ОБЗОР АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Исследования области перехода от галактических к внегалактическим космическим лучам на установках для регистрации широких атмосферных ливней

Н. М. Буднев¹, А. Л. Иванова^{1,*a*}, Н. Н. Калмыков²

¹ НИИ прикладной физики, Иркутский государственный университет. Россия, 664003, Иркутск, бульв. Гагарина, д. 20. ² НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: ^a annaiv.86@mail.ru

Статья поступила 03.11.2016, подписана в печать 15.11.2016.

В статье рассмотрены результаты изучения энергетического спектра и состава первичных космических лучей методом регистрации широких атмосферных ливней. Приводится обзор наземных установок, ведущих такие исследования, и краткое описание методик восстановления характеристик первичных частиц по экспериментальным данным. Особое внимание уделено энергетическому диапазону 10¹⁶–10¹⁸ эВ, в котором ожидается смена галактических космических лучей на внегалактические. Отдельно рассмотрен комплекс установок, созданный в Тункинской долине специально для изучения этого диапазона.

Ключевые слова: ПКЛ, КЛ, ШАЛ, гигантские установки, гамма-обсерватория TAIGA. УДК: 524.1. PACS: 96.50.sd, 96.50.sb.

Введение

Исследование энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей (ПКЛ) с энергией выше 10¹⁴ эВ в связи с малой интенсивностью космического излучения сверхвысоких энергий (50 частиц на 1 м² в год при энергии > 10¹⁵ эВ и менее одной частицы на 1 м² в год при энергии >10¹⁶ эВ) до сих пор возможно только с помощью косвенных методов регистрации, хотя в отдельных случаях прямые измерения достигли энергий, превышающих 10¹⁵ эВ [1]. Но, если не обсуждать исключения, наиболее распространенным является метод измерения различных компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ), генерируемых ПКЛ в атмосфере Земли. Для изучения ПКЛ методом ШАЛ используются наземные установки большой площади, регистрирующие различные компоненты ШАЛ с помощью системы синхронно работающих детекторов. Установки ШАЛ можно разделить на две основные группы: гигантские установки, исследующие ПКЛ ультравысоких энергий, и установки, ведущие исследования в «переходной» области энергетического спектра КЛ 10¹⁶-10¹⁸ эВ. Учитывая развитие прямых экспериментов, следует ожидать, что в ближайшие несколько лет нижняя граница области энергий, в которой такие эксперименты возможны, существенно возрастет, в связи с чем в настоящее работе мы не обсуждаем установок, нацеленных на изучение ШАЛ с энергиями ниже 10¹⁶ эВ.

К гигантским экспериментальным установкам можно отнести установки, имеющие площадь не менее 10 км² и исследующие космическое излучение в области энергий выше 10¹⁸ эВ. Из экономических соображений в больших установках приходится располагать детекторы на большом (~1 км и более) расстоянии друг от друга. Основная часть потока частиц ШАЛ в таком случае проходит вдали от детекторов, и восстановление характеристик первичной частицы и положения оси ливня зависит от предположений о функции пространственного распределения (ФПР) — зависимости плотности частиц от расстояния до оси ШАЛ. Из условия накопления за разумное время достаточной статистики площадь установки, регистрирующей ШАЛ с энергией 10^{19} эВ и выше, должна быть ~ 10 км² и более.

Исследование ПКЛ в «переходном» диапазоне энергий имеет существенное значение для понимания происхождения и распространения космического излучения в нашей Галактике. Именно в этой области энергетического спектра предполагается переход от галактических ПКЛ к внегалактическим [2]. На сегодняшний день осуществлено немало попыток интерпретации того, как происходит такой переход, но ни одна из них не может считаться окончательной. В рассматриваемых до 2000 г. (условно) моделях ускорения частиц космических лучей ударными волнами в расширяющихся оболочках сверхновых максимальная энергия ускоряемых частиц не достигала излома и тем более переходной области [3]. Поэтому в те годы особенности энергетического спектра ПКЛ в области, включающей излом, было более естественно объяснять разной утечкой частиц при различных первичных энергиях [4]. Сейчас оценки максимальной энергии ускоренных частиц существенно возросли и можно считать, что галактические ПКЛ преобладают над внегалактическими до энергий 10¹⁷-10¹⁸ эВ [5]. Чтобы окончательно удостовериться в этом заключении, абсолютно необходимо получить точные сведения о поведении энергетического спектра и массового состава космических лучей в этом диапазоне энергий. Для регистрации ШАЛ, вызванных ПКЛ с энергией 10¹⁶-10¹⁸ эВ, требуются установки площадью не менее 1 км² и расстоянием между детекторами ~ 100 м. Такое условие на геометрические размеры эксперимента обусловлено тем, что «плотные» установки ШАЛ небольшой площади (~ 0.1 км 2) при малых расстояниях между детекторными пунктами не имеют возможности набора достаточной статистики для исследования ПКЛ в области энергий 10¹⁶-10¹⁸ эВ из-за низкого потока космического излучения в этом диапазоне, а установки большой площади, такие, как гигантская установка Auger в Аргентине [6, 7], ТА (США) [8], имеют слишком большие расстояния между детекторами, чтобы регистрировать с достаточной точностью сравнительно небольшие по размеру атмосферные ливни, образованные первичными частицами с энергиями $10^{16} - 10^{18}$ \Rightarrow B.

В статье приводится краткий обзор экспериментов по исследованию ПКЛ методом ШАЛ в области энергий 10¹⁶–10¹⁸ эВ и основных результатов их работы. При этом уделено внимание и данным гигантских установок, предназначенных для исследования ПКЛ с энергиями выше 10¹⁸ эВ. В отдельную часть выделено описание строящейся в Тункинской долине гамма-обсерватории TAIGA, предназначенной для исследования ПКЛ методом ШАЛ в энергетическом диапазоне 10¹⁴–10¹⁹ эВ.

