферной памяти станции по команде передается в центр. Временная синхронизация детекторов на станциях осуществляется с помощью радиоканала с точностью 100 нс.

На большей части установки (около 8 km^2) расстояние между соседними станциями равно 500 м, и 63 таких треугольника составляют триггер-500 Якутской установки. Такой триггер отбирает ливни от первичных частиц с энергией выше $5 \cdot 10^{16}$ эВ. 19 станций по всей площади установки образуют аналогичную сетку треугольников со стороной 1000 м, и они формируют независимый триггер-1000 с пороговой энергией около 10^{18} эВ.

Для измерения в ливнях потока мюонов с пороговой энергией 1 ГэВ работают пять подземных пунктов, размещенных в центральном круге радиусом 1 км. В них

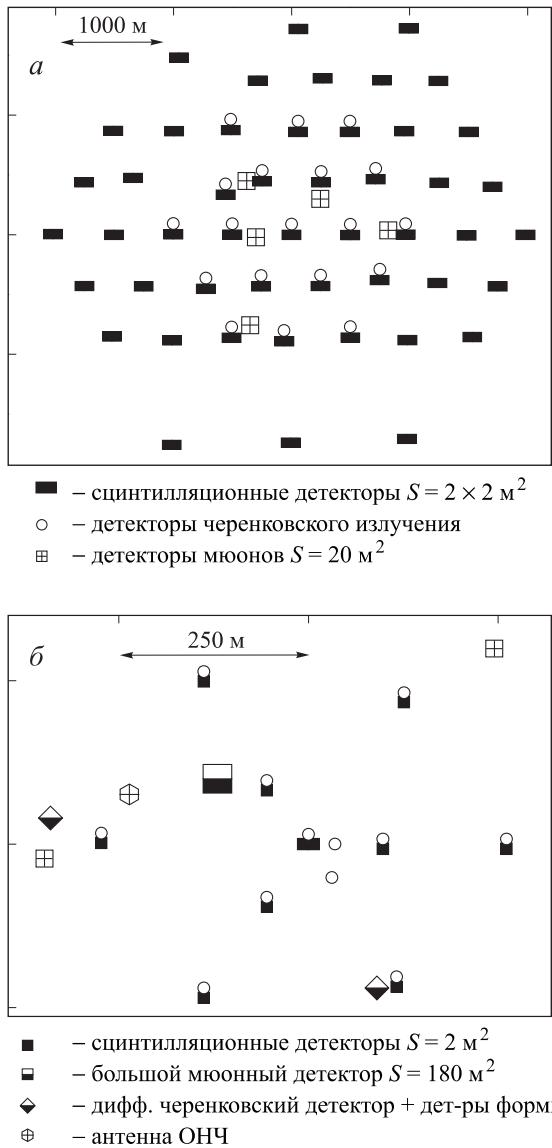


Рис. 1. Общий план расположения детекторов (а) и подробный план центральной части (б) Якутской установки ШАЛ

установлены стандартные сцинтилляционные счетчики. Общая площадь детекторов в каждом таком пункте 20 м^2 . Кроме того, имеется большой мюонный детектор (БМД) с площадью 180 м^2 . В нем установлено 90 стандартных двухметровых сцинтилляционных счетчиков. Пороговая энергия для мюонов 0.5 ГэВ. В БМД для каждого счетчика производится измерение амплитуды сигнала и времени срабатывания относительно синхронного импульса основной установки с точностью 5–7 нс.

В центральном круге радиусом 250 м в различных пунктах установлены еще десять сцинтилляционных счетчиков по 2 м^2 , которые не участвуют в отборе ливней, и 15 интегральных черенковских детекторов (рис. 1, б). Сигналы детекторов центрального круга как черенковских, так и сцинтилляционных параллельно основной программе поступают на специальный регистратор, который отбирает события меньших энергий (10^{15} – 10^{17} эВ) с помощью детекторов черенковского излучения. В последние годы в составе Якутской установки были задействованы два принципи-

ально новых детектора для регистрации черенковского излучения ШАЛ — дифференциальный черенковский детектор (ЧДД) на основе камеры обскура. ЧДД, в отличие от имеющихся на установке интегральных черенковских детекторов, позволяет производить практически прямые измерения продольного развития ШАЛ. В пунктах с ЧДД также проводятся измерения пространственно-временной структуры ШАЛ, используя быстрые черенковские детекторы и сцинтилляционные детекторы разной площади, размещенные как на поверхности земли, так и под слоем грунта в 2 м.

1.2. Дальнейшее развитие установки

С целью получения качественно новых результатов на Якутской установке ШАЛ в настоящее время проводятся работы по ее модернизации. Программа модернизации содержит следующие этапы:

- увеличение точности взаимной синхронизации всех детекторов до 10 нс вместо существующей точности 100 нс, что позволит значительно улучшить пространственную локализацию положения оси ливня и точность определения углов прихода первичной частицы, порождающей ШАЛ;
- замена существующей низкоскоростной, требующей периодического ремонта системы кабельных линий передачи данных на или беспроводную систему с высокой пропускной способностью, или на оптоволоконную систему связи для повышения эксплуатационных характеристик и надежности установки в целом;
- оснащение станций наблюдения современной электроникой для достижения их высокой интеллектуальности;
- повышение информативности установки путем ввода в эксплуатацию принципиально нового детектора — черенковского дифференциального детектора для прямых измерений продольного развития ШАЛ;
- модернизация подземных детекторов мюонной компоненты ШАЛ посредством замены электроники, счетчиков частиц и проведения капитального ремонта помещений;
- создание системы для регистрации радиоизлучения ШАЛ в диапазоне частот от десятков Гц до десятков МГц.