1. Гигантские установки ШАЛ

Первые гигантские шаловские установки, позволяющие вести исследования ПКЛ в области сверхвысоких энергий, начали создаваться с 1959 г. Основная цель их состояла в проведении экспериментов в области предельно высоких энергий, и обзор достигнутых в этом направлении результатов можно найти, например, в [9]. В настоящей работе нас в большей степени интересует ситуация при относительно малых для этих установок энергиях, непосредственно примыкающих к 1018 эВ. Одними из первых были такие установки, как установка Volcano Ranch (Нью-Мексико, США), английская установка ШАЛ (Haverah Park) и австралийская установка ШАЛ SUGAR (Narrabri), AKENO и ее продолжение Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) в Японии, якутская комплексная установка ШАЛ (Россия).

Американская установка ШАЛ Volcano Ranch [10, 11] располагалась на высоте 1800 м над уровнем моря. Данная установка регистрировала заряженную компоненту ШАЛ и имела площадь регистрации около 12 км². Именно здесь в 1961 г. был впервые зарегистрирован ШАЛ с энергией $E \ge 6 \cdot 10^{18}$ эВ, а в 1963 г. гигантский атмосферный ливень, вызванный частицей с энергией порядка 10²⁰ эВ. Сам факт существования ливней с такими большими энергиями, подтвержденный впоследствии другими экспериментами, важен для астрофизики космических лучей. Период работы установки — с 1959 по 1963 гг.

Комплексная установка ШАЛ Haverah Park университетов Лидс, Ноттингем, Лондон, Дарем (Англия) [12] регистрировала черенковский свет, возникающий в водных баках при прохождении через них частиц ШАЛ. Диапазон энергий регистрируемых ШАЛ от 10¹⁶ до 10²⁰ эВ [12, 13]. Площадь всей комплексной установки, на которой были размещены 580 водных черенковских детекторов, составляла 15 км². Период работы установки — 1968–1987 гг. В течение этого времени на установке были зарегистрированы 4 гигантских атмосферных ливня, вызванных частицами с энергией выше 10²⁰ эВ. Однако позднее эти результаты были частично пересмотрены и оценки энергии несколько понизились.

Установка ШАЛ Сиднейского университета (Австралия) SUGAR (Sydney University Giant Air Shower Recorder) [14] работала в период с 1968 по 1979 гг. и регистрировала на уровне моря проникающую мюонную компоненту ШАЛ. Общая регистрирующая площадь этой установки составляла около 55 км². В ее состав входило 408 жидких сцинтилляционных детекторов с площадью каждого 6 м². Благодаря своим размерам установка позволяла вести регистрацию ШАЛ, сгенерированных первичными частицами с энергией от 10¹⁶ до 10²¹ эВ. Энергия первичных частиц на установке SUGAR оценивалась по полному числу мюонов с порогом $E_{\mu} = 0.75 \cdot \sec \vartheta$ ГэВ, где ϑ — зенитный угол прихода ШАЛ. Энергетический спектр, восстановленный по данным SUGAR, представлен на рис. 1, а, б.

В 1990 г. в районе Акено (Япония) была запущена гигантская установка AGASA (Akeno Giant Air Shower Array), позволяющая исследовать ПКЛ с энергией от 10^{17} до 10^{20} эВ [15, 16]. Новая установка состояла из 111 наземных сцинтилляционных детекторов (площадью 2.2 м² каждый) и 27 мюонных детекторов. Площадь эффективной регистрации установки составляла около 100 км². За четырнадцатилетний период работы (1990–2004 гг.) на установке было зарегистрировано около 1000 событий с энергией более 10^{19} эВ, в том числе 11 событий с энергией более 10^{20} эВ. Результаты AGASA были использованы для анализа энергетического спектра и анизотропии космических лучей [16]. Полученные



Рис. 1. а — Дифференциальные энергетические спектры, полученные на установках AGASA (белые треугольники), HiRes (ромбики), Haverah Park (крестики), Auger (звездочки), SUGAR (белые кружки), ЯкуШАЛ (черные кружки); δ — те же спектры, только после изменения их энергии в K = 0.85; 1.02; 0.9; 1.19; 1.29; 0.75 раз соответственно. Показатель спектра для интервалов $(1-8) \cdot 10^{18}$ и $(8-50) \cdot 10^{18}$ эВ равен соответственно 3.2 и 2.68 [20]

данные позволили подтвердить существование космических лучей с энергией более 5 · 10¹⁹ эВ.

Экспериментальная установка Fly's Eye (штат Юта, США) [17] работала в период с 1981 по 1993 гг. и регистрировала флуоресцентное излучение, возникающее в результате развития ШАЛ. В 1981-1986 гг. установка состояла из объединенных в один детектор 67 оптических модулей. В состав каждого модуля входило параболическое зеркало диаметром 1.5 м. В 1987 г. вступил в работу второй детектор установки, расположенный на расстоянии 3.4 км от первого и состоящий из 36 аналогичных модулей. Эффективная площадь регистрации ШАЛ с энергией $E_0 > 5 \cdot 10^{19}$ эВ, определяющаяся площадью светосбора в той области атмосферы, откуда приходит наибольшее количество флуоресцентного света, достигла 1000 км³. Именно на установке Fly's Eye было зарегистрировано событие ШАЛ с самой высокой измеренной энергией 3,2·10²⁰ эВ (1991 г.).

High Resolution Fly's Eye (HiRes) [18] (1997– 2006 гг.) стал преемником проекта Fly's Eye.

Как и Fly's Eye, установка HiRes располагалась в западной пустыне штата Юта, США, и представляла собой эксперимент по изучению космических лучей сверхвысоких энергий методом регистрации флуоресцентного излучения, вызываемого ШАЛ. В своей итоговой конфигурации она состояла из 63 детекторов флуоресцентного излучения, объединенных в два независимых кольца. В первое кольцо входило 21 зеркало диаметром 3 м, во второе — 42 зеркала. В первом кольце зеркала были ориентированы так, чтобы просматривать небо в диапазоне от 3 до 16° по вертикали во всем диапазоне азимутальных углов. Во втором кольце — так, чтобы просматривать небо в диапазоне углов от 3 до 31° по вертикали при условии полного азимутального покрытия. Группы детекторов располагались на вершинах двух холмов на расстоянии 12.6 км друг от друга. В безлунную ночь область наблюдения обоих колец охватывала территорию общей площадью около 3000 км². В течение года работы на установке HiRes было зарегистрировано не менее 300 событий с энергией выше 10¹⁹ эВ. Установка HiRes стала первым экспериментом, результаты работы которого указали на наличие эффекта Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК) — обрезания в спектре ПКЛ. Данные AGASA не подтверждали существования реликтового обрезания [19].

Все перечисленные выше установки на сегодня прекратили свое существование. Часть из них была использована при создании более мощных установок нового поколения.

На рис. 1, a, δ [20] представлены дифференциальные энергетические спектры установок AGASA, HiRes, Haverah Park, Auger, SUGAR и ЯкуШАЛ, описание которой приводится ниже. Рис. 1 (особенно 1, δ) наглядно демонстрирует изменение показателя энергетического спектра, свидетельствующее о появлении ПКЛ другого происхождения по сравнению областью энергий до 10¹⁷ эВ.

К действующим гигантским установкам относятся установка Pierre Auger Observatory (Auger) [21, 22] в Аргентине, Telescope Array (ТА) в США [23] и якутская установка ЯкуШАЛ [24] (Россия).

Крупнейшая в мире установка Auger [25, 26] находится в Аргентине и предназначена для изучения ПКЛ с $E > 10^{18}$ эВ. Ее строительство было завершено в 2008 г. Обсерватория состоит из 27 детекторов флуоресцентного излучения (FD-детекторов), подобных детекторам установки HiRes [18], и 1660 водных черенковских детекторов (SD-детекторов), аналогичных детекторам эксперимента Haverah Park [12], распределенных равномерно на площади в 3000 км². Объем каждого резервуара с водой составляет 12000 л, расстояние между соседними водными детекторами — 1.5 км.

Для оценки энергии первичных частиц в эксперименте Auger применяется параметр *s*₃₈(1000) — плотность энерговыделения в водном черенковском

детекторе на расстоянии 1 км от оси ШАЛ с зенитным углом θ , равным 38° [27]. Энергия первичной частицы связана с параметром $s_{38}(1000)$ соотношением типа [27, 28]

$$E = a \cdot [S_{38}(1000)]^{b}.$$

В случае если события ШАЛ были зарегистрированы только водными черенковскими детекторами, значения коэффициентов в формуле находятся из результатов анализа искусственных ливней, смоделированных методом Монте-Карло в программе CORSIKA [29].

Альтернативный метод восстановления основан на перекрестной калибровке черенковских детекторов и детекторов флуоресцентного излучения [27, 28]. Для этого отбираются события ШАЛ, зарегистрированные детекторами обоих видов [30]. Коэффициенты а и b в указанной выше формуле находятся путем подстановки восстановленной по данным FD-детекторов энергии E_{FD} и определенного по данным SD-детекторов параметра $s_{38}(1000)$ [28]. Так как энергия первичной частицы *E*_{FD}, реконструированная по показаниям флуоресцентных детекторов, практически модельно-независима, то ее применяют для нормировки при восстановлении энергии по данным SD-детекторов. Зависимость энергии первичной частицы E_{FD} от плотности энерговыделения на расстоянии 1000 м от оси ШАЛ используется при обработке всего набора событий ШАЛ, зарегистрированных черенковскими водными детекторами [30]. Систематическое различие между энергией, восстановленной первым способом (по данным SD-детекторов), и *E*_{FD} составляет 22% [27, 28].

Установка Telescope Array (TA) [6, 23] предназначена для детектирования ШАЛ, сгенерированных космическими лучами предельно высоких энергий $(E > 10^{18} \text{ эВ})$. Как и установка Auger, ТА использует две методики измерения ПКЛ сверхвысоких энергий: регистрацию заряженной компоненты ШАЛ и регистрацию флуоресцентного излучения. ТА [31] состоит из детекторов флуоресценции, объединенных в три станции, расположенные в вершинах равностороннего треугольника с длиной стороны 30 км, и более чем 500 сцинтилляционных детекторов площадью 3 м² каждый, распределенных в узлах вписанной в треугольник квадратной решетки площадью около 680 км². Строительство нового комплекса было начато на территории штата Юта в 2003 г., а в 2007 г. на ТА был произведен первый набор данных. Восстановление энергии первичной частицы по данным сцинтилляционных детекторов происходит по формуле связи между энергией первичной частицы и измеренной в эксперименте плотностью заряженных частиц на расстоянии 800 м от оси ШАЛ S(800) [32]. Поскольку соотношение между параметром S (800) и первичной энергией получено из анализа результатов моделирования методом Монте-Карло, то данный способ восстановления энергии первичной частицы является модельно зависимым.

С другой стороны, энергия первичной частицы на ТА оценивается калориметрическим методом по данным детекторов флуоресценции. При этом также используются результаты моделирования методом Монте-Карло. Энергетический спектр, восстановленный по данным детекторов флуоресценции, по сравнению с энергетическим спектром, восстановленным по данным сцинтилляционных детекторов, имеет большую статистику при меньших энергиях и невысокую статистику при сверхвысоких энергиях. Поэтому данные спектры сложно сравнивать при энергиях ГЗК-обрезания, однако их поведение в районе энергий 5–60 ЭэВ согласуется достаточно хорошо [32].