Улучшение точности определения угловых координат ливней позволит на новом качественном уровне проводить исследования по изучению мелкомасштабной анизотропии первичного излучения во всем диапазоне энергий, а также поиск точечных источников КЛ предельно высоких энергий по их избыточному потоку от астрофизических объектов. Кроме того, существенно повышается точность анализа зарегистрированных под большим зенитным углом событий ШАЛ, так как значительно уменьшается неопределенность толщины атмосферы, которую проходят такие ливни.

При полной модернизации электроники установки предполагается изменить организацию управления, отбора событий, хранения данных и связи станций наблюдения с центром на основе использования протоколов и технологий, применяемых в Интернете. Создаваемая система должна объединить уже работающие детекторы и станции наблюдения, а также иметь возможность достаточно просто включения и сбора данных от

новых детекторов и дополнительных экспериментов в процессе регистрации ливней.

2. Основные научные результаты

Полностью Якутская установка начала работать в 1973 г. и по настоящее время на ней поддерживается непрерывная регистрация ШАЛ. За этот период накоплен уникальный экспериментальный материал и совместными усилиями получены приоритетные научные результаты как о самом явлении ШАЛ, так и об астрофизических характеристиках КЛ сверхвысоких энергий.

2.1. Характеристики ШАЛ

Ожидаемая функция пространственного распределения (ФПР) частиц ливня зависит от модели развития ливневого каскада и состава КЛ. По данным наблюдений на Якутской установке в работе [11] были исследованы ФПР мюонов с порогом выше 1 ГэВ и всех заряженных частиц (электронов и мюонов) в ШАЛ с энергией выше 10^{17} эВ. Для аппроксимации экспериментальных данных в разных диапазонах энергий использовались функции с одним подгоночным параметром, характеризующим скорость спада плотности частиц с ростом расстояния от оси ливня (структурный параметр). На рис. 2 приведены полученные значения этих параметров для обеих компонент и представлены ожидаемые из расчета по модели QGSjet [12]. Видно существенное изменение поведения обеих компонент при $E \geq 3 \cdot 10^{18}$ эВ в сравнении с расчетными. Такое поведение ФПР, возможно, объясняется непредусмотренными в модели QGSjet изменениями в процессах образования и развития ШАЛ при этих энергиях и/или утяжелением состава космических лучей.

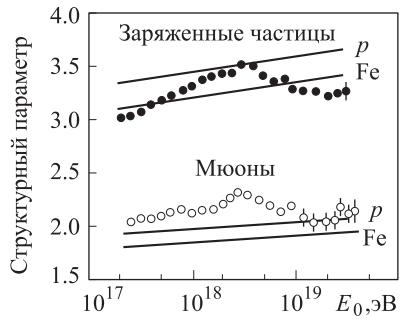


Рис. 2. Зависимость структурных параметров ФПР мюонов (светлые кружки) и всех заряженных частиц (темные кружки) в ливнях с зенитными углами $\langle \cos \theta \rangle = 0.95$ от энергии. Линии — расчет по модели QGSjet для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe) [12]

На рис. 3 приведена зависимость средней глубины максимума развития ШАЛ от энергии в области $10^{15} - 10^{19}$ эВ [13, 14, 15]. Глубина максимума X_m определялась из ФПР черенковского света, а именно из отношения потока плотностей черенковского света, измеренных на малых и больших расстояниях от оси ливня. На рисунке также приведены расчеты: штриховая и пунктирная линии — по модели QGSjet для протона (p) и ядра железа (Fe) соответственно [12],

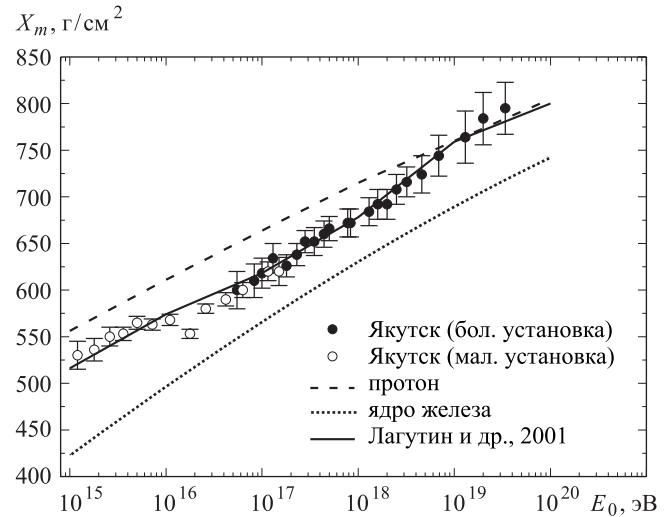


Рис. 3. Зависимость глубины максимума развития ШАЛ (X_m) от энергии КЛ

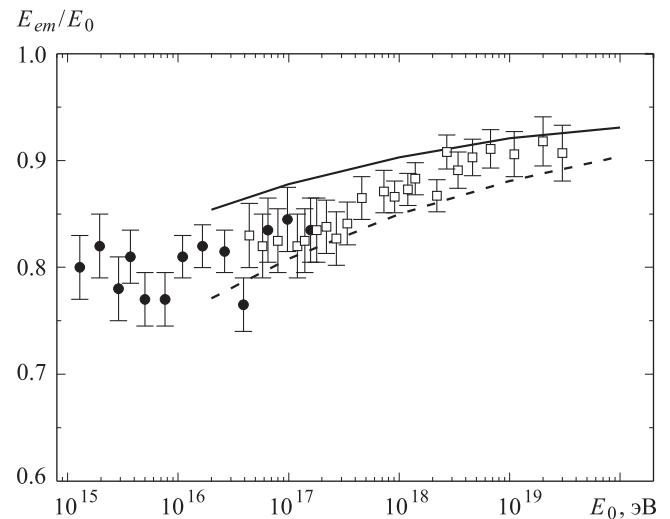


Рис. 4. Доля энергии, переданная в электромагнитную компоненту ШАЛ по данным Якутской установки. Кружки — данные малой черенковской установки [18, 19]. Квадраты — большой установки [18, 19]. Сплошная кривая — расчеты по модели QGSjet для первичного протона, пунктир — расчет для ядра железа [12]

а сплошная линия — по QGSjet модели для случая распространения КЛ в галактике по модели аномальной диффузии [16, 17]. Как видно, сплошная кривая довольно хорошо описывает экспериментальные данные. В рамках рассмотренных моделей можно заключить, что состав КЛ после «колена» в энергетическом спектре при $3 \cdot 10^{15}$ эВ становится тяжелее.

По данным регистрации черенковского света и заряженных частиц на Якутской установке оценена доля энергии E_{em}/E_0 , переданная в электронно-фотонную компоненту ШАЛ в области энергий $10^{15} - 10^{19}$ эВ. Результаты сравниваются с расчетами по модели QGSjet в случае разных первичных ядер. Как следует из рис. 4, характер изменения отношения E_{em}/E_0 с ростом энергии не противоречит модели QGSjet. Даный факт может служить в пользу выбора именно этой модели для дальнейшего анализа характеристик ШАЛ,

в том числе и для оценки энергии ливней на других компактных установках. Однако для более корректного использования результатов расчета необходимо учесть еще и массовый состав космических лучей.

2.2. Энергетический спектр КЛ

На основе измерений черенковского излучения ШАЛ малой черенковской установкой был определен спектр космических лучей в диапазоне энергий от 10^{15} до $3 \cdot 10^{17}$ эВ (рис. 5). Измерениями подтверждается сложная форма спектра, которая при ее аппроксимации степенным законом имеет излом типа «колено» при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Там же представлены данные некоторых компактных установок, измеряющих ШАЛ в интервале энергий $5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$ эВ. Данные практически всех установок подтверждают наличие излома в спектре при $(3-5) \cdot 10^{15}$ эВ и отмечают резкое изменение показателя наклона спектра сразу же за изломом. Согласно рис. 5, имеет место разброс в оценках интенсивности спектров между установками, что обусловлено, вероятно, использованием разных подходов и методик в определении энергии ШАЛ.

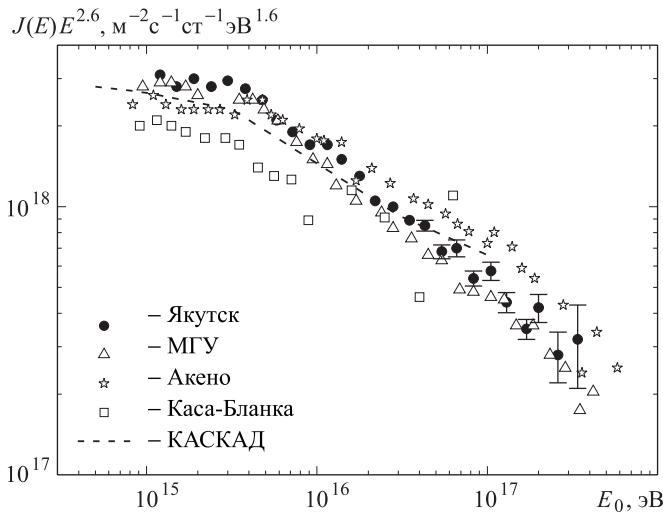


Рис. 5. Спектр КЛ в области энергий $10^{15} - 10^{18}$ эВ. Точки — Якутск [20], треугольники — МГУ [21], звездочки — Акено [22], квадраты — Каса-Бланка [23], пунктир — KASCADE [24]

На больших установках ШАЛ энергия первичной частицы E_0 оценивается по определяемому на эксперименте базовому параметру. Таким параметром для Якутской установки является плотность на расстоянии 600 м от оси — S_{600} . На установках, подобных Якутской, обычно находится соотношение между базовым параметром и первичной энергией E_0 на атмосферной глубине X_0 , соответствующей вертикальным ливням ($\theta = 0$). Для оценки E_0 в событиях с зенитными углами $\theta > 0$ найденное значение параметра пересчитывается на вертикальный уровень по зенитно-угловой зависимости.