В настоящее время проведена модернизация установки Telescope Array для расширения энергетического диапазона регистрации в сторону низких энергий [8]. Предполагалось, что TALE (Telescope Array Low Energy extension) будет вести регистрацию ШАЛ начиная с энергии $3 \cdot 10^{16}$ эВ. Первые 3 мес работы TALE (с июня 2014 г.) показали, что установка ведет регистрацию событий начиная с 10^{16} эВ. Энергетический спектр, полученный по ее данным, находится в хорошем согласии с данными черенковской установки Тунка-133 (см. рис. 2). Сегодня расширение TALE обеспечивает чувствительность к ПКЛ начиная с энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ [33].

Действующая на территории России якутская комплексная установка ШАЛ [24, 35] была создана в 1973 г. в селе Октемцы (55 км от Якутска) и работает до сих пор. ЯкуШАЛ регистрирует ПКЛ с энергиями 10¹⁷–10²⁰ эВ. Контролируемая площадь (светосила установки) 12 км² (18 км² до 1990 г.).

Установка обеспечивает получение комплексной информации по нескольким компонентам ШАЛ: электронам, мюонам, потоку черенковского света и радиоизлучению от ливня (эпизодически).

В настоящее время она насчитывает 59 наземных станций наблюдения и 6 подземных мюонных детекторов (5 мюонных детекторов общей площадью 20 м² каждый и большой мюонный детектор общей площадью 180 м²). Также на расстоянии 0.5 км от центра находятся 3 дифференциальных черенковских детектора (камеры обскура) для исследования продольного развития ливня.

В каждой наземной станции установлен сцинтилляционный детектор на основе пластических сцинтилляторов толщиной 5 см и площадью 2 м² (двух в случае основных наземных станций, одного в случае дополнительных станций) [36]. Кроме того, большинство станций оснащены оптическим приемником излучения Вавилова–Черенкова. 19 черенковских детекторов находятся в круге радиусом 1 км и 17 дополнительных черенковских детекторов установлены в центральной части установки в пределах 250 м от ее центра. Наземные станции размещены



Рис. 2. Экспериментальный дифференциальный энергетический спектр [34]

в узлах треугольной решетки со стороной 500 м. 10 дополнительных станций на основе одного сцинтиллятора размещены в центральной части установки в пределах круга радиусом 250 м [35].

Поскольку для надежной регистрации черенковского светя пригодны только ясные безлунные ночи, то для анализа состояния и параметров атмосферы в составе установки имеется мощный лазер — лидар [36].

Процедура реконструкции энергетического спектра ПКЛ на якутской установке основана на корреляции энергии первичной частицы и получаемой из эксперимента величины сигнала в детекторе на расстоянии 600 м от оси ШАЛ (классификационный параметр $S_{600}(0^{\circ})$) для вертикального ливня. Зарегистрированная в эксперименте величина $S_{600}(\theta)$ в ШАЛ, пришедшем под углом θ , пересчитывается в величину $S_{600}(0^{\circ})$, при этом используются зенитно-угловые зависимости для этого параметра:

$$S_{600}(0^\circ) = S_{600}(\theta) \cdot \exp(\Delta x/\lambda), \quad \Delta x = x_0 \cdot (\sec \theta - 1),$$

где $x_0 = 1020$ г/см² — глубина уровня наблюдения, λ — среднее значение пробега поглощения, определяемое с помощью метода сечения спектров сигналов линиями равной интенсивности [37] (полученное из модельных расчетов значение $\lambda = 530 \pm 60$ г/см², экспериментальная оценка $\lambda = 500 \pm 40$ г/см² [38]). Значения $S_{600}(\theta)$ на якутской установке определяются корректно на расстоянии до 1000 м от оси ШАЛ, на больших же расстояниях происходит их недооценка [39].

Для оценки энергии E_0 по величине $S_{600}(0^\circ)$ используется следующее соотношение:

$$E_0 = a \cdot [S_{600}(0^\circ)]^{o}$$
.

Значения коэффициентов для вертикальных ливней составляют $a = 4.8 \cdot 10^{17}$, $b \approx 1$ [38].

Неоспоримое достоинство стандартного метода восстановления событий ШАЛ заключается в том, что все его этапы основаны на экспериментальных данных. Однако на якутской установке разрабатываются и иные методы оценки энергии, дающие возможность учитывать индивидуальное развитие каждого ливня от разных первичных частиц в области предельно высоких энергий [38].

На сегодня в мире зарегистрировано уже более двух десятков ливней с $E > 10^{20}$ эВ. Однако, несмотря на большое внимание, уделяемое проблемам ПКЛ предельно высоких энергий, и на то, что прошло уже несколько десятилетий эксплуатации установок большой площади, окончательного ответа на вопрос о поведении энергетического спектра в данном диапазоне пока нет. Согласно данным установки AGASA [16], энергетический спектр космических лучей становится более пологим при $E > 10^{19}$ эВ и продолжается за энергией

 10^{20} эВ. Это подтверждают и данные эксперимента Volcano Ranch [10, 11], согласно которым при энергиях $E > 10^{18}$ эВ показатель энергетического спектра ПКЛ уменьшается до своего значения при $E < 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Полученный на установках Haverah Park [12, 13] и Fly's Eye [17] энергетический спектр ПКЛ в области $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ не противоречит наличию обрезания из-за реликтового излучения. Последние данные установок HIRes [18], ТА [40] и обсерватории Auger [41] также говорят о наличии резкого ослабления потока КЛ в области $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ. На установке ЯкуШАЛ статистических данных недостаточно, чтобы сделать определенное заключение об обрыве или продолжении энергетического спектра ПКЛ при $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ [42].

Для целей настоящей работы, однако, более существенно, что результаты работы всех перечисленных установок показывают, что спектр ПКЛ не исчезает после 10¹⁸ эВ, а продолжается, по крайней мере, вплоть до энергии 10¹⁹ эВ и даже выше [43].