На Якутской установке ШАЛ измеряются три основные компоненты: поток заряженных частиц, черенковское излучение и мюонная компонента. Это позволило использовать калориметрический метод оценки энергии и получить соотношение между S_{600} при $\theta = 0$ и E_0

[25, 26] на основе экспериментальных данных с минимальной зависимостью от модели развития. В основе этого метода лежит экспериментальная оценка энергии, рассеянной ливнем над уровнем наблюдения, по измерениям черенковского излучения ШАЛ. Доля рассеянной энергии превышает 70% от полной.

На рис. 6 представлены спектры при энергии выше 10^{17} эВ, полученные на разных установках. Показаны данные Якутской установки [27] AGASA [28], РАО [29] и HiRes [30]. Энергетические спектры, полученные на разных установках, хорошо согласуются по форме, но по интенсивности существенно отличаются друг от друга. По наиболее статистически обеспеченным данным РАО и HiRes спектр обрывается, что указывает на существование ГЗК-обрыва. Но на установке AGASA зарегистрировано 11 событий с энергией выше 10^{20} эВ ($\theta < 45^\circ$), что свидетельствует об отсутствии обрезания. В Якутске зарегистрировано 4 события эВ выше порога обрезания.

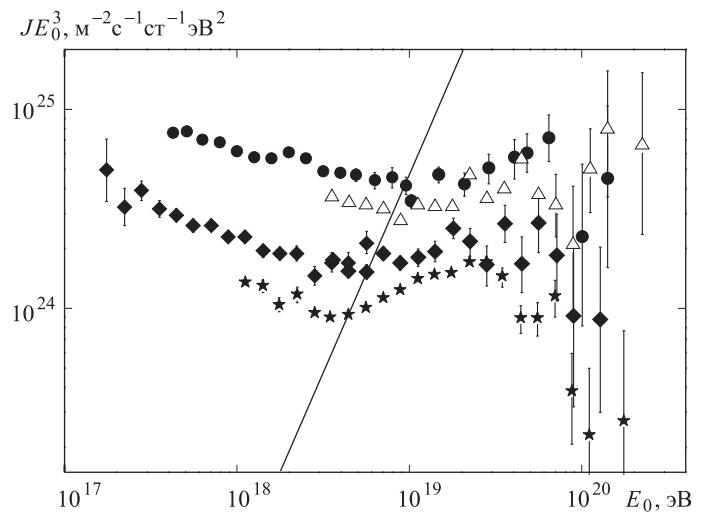


Рис. 6. Дифференциальный энергетический спектр по данным разных установок. Кружки — результаты Якутской установки, треугольники — AGASA [28], звездочки — Pierre Auger Observatory [29], ромбы — HiRes [30]

Из рис. 6 видно, что форма спектра имеет характерные особенности: провал («дип») и изгиб («бигр») и до 10^{20} эВ хорошо согласуется по всем данным. Наклонной линией на этом рисунке показано, как будет перемещаться точка на графике в используемых координатах, если менять оценку энергии. Видно, что положение провала для всех установок мало отклоняется от этой прямой. В работе [31] было получено, что интенсивности во всех экспериментах хорошо согласуются между собой во всем диапазоне энергий, исключая данные AGASA выше 10^{20} эВ, если изменить оценки энергии, умножив исходные значения на постоянный коэффициент K ($K(\text{Якутск}) = 0.75$, $K(\text{AGASA}) = 0.87$, $K(\text{HiRes}) = 1.2$, $K(\text{РАО}) = 1.5$). Чтобы согласовать интенсивность всех установок, только для РАО использовалась поправка, которая в два раза превышает заявленную систематическую неопределенность. Поправочные коэффициенты для остальных экспериментов взяты около одной систематической ошибки определения энергии в каждом из них.

2.3. Состав КЛ

На основе измерений, выполненных на Якутской установке ШАЛ, определен массовый состав космических лучей в области энергий $10^{15} - 10^{19}$ эВ. Впервые в рамках единого эксперимента установлено, что энергетическая зависимость среднего массового числа КЛ характеризуется наличием максимума в области энергии 10^{17} эВ [32]. Такое поведение согласуется с расчетами, которые предсказывают преобладающий вклад в наблюдаемый спектр КЛ в области $E < 10^{18}$ эВ частиц, ускоренных в остатках сверхновых [33].

На рис. 7 приведено среднее значение логарифма атомного числа КЛ в зависимости от их энергии. Для сравнения приведены данные компактных установок МГУ [34], Тунка [35] и KASCADE [36], которые согласуются с результатами Якутской установки. Кривые — результаты расчета на основе нелинейной кинетической теории ускорения космических лучей без их дополнительного ускорения в галактическом гало (сплошная кривая) и при наличии такого ускорения (пунктир). Результаты измерений на Якутской установке ШАЛ свидетельствуют в пользу существования значительного дополнительного ускорения космических лучей в гало Галактики.