2. Установки для исследования КЛ в «переходном» энергетическом диапазоне

Сравнительно с областью 10¹⁴-10¹⁶ эВ диапазон 10¹⁶-10¹⁸ эВ исследовался в относительно немногих экспериментах. Но эта область энергий заслуживает более тщательного изучения, так как именно в ней

предполагается появление космических лучей иного происхождения по сравнению с теми, которые наблюдаются при более низких энергиях и традиционно связываются с взрывами Сверхновых в нашей Галактике. Как показывают простые оценки, исходящие из пропорциональности энергии излома заряду ядра Z, при энергии 10¹⁷ эВ излом в парциальных энергетических спектрах ядер, входящих в состав ПКЛ, достигается уже и для ядер железа. Между тем показатель спектра всех частиц сохраняет в области 10¹⁷-10¹⁸ эВ примерно то же значение, что и при энергиях 10¹⁶-10¹⁷ эВ. Анализ мюонной компоненты ШАЛ и энергетического спектра ПКЛ указывает на наличие дополнительной компоненты ПКЛ, состоящей из легких ядер [44]. Наиболее естественно считать, что начиная с энергии 1017 эВ в потоке ПКЛ все больше проявляется вклад внегалактических космических лучей.

Существенный вклад в изучение КЛ в «переходном» диапазоне энергий 10¹⁶-10¹⁸ эВ внесли такие установки, как черенковская установка Тунка-133 [44], сцинтилляционная установка KASCADE-Grande [45], установка ШАЛ МГУ [46]. К настоящему времени появились первые результаты работы ледовой черенковской установки ІсеТор [47, 48] (рис. 3 [49]).



Рис. 3. Экспериментальный дифференциальный энергетический спектр [49]

Экспериментальная установка ШАЛ МГУ, созданная в 1950-е гг. НИИЯФ МГУ для исследования космических лучей сверхвысоких энергий [50], внесла значительный вклад в исследование излома в энергетическом спектре космических лучей при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ. Для настоящей работы, однако, наибольший интерес представляют данные ШАЛ МГУ в конфигурации (1982-1990 гг.), когда занимаемая установкой площадь составляла 0.5 км². На установке проводились измерения плотности потока электронов ШАЛ в 77 наземных пунктах регистрации. В каждом пункте регистрации располагались 3 группы счетчиков Гейгера-Мюллера: 24 с площадью 0.0021 м², 24 по 0.01 м² и 72 счетчика по 0.033 м². Всего наземную часть установки полной площадью 205.4 м² составляли 9240 счетчиков. Благодаря наличию расположенных на глубине 40 м в. э. 4 подземных детекторов мюонов с пороговой энергией 10 ГэВ имелась возможность построения ФПР мюонов в индивидуальных ливнях. Центральный детектор площадью 36.4 м² находился под центральным пунктом установки и содержал 1104 счетчика Гейгера-Мюллера площадью 0.033 м². Остальные три детектора площадью по 18.2 м² состояли из 552 счетчиков каждый и располагались на расстояниях 150-300 м от центра установки в туннеле метрополитена.

На установке использовались две независимые системы отбора ливней. Центральная система состояла из семи сцинтилляционных детекторов и была устроена следующим образом: в центре установки находился детектор площадью 1 м², а остальные 6 — площадью 0.5 м², располагались в вершинах правильного шестиугольника на расстоянии 60 м от центрального детектора. Периферийную систему отбора также составляли сцинтилляционные детекторы площадью 0.5 м². В этих же помещениях находились счетчики Гейгера–Мюллера. 22 помещения, где располагались сцинтилляционные детекторы и счетчики, были объединены в 13 четырехугольников со стороной 150–200 м.

Данные ШАЛ МГУ по первичному спектру хорошо согласуются с данными других установок, регистрирующих события в диапазоне энергий от 10¹⁵ до 10¹⁸ эВ (рис. 4).

Сегодня установка ШАЛ МГУ [51] представляет собой сеть из сорока детекторов электронно-фотонной компоненты ШАЛ площадью 1 м² каждый, расположенных на площади 60×120 м² на территории МГУ, и используется для изучения анизотропии (в области до излома), а также в учебных целях.

Поскольку процедуры обработки экспериментальных данных установок для исследования ШАЛ и процесс сопоставления экспериментальных результатов с предсказаниями теоретических моделей за последнее время значительно усовершенствовались, то анализ данных установки ШАЛ МГУ, накопленных за многолетний период ее эксплуатации,



Рис. 4. Экспериментальный дифференциальный энергетический спектр [52]

продолжается до сих пор. Результаты, полученные на более высоком методическом уровне, подтвердили сделанное ранее заключение относительно обогащения состава ПКЛ тяжелыми ядрами в области за изломом при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ [46, 53]. Кроме того, анализ данных о мюонной и электронной компонентах ШАЛ показал, что при энергии выше 1017 эВ, напротив, состав ПКЛ обогащается легкими ядрами. Экстраполяция спектра, полученная с использованием массового состава, дающего оптимальное согласие с экспериментом в области энергий ниже 1017 эВ на область более высоких энергий, оказалась существенно ниже экспериментального спектра в области 10¹⁷-10¹⁸ эВ, что подтверждает наличие дополнительной компоненты ПКЛ при энергиях выше 1017 эВ [54, 55]. Вклад этой компоненты был оценен по разности между экспериментальным и рассчитанным на основе экстраполяции спектрами.

Установка KASCADE-Grande [45, 56] осуществляла регистрацию ПКЛ с энергиями $10^{16}-10^{18}$ эВ в период с 2003 по 2009 гг. Этот проект стал успешным продолжением эксперимента KASCADE [57], начавшего свою работу по исследованию ПКЛ в области энергий $10^{14}-10^{17}$ эВ с 1996 г. KASCADE-Grande располагалась на территории научно-исследовательского центра Карлсруэ (Германия) на высоте 110 м над уровнем моря, что соответствует глубине атмосферы 1022 г/см^2 . Установка включала в себя основной комплекс KASCADE [57], расширение Grande [56] и KASCADE-Piccolo Trigger Array [56] (рис. 5).