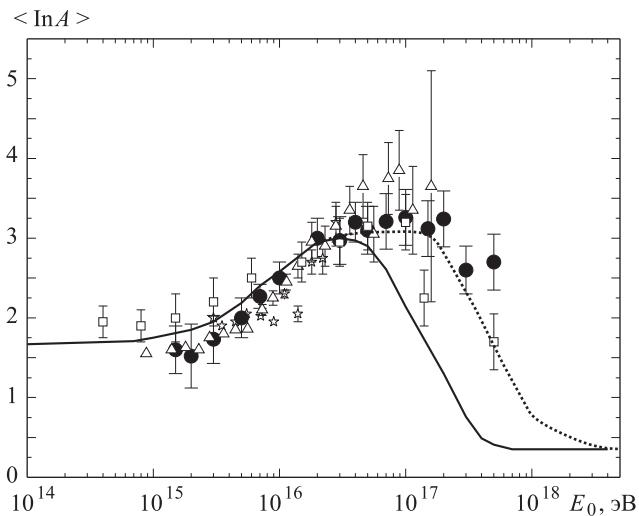


Рис. 7. Среднее значение логарифма атомного числа космических лучей в зависимости от их энергии. Квадраты — данные МГУ [34], звездочки — данные установки Тунка [35], треугольники — данные установки KASCADE [36], черные кружки — данные установки Якутск [32], кривые — расчеты Бережко [33]

Измерения потока мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ), порожденных частицами космических лучей с энергией $E > 10^{19}$ эВ, выполненные на Якутской установке ШАЛ, свидетельствуют о смешанном составе КЛ с долей протонов 0.5 ± 0.2 [37].

На основе анализа содержания мюонов в широких атмосферных ливнях, измеренного Якутской установкой ШАЛ, получен верхний предел доли фотонов N_γ/N_{CR} в составе КЛ в широком интервале энергий от 10^{18} до 10^{20} эВ (рис. 8, а). Определен также верхний предел интегрального потока фотонов F_γ в диапазоне $10^{18} - 10^{19}$ эВ (рис. 8, б) [38, 39, 40].

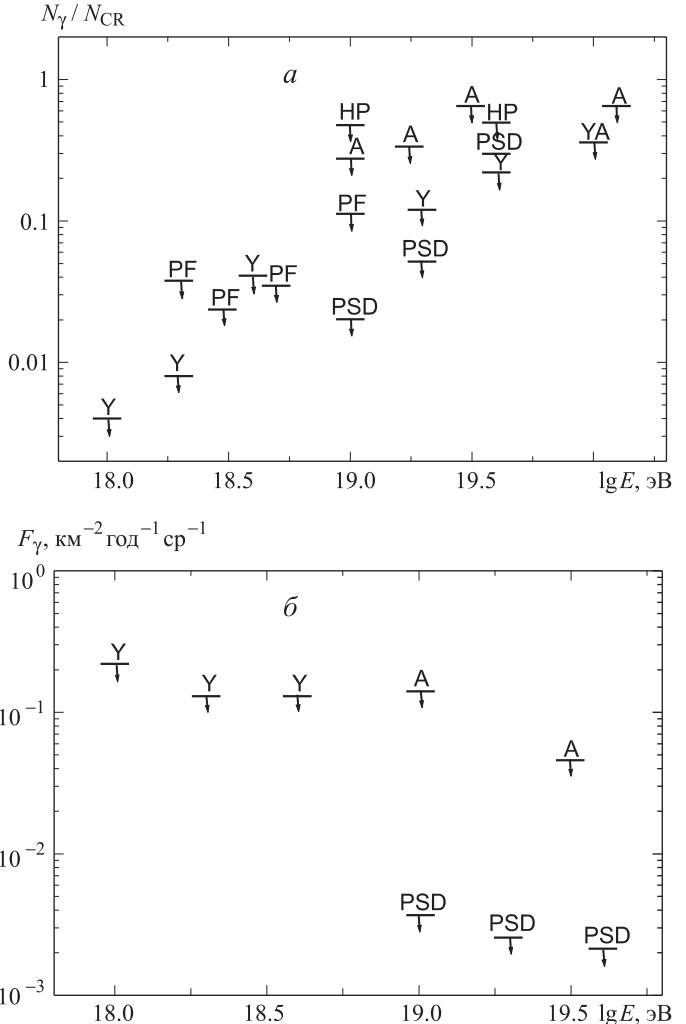


Рис. 8. Верхний предел (95%-ный уровень согласия) доли фотонов N_γ/N_{CR} (а) и интегрального потока F_γ (б) в зависимости от энергии. Y — наш результат, YA — по совместным данным Якутска и AGASA (Япония), A — установки AGASA (Япония) [41], PSD — обсерватории Пьера Оже (Аргентина) по данным наземных детекторов [42], PF — обсерватории Пьера Оже по флуоресцентным [43], HP — установка Haverah Park (Англия) [44]

2.4. Анизотропия КЛ

Равномерность приемной функции α установок ШАЛ по прямому восхождению в суточном цикле вращения Земли предопределила выбор гармонического разложения распределения интенсивности КЛ по α в качестве первого метода поиска анизотропии в распределении по углам прихода [45]. Однако имеются систематические эффекты, ограничивающие применимость метода к данным наблюдений. Первый из них связан с круто падающим энергетическим спектром КЛ, который приблизительно описывается степенной зависимостью с показателем -3 . Это приводит к систематическому росту с энергией амплитуд изотропного распределения из-за уменьшения числа детектируемых ШАЛ, что имитирует ожидаемый рост амплитуд гармоник галактических КЛ [46]. Второй эффект возникает из-за влияния неоднородности приемной функции

установки и вариации атмосферных условий на частоту событий ШАЛ, что существенно уменьшает наблюдаемые амплитуды для всех векторов анизотропии по звездному, антизвездному и солнечному времени, в области энергии $E < 10^{18}$ эВ. На основе данных Якутской установки ШАЛ было показано, что амплитуда первой гармоники по прямому восхождению в области 10^{17} эВ не превышает 0.6%, а амплитуда второй гармоники не превышает 0.65% с вероятностью 0.95. В области энергий 10^{18} эВ соответствующие оценки равны 2.7 и 2.9% [47].

В области $10^{18} < E < 4 \cdot 10^{19}$ эВ галактическая компонента КЛ должна проявлять две особенности в угловом распределении, которые могут быть использованы для ее обнаружения: поток частиц преимущественно из экваториальной области и северо-южная асимметрия распределения по галактической широте. Первая следует из того, что наблюдаемая плотность источников КЛ должна коррелировать с плотностью вещества в Галактике при энергии выше 10^{18} эВ, когда Ларморовский радиус становится больше размера рукавов, вдоль которых направлено регулярное магнитное поле Галактики. Вторая же асимметрия должна возникать в переходной области из-за эффекта, впервые предсказанного С. И. Сыроватским: искривление траекторий заряженных частиц в регулярном магнитном поле приводит к превышению потока частиц с южной полусфера над северной, приходящих из направления антицентра Галактики (для положительно заряженных частиц), если источники КЛ распределены равномерно в галактическом диске.

Анализ массива данных Якутской установки с привлечением имеющихся данных других установок ШАЛ с целью выяснения вклада галактической компоненты космических лучей сверхвысоких энергий в общий поток КЛ, выявил отклонение (рис. 9) параметра асимметрии ($R_{NSA} = (n_N - n_S)/(n_N + n_S)$, где n_N и n_S — число частиц, приходящих из северной и южной полусферы Галактики) от ожидаемого для изотропии потока в области энергии $5 \cdot 10^{18} < E < 2 \cdot 10^{19}$ эВ на уровне 3σ [48]. Обнаруженная северо-южная асимметрия в распределении КЛ по галактическим широтам в области энергий $E \sim 10^{19}$ эВ может быть объяснена примесью тяжелых ядер галактического происхождения в изотропном потоке внегалактических протонов.

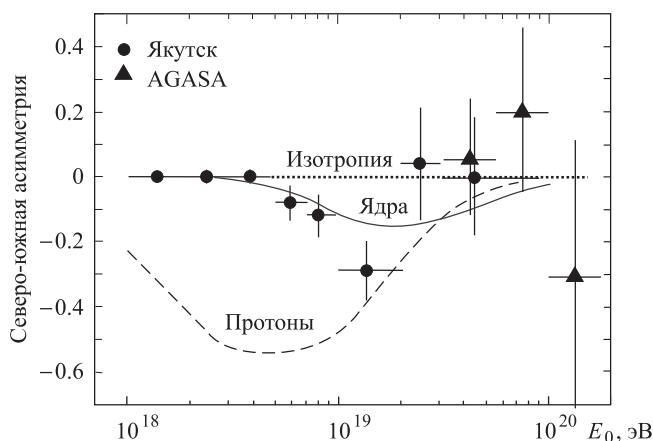


Рис. 9. Асимметрия потока КЛ, наблюданная в данных Якутской установки ШАЛ

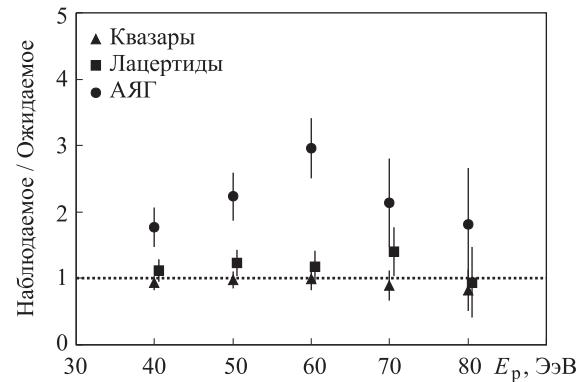


Рис. 10. Отношение наблюдаемого и ожидаемого в изотропном случае числа совпадений направлений прихода КЛ СВЭ с координатами внегалактических объектов в зависимости от пороговой энергии частиц (ЭэВ = 10^{18} эВ). Вертикальные черточки — статистические ошибки

Недавно коллаборация РАО заявила о значимой корреляции направлений прихода частиц с энергией выше 56 ЭэВ ($5.6 \cdot 10^{19}$ эВ), зарегистрированных в этом эксперименте, с активными ядрами галактик (АЯГ), находящимися на расстояниях меньше 75 Мпк [49]. Анализ данных Якутской установки ШАЛ показал [50], что направления прихода космических лучей с энергиями выше $6 \cdot 10^{19}$ эВ коррелируют с положением активных ядер галактик, находящимися на расстояниях меньше 65 Мпк (рис. 10). С учетом корреляции, обнаруженной РАО в южном полушарии, это указывает на то, что АЯГ являются основным источником космических лучей предельно высоких энергий.