Комплекс KASCADE [45, 56] (схематически показан на рис. 5) осуществлял измерение электромагнитной и мюонной компонент ШАЛ и состоял из 252 детекторных станций, расположенных на расстоянии 13 м друг от друга в узлах прямоугольной сетки, занимающей площадь 200 × 200 м². Станции были объединены в 12 внешних кластеров (по 16 детекторных станций в каждом) и 4 внутренних кластера (по 15 детекторных станций в каждом). Внешние кластеры (192 сцинтилляционные станции)



Puc. 5. Схема установки KASCADE-Grande [56]

были оснащены двумя неэкранированными сцинтилляционными детекторами и одним экранированным (железо, свинец) мюонным детектором. Мюонный детектор состоял из 4 сцинтилляционных детекторов размером 90 × 90 × 3 см каждый.

К северу от центрального детектора установки КASCADE в 48-метровом туннеле шириной 5.4 м и глубиной 2.4 м находился трековый мюонный детектор [45], состоящий из 3 слоев стримерных трубок, площадь каждого из которых была около 128 м², и дополнительных вертикальных детекторных модулей, расположенных вдоль стен туннеля. Низкий фон электронов и гамма-квантов обеспечивался за счет расположенных над туннелем слоев почвы, бетона и железа общей толщиной более 18 радиационных длин.

Большое количество детекторов при их значительной площади дало возможность достичь рекордной доли ливневых частиц, непосредственно регистрируемых установкой. Эта доля составляла 1 и 2% для электронной и мюонной компонент соответственно. Для оценки первичной энергии частицы, генерировавшей ШАЛ, использовалось так называемое усеченное (truncated) число мюонов, которое определялось как интеграл от плотности мюонов в пределах кольца от 40 до 200 м.

Расширение Grande [45, 56] (см. рис. 5) состояло из 37 детекторных станций, расположенных в узлах прямоугольной сетки на расстоянии около 130 м друг от друга, и охватывало площадь 0.5 км². Каждая станция была оснащена блоком электроники и сцинтилляционным детектором площадью 10 м², состоящим из 16 локальных сцинтилляционных счетчиков. Ранее эти счетчики были использованы в эксперименте EAS-TOP (1987–2000 гг., Гранд Сассо, Италия) [58].

Установка KASCADE-Piccolo Trigger Array [45, 56] (см. рис. 5) включала в себя 8 детекторных станций, аналогичных станциям расширения Grande. Станции располагались по сторонам квадрата на расстоянии 20 м друг от друга. Основной целью KASCADE-Piccolo была выработка общего триггера для совпадения событий комплексов KASCADE и Grande. Сама KASCADE-Piccolo считалась сработавшей при срабатывании 2 станций из 8.

Измерение адронной компоненты ШАЛ происходило в центральном детекторе установки KASCADE, основным компонентом которого являлся сегментированный адронный калориметр [45]. К сожалению, данные по адронной компоненте не удалось использовать для анализа массового состава ПКЛ совместно с данными по электронно-фотонной и мюонной компонентам, поскольку привлечение адронной компоненты приводило к чрезмерному утяжелению состава.

Отметим интересный результат [59], относящийся к интерпретации данных по энергетическим спектрам, полученным в эксперименте KASCADE. Используя не противоречащую эксперименту эмпирическую модель излома (так называемую polygonato model), автор [59] показал наличие существенного различия между экстраполяцией спектра на основе polygonato model и энергетическим спектром, полученным по данным ШАЛ при энергии выше 10¹⁷ эВ. Было показано, что экстраполяция идет существенно ниже имеющихся в этом энергетическом диапазоне экспериментальных данных (см. рис. 4). Недостаточная площадь установки КАSCADE не позволила наблюдать непосредственно излом группы тяжелых ядер, что послужило одной из причин создания установки KASCADE-Grande.

Одним из основных результатов эксперимента KASCADE-Grande является картина утяжеления массового состава ПКЛ в области выше «колена», вызванная изломом в спектре легких компонентов [45]. Обычные модели ускорения ПКЛ предсказывают с ростом энергии обогащение массового состава более тяжелыми компонентами. Открытие колена в тяжелых компонентах, представленных железом, стало убедительной проверкой этих теорий и позволило сделать вывод о наличии ПКЛ внегалактического происхождения [60].

В соответствии с достигнутой договоренностью в 2012 г. сцинтилляционные счетчики установки KASCADE-Grande были переданы Туринским университетом (Италия) для создания в Тункинском астрофизическом центре коллективного пользования ИГУ детекторов для регистрации заряженной компоненты ШАЛ.

Первоначально на установке KASCADE-Grande энергетический спектр реконструировался на основе корреляции полного числа заряженных частиц и полного числа мюонов в атмосферном ливне, полученной по программе CORSIKA с использованием модели QGSJet II для описания процессов при высоких энергиях и модели FLUKA при низких. Полное число заряженных частиц в ШАЛ, положение оси ливня и направление его прихода восстанавливалось по данным расширения Grande с помощью метода максимума функции правдоподобия. В качестве ФПР заряженных частиц использовался аналог функции Нишимуры-Каматы-Грейзена [61]. Полное число мюонов реконструировалось по данным экранированных детекторов установки KASCADE.

Уникальность установки KASCADE-Grande заключалась в возможности оценки точности восстановления параметров ШАЛ расширением Grande путем сравнения с данными независимого эксперимента KASCADE. В результате такого анализа было получено, что при восстановлении полного числа заряженных частиц по данным установки Grande систематическая погрешность составляет не более 0.5%, точность восстановления направления прихода ливня — около 0.8°, положения оси ШАЛ — 6 м [62].

В 2013 г. коллаборацией KASCADE-Grande был представлен иной способ восстановления первичной энергии на основе оценки другого параметра, а именно плотности заряженных частиц на расстоянии 500 м от оси ШАЛ, *S*(500) [63].

Расчетная зависимость энергии первичной частицы от параметра S(500), полученная в программе CORSIKA (QGSJet-II) [48]:

$$E_0 = C \cdot S(500)^{\gamma}, \quad \gamma = 0.915 \pm 0.002$$
 [63].