Заключение

В результате модернизации Якутская установка ШАЛ увеличит свою светосилу, станет еще более информативной, существенно улучшится надежность, точность измерений. Таким образом, в проводимых на установке исследованиях появятся возможности для получения новых результатов, способствующих решению проблемы происхождения космических лучей сверхвысоких энергий. Дальнейший прогресс может быть обеспечен установлением переходной области между двумя компонентами КЛ — галактической и внегалактической.

По данным многих установок, в том числе и Якутской установки ШАЛ, в районе энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ спектр становится круче («колено»), а дальше с ростом энергии в промежутке $(5 \div 10) \cdot 10^{18}$ эВ принимает первоначальный вид («лодыжка»). Необходимо уточнить эти особенности энергетического спектра и объяснить их природу. Как свидетельствуют недавние теоретические исследования, наблюдаемые особенности спектра КЛ при энергиях выше 10^{17} эВ могут быть обусловлены переходом от галактической компоненты КЛ, которая предположительно порождается в остатках сверхновых звезд [51, 52], к внегалактической компоненте, а также эффектами распространения КЛ в межгалактическом пространстве [53]. По этой причине ожидается значительное изменение химического состава КЛ в области

энергий выше 10^{17} эВ, которое подлежит экспериментальной проверке. Для корректной оценки состава КЛ по измеряемым характеристикам ШАЛ нужна соответствующая теоретическая модель развития самого явления ШАЛ. Остается также актуальным максимально точное определение анизотропии КЛ, что может дать прямые указания на источники внегалактической компоненты КЛ.

Фактически в настоящее время Якутская установка ШАЛ является единственным прибором, которому доступен весь интервал энергий $10^{16} - 10^{19}$ эВ, где ожидается переход от галактической к внегалактической компоненте КЛ. Поэтому оценка массового состава, выполненная единой методикой во всем этом интервале, его сопоставление с измерениями компактных установок (например, KASCADE) на левом конце энергетического интервала, т. е. при $E \sim 10^{16}$ эВ, и с измерениями гигантских установок (например, PAO) — на правом ($E \sim 10^{19}$ эВ), позволит сделать обоснованное заключение о положении переходной области.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы РАН № 8.1 («Физика нейтрино и нейтринная астрофизика»), РФФИ (грант 09-02-12028 офи-м), ФАНИ (госконтракты № 02.518.11.7173 и № 02.740.11.0248) и СО РАН (интегр. проект «Модернизация Якутской установки ШАЛ»).