Использование величины *S*(500) [61] при обработке зарегистрированных событий показало наличие в результате систематического сдвига [62, 63] (см. рис. 6), который оказался больше, чем оцененные систематические ошибки данного метода.



Рис. 6. Энергетические спектры ПКЛ [63], полученные на установках KASCADE [61] (кружки) и KASCADE-Grande (квадраты — стандартный подход, треугольники — подход S(500)). Сплошные линии показывают расчетные систематические неопределенности

Разногласие в результатах, полученных с помощью двух разных методик восстановления событий, объясняется в основном тем, что моделирование не достаточно точно описывает форму распределений плотности числа заряженных частиц в зависимости от расстояния до оси ливня [61].

Установка IceTop [65] является наземной частью расположенного в районе географического южного полюса подледного нейтринного телескопа IceCube. IceTop находится на поверхности ледового антарктического щита на высоте 2835 м над уровнем моря, что соответствует глубине атмосферы 692 г/см². Установка состоит из 162 заполненных льдом цилиндрических черенковских баков диаметром 1.8 м и высотой 1.3 м, объединенных попарно в 81 наземную станцию.

Каждый бак установки оснащен двумя цифровыми оптическими модулями, оборудованными 10-дюймовым ФЭУ и блоком электроники для считывания и передачи сигналов, и встроен в снег так, что его верхняя поверхность находится на одном уровне с окружающим снегом [66]. Это позволяет минимизировать перепады температуры и накопление снежных заносов. Работают данные баки по тому же принципу, что и водные черенковские детекторы в установках Haverah Park [12] и Auger [25, 26]. Станции IceTop расположены на расстоянии 125 м друг от друга на площади в 1 км². Расстояние между двумя баками в каждой отдельной станции составляет 10 м. Условие срабатывания установки IceTop — срабатывание не менее трех черенковских станций.

Установка ІсеТор исследует ПКЛ сверхвысоких энергий в энергетическом диапазоне от 300 ТэВ до 1 ЭэВ [66]. В качестве измеряемого параметра при восстановлении энергетического спектра ПКЛ используется S_{125} — плотность энерговыделения ШАЛ на расстоянии 125 м от оси ливня [48]. Связь данного параметра с энергией первичной частицы найдена путем модельных расчетов по программе CORSIKA [48]:

$$\lg(E) = p_0 + p_1 \lg(S_{125}).$$

Различие в результатах при выборе разных моделей адронного взаимодействия (в качестве которых были выбраны SIBYLL 2.1 и QGSJET-II) оказалось не более 4% [48].

Для того чтобы повысить качество восстановления и попасть в выбранный при моделировании диапазон зенитных углов, на экспериментальные данные накладываются следующие условия [48]. При обработке используются события ШАЛ, зарегистрированные 5 и более станциями. Отбираются только те события, для которых параметр $lg(S_{125}) > 0.0$, косинус зенитного угла > 0.8 и положение оси ШАЛ находится в пределах указанной на рис. 7 области.



Рис. 7. Схема установки ІсеТор в 2010 г. Площадь, занимаемая установкой, составляет 0.577 км² [48]

Отбрасываются события, в которых либо максимальный уровень сигнала приходится на крайние станции установки, либо его уровень в каждой из сработавших станций не превышает 6 VEM (в качестве единицы измерения принят сигнал в оптическом модуле, соответствующий прохождению одного вертикального мюона). Восстановленный таким образом энергетический спектр ПКЛ, в сравнении с данными других экспериментов, показан на рис. 8 и рис. 2, 3.

При совместной работе с телескопом IceCube Ice-Тор позволит уточнить сведения о массовом составе ПКЛ в указанном диапазоне энергий. Это возможно благодаря тому, что отношение сигнала от ШАЛ, зарегистрированного наземными черенковскими детекторами, к сигналу, зарегистрированному детекторами подледного телескопа, чувствительно к массе первичной частицы. Другая задача установки калибровка подледного телескопа IceCube. Кроме того, регистрируя время прихода, направление и положение оси ШАЛ, IceTop может помочь в решении проблемы отделения постоянного фона космических мюонов, являющегося помехой в работе нейтринного телескопа IceCube.

3. Гамма-обсерватория TAIGA

Большие надежды в изучении КЛ в «переходном» энергетическом диапазоне возлагаются на строящуюся в Тункинском астрофизическом центре коллективного пользования ИГУ гамма-обсерваторию TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) [67]. В состав гамма-обсерватории войдут шесть установок, использующих детекторы различного типа. Это действующие черенковские установки Тунка-133 [68] и TAIGA-HiSCORE, действующая радиоустановка Tunka-Rex [69], строящаяся на основе сцинтилляционных детекторов установка Tunka-Grande и проектируемые сеть атмосферных узкоугольных черенковских телескопов TAIGA-IACT и сеть мюонных детекторов большой площади TAIGA-Muon.

Установка Тунка-133 расположена в Тункинской долине (республика Бурятия) в 50 км от озера Байкал. Она позволяет изучать энергетический спектр и массовый состав ПКЛ в энергетическом диапазоне 10¹⁶–10¹⁸ эВ путем регистрации космических лучей по черенковскому свету, который излучается заряженными частицами ШАЛ в атмосфере [70, 71]. Этот метод регистрации, в котором наша атмосфера используется в качестве гигантского калориметра, позволяет получить значение энергии космической частицы с наивысшей точностью, возможной при регистрации ШАЛ.

Установка состоит из 175 оптических детекторов, распределенных на площади 3 км². Детекторы объединены в 25 кластеров по 7 детекторов в каждом [72, 73]. В каждом кластере один детектор расположен в центре, а шесть — симметрично относительно центра в вершинах правильного шестиугольника со стороной 85 м. Строительство центральной части установки, включающей в себя 19 кластеров, распределенных на площади около 1 км², было завершено в 2009 г. В 2010–2012 гг. было развернуто дополнительно 7 внешних кластеров на расстоянии 700–1000 м от центра установки, так что площадь установки Тунка-133 выросла до 3 км².