Список литературы

1. Bell C.J., Bray A.D., Denehy B.V. et al. // J. Phys. A. 1974. **7**. P. 990.
2. Lawrence M.A., Reid R.J.O., Watson A.A. // J. Phys. G. 1991. **17**. P. 733.
3. Teshima M., Ohoka H., Matsubara Y. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1986. **A247**. P. 399.
4. Chiba N., Hashimoto K., Hayashida N. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1992. **A311**. P. 338.
5. Baltrusaitis R.M., Cady R., Cassiday G.L. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1985. **A240**. P. 410.
6. Bird D.J., Corbato S.C., Dai H.Y. et al. // Astrophys. J. 1994. **424**. P. 491.
7. Вернов С.Н., Егоров Т.А., Ефимов Н.Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1965. **29**, № 9. С. 1690.
8. Egorov T.A., Efimov N.N., Kolosov V.A. et.al. // Proc. 12th ICRC. 1971, Hobart. **6**. P. 2059.
9. Abraham J., Aglietta M., Aguirre I.C. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2004. **A523**. P. 50.
10. Kasahara K., Kawai H., Yoshida S. et al. // Proc. 30th ICRC. Mexico, 2007. **4**. P. 417.
11. Глушков А.В., Правдин М.И. // ЖЭТФ. 2006. **103**. № 12. С. 963.
12. Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1997. **52**. P. 17.
13. Dyakonov M.N., Ivanov A.A., Knurenko S.P. et al. // Proc. 23th ICRC. Calgary, 1993. **4**; P. 303
14. Knurenko S., Kolosov V., Petrov Z. et al. // Proc. 27th ICRC. Hamburg, 2001. **1**. P. 177.
15. Knurenko S.P., Egorova V.P., Ivanov A.A. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2006. **151**. P. 92.
16. Lagutin A.A., Nikulin Y.A., Uchaikin V.V. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 2001. **97**. P. 267.
17. Lagutin A.A., Nikulin Y.A., Tyumentsev A.G. // Proc. 27th ICRC. Hamburg, 2001. **5**. P. 1896.
18. Кнуренко С.П., Иванов А.А., Слепцов И.Е., Сабуров А.В. // Письма в ЖЭТФ. 2006. **3**, № 11. С. 563.
19. Knurenko S.P., Egorova V.P., Ivanov A.A. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2006. **151**. P. 92.
20. Knurenko S., Kolosov V., Petrov Z. et al. // Proc. 27th ICRC. Hamburg, 2001. **1**. P. 157.
21. Вишневская Е.А., Калмыков В.Н., Калмыков Н.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. **66**, № 11. С. 1566.
22. Nagano M., Hara T., Nayashida N. et al. // J. Phys. G. 1984. **10**. P. 1295.
23. Fowler J.W., Fortson L.F., Jui C.C.H. et al. // Astropart. Phys. 2001. **15**. P. 49.
24. Kampert K.-H., Antoni T., Apel W.D. et al. // arXiv:astro-ph/0102266.
25. Glushkov A.V., Ivanov A.A., Kolosov V.A. et al. // Proc. 28th ICRC. Tsukuba, 2003. **1**. P. 393.
26. Иванов А.А., Кнуренко С.П., Слепцов И.Е. // ЖЭТФ. 2007. **131**, № 6. С. 1001.
27. Egorova V.P., Glushkov A.V., Knurenko S.P. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2004. **136C**. P. 3.
28. Takeda M., Hayashida N., Honda K. et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. **81**. P. 1163.
29. Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. **101**. P. 061101.
30. Abbasi R.U., Abu-Zayyad T., Amman J.F. at al // Preprint. 2005. astro-ph/0501317.
31. Правдин М.И., Глушков А.В., Дьячковский Н.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. **73**, № 5. С. 578.
32. Кнуренко С.П., Иванов А.А., Сабуров А.В. // Письма в ЖЭТФ. 2007. **86**, № 10. С. 709.
33. Berezhko E.G., Volk H.J. // Proc. 30th ICRC. Mexico, 2008. **2**. P. 109.
34. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Kylikov G.V. et al. // Proc. 31st ICRC. 2009, Lodz. **HE1.3**. P. 467.
35. Budnev N.M., Chvalaiev O.A., Gress O.A. et al. // Proc. 21st ECRS. Kosice, 2009. P. 427.
36. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. // Astropart. Phys. 2005. **24**. P. 1.
37. Глушков А.В., Макаров И.Т., Правдин М.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. **87**, № 4. С. 220.
38. Rubtsov G.I., Dedenko L.G., Fedorova G.F. et al. // Phys. Rev. D. 2006. **73**. P. 063009.
39. Glushkov A.V., Gorbunov D.S., Makarov I.T. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2007. **85**, № 3. С. 163.
40. Glushkov A.V., Gorbunov D.S., Makarov I.T. et al. // Proc. 31th ICRC. Lodz, 2009. **HE**. P. 558.
41. Shinozaki K., Chikawa M., Fukushima M. et al. // Astrophys. J. 2002. **571**. P. L117.
42. Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. (Pierre Auger Collaboration) // Astropart. Phys. 2008. **29**. P. 243.
43. Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. (Pierre Auger Collaboration) // 2009. arXiv:0903.1127 [astro-ph.HE].
44. Ave M., Hinton J.A., Vazquez R.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. **85**. P. 2244.
45. Krasilnikov D.D., Kuzmin A.I., Linsley J. et al. // J. Phys. A: Math. Nucl. Gen. 1974. **7**, № 18. P. 176.
46. Иванов А.А., Красильников А.Д., Никольский С.И. // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 1990. **6**. С. 30.
47. Правдин М.И., Иванов А.А., Красильников А.Д. и др. // ЖЭТФ. 2001. **119**, № 5. С. 881.
48. Ivanov A.A. // J. Phys. G. 1998. **24**. P. 227.
49. The Pierre Auger Collaboration // Science. 2007. **318**. P. 938.
50. Иванов А.А. // Письма в ЖЭТФ. 2008. **87**. С. 215.
51. Berezhko E.G., Volk H.J. // Astrophys. J. 2007. **661**. P. L175.
52. Berezhko E.G. // Astrophys. J. 2008. **684**. P. L69.
53. Berezinsky V., Gazizov A., Grigorieva S. // Phys. Rev. 2006. **D74**. P. 043005.

Main results of ultra-high energy cosmic ray investigation of the Yakutsk extensive air shower array**A. A. Ivanov^a, S. P. Knurenko, M. I. Pravdin^b, I. E. Sleptsov***Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Siberian Division of Russian Academy of Sciences, Yakutsk 677980, Russia.**E-mail:* ^aivanov@ikfia.ysn.ru, ^bm.i.pravdin@ikfia.ysn.ru.

A present status and modernization perspectives of the Yakutsk extensive air shower (EAS) array are given. The main results of recent investigations here are described aimed at the energy spectrum, mass composition and arrival directions of ultra-high energy cosmic rays (UHECRs).

Keywords: cosmic rays, extensive air shower (EAS), energy spectrum, mass composition, arrival directions, anisotropy.

PACS: 96.50.S-, 96.50.Sb, 96.50.Sd.

Received 17 Dezember 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

Сведения об авторах

1. Иванов Анатолий Александрович — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр.; тел.: (4112) 39-04-51, e-mail: ivanov@ikfia.ysn.ru.
2. Кнуренко Станислав Петрович — канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотр.; тел.: (4112) 39-04-65, e-mail: s.p.knurenko@ikfia.ysn.ru.
3. Правдин Михаил Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр.; тел.: (4112) 39-04-56, e-mail: m.i.pravdin@ikfia.ysn.ru.
4. Слепцов Иван Ефимович — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, тел.: (4112) 39-04-59, e-mail: i.ye.sleptsov@ikfia.ysn.ru.