Оптические детекторы, входящие в состав установки, разработаны на базе полусферических фотоумножителей EMI-9350 и HAMAMATSU R1408-01 с диаметром фотокатода 20 см. Каждый отдельный детектор состоит из металлического цилиндрического контейнера высотой 60 см и диаметром 50 см, в котором помещен ФЭУ и блок электроники. Окно контейнера направлено в зенит и закрыто оргстеклом с подогревом для защиты от выпадения инея и росы. Металлическая крышка контейнера снабжена механизмом дистанционного управления. Вся электроника и механика оптического детектора разработаны с учетом возможности работы при температурах до -40°С. Импульсы от детекторов передаются в центр кластера по коаксиальным кабелям RG-58 длиной 100 м и оцифровываются АЦП с частотой 200 Гц. В случае совпадения импульсов от трех детекторов записываются 1024 точки с импульсом в центре. Информация со всех кластеров передается в центр сбора данных по оптоволоконным кабелям.

Точность определения положения оси ШАЛ составляет 6 м, энергетическое разрешение 15%, а точность восстановления положения максимума развития ливня $X_{max} - 25$ г/см². Информация о форме сигнала с каждого детектора дает возможность локации оси ливня даже в случаях, когда его ось лежит вне геометрической площади установки. Эффективная площадь установки в таком случае увеличивается почти на порядок в области энергий выше 10¹⁷ эВ.

Энергия первичной частицы E_0 в эксперименте восстанавливается по плотности потока черенковского света на расстоянии 200 м от оси ШАЛ Q(200). Связь между E_0 и параметром Q(200)выражается формулой [74]

$$E_0 = C \cdot Q(200)^g$$

При моделировании в программе CORSIKA в диапазоне энергий $10^{14}-10^{18}$ эВ для зенитных углов $0-45^{\circ}$ в предположении равного количества первичных протонов и ядер железа было установлено, что значение индекса *g* составляет 0.94. Предположение о равном массовом составе ПКЛ допустимо, поскольку измерения глубины максимума X_{max} показывают, что среднее значение $\ln A$ составляет около 2 ± 0.5 во всем диапазоне энергий $10^{14}-10^{18}$ эВ [74]. Коэффициент *C* в формуле корректируется путем нормировки полученного экспериментального интегрального энергетического спектра ПКЛ на эталонный интегральный спектр, полученный в эксперименте QUEST на установке EAS-TOP [75]. Из-за небольших размеров сцинтилляционной установки EAS-TOP эталонное значение для калибровки экспериментального энергетического спектра черенковской установки находится при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ. Построенная в Тункинской долине на территории установки Тунка-133 сцинтилляционная установка Tunka-Grande за счет больших размеров позволит продвинуть это эталонное значение в сторону более высоких энергий. Альтернативный подход основан на исследовании формы импульса от каждого из детекторов. При этом измеряются такие параметры, как задержка фронта, площадь и длительность импульса.

Методика восстановления первичной энергии по потоку черенковского света также применяется в эксперименте IceTop [65], где используется величина плотности на расстоянии 125 м от оси ШАЛ. Экспериментальные энергетические спектры, полученные на установках IceTop и Тунка-133, представлены на рис. 3 и 8.

К достижениям установки Тунка-133 можно отнести восстановленный с высокой точностью энергетический спектр ПКЛ в области энергий 6 · 10¹⁵ – 10¹⁸ эВ, который свидетельствует о существенно более сложной зависимости интенсивности космических лучей от энергии, чем предполагалось ранее. По данным, набранным в течение 5 зимних сезонов работы с 2009 по 2014 гг., при энергии $6 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16}$ эВ показатель энергетического спектра $\gamma = -3.23 \pm 0.01$, при энергии $2 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{16}$ эВ $\gamma = -2.99 \pm 0.01$, при энергии $5 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17}$ эВ $\gamma = -3.07 \pm 0.01$ и при энергии выше $3 \cdot 10^{17}$ эВ $\gamma = -3.34 \pm 0.01$ [76]. Обнаружение столь резкого изменения показателя спектра при энергии около 2·10¹⁶ эВ принципиально невозможно на установках с худшей точностью определения энергии. Как показали наши оценки, «пропускание» спектра Тунки, например, через установку ШАЛ МГУ уменьшает изменение показателя спектра по сравнению с исходными данными Тунки-133 примерно вдвое и сглаживает особенности, наблюдающиеся в спектре.

По данным установки было подтверждено утяжеление массового состава ПКЛ в области выше «колена», вызванного изломом в спектре легких компонентов, и получено, что излом в парциальном энергетическом спектре железа находится при энергии около 10¹⁷ эВ. Сравнение предсказанных энергетических спектров [5] с экспериментальными данными Тунки-133 [77] подтвердило присутствие в составе ПКЛ при энергиях выше 10¹⁷ эВ дополнительной компоненты внегалактического происхождения.

Однако определение массового состава в настоящее время возможно лишь с ограниченной точностью. Хотя приведенные на рис. 9 данные нескольких установок можно считать согласующимися,



Рис. 8. Спектр станции IceTop-73 в сравнении с другими экспериментами. Линиями показаны статистические ошибки экспериментов; площадь, залитая серым цветом, отвечает систематическим ошибкам установки IceTop [48]



Рис. 9. (ln A) как функция энергии. Черные кружки — данные установки Тунка-133, синие треугольники — KASCADE, малиновые треугольники — HIRES, зеленые квадратики — Auger. Линии и площади отвечают соответственно статистическим и систематическим ошибкам экспериментов [78]

не следует забывать, что в качестве характеристики массового состава используется достаточно грубая величина.

В 2012 г. было начато поэтапное развертывание широкоугольной атмосферной черенковской установки TAIGA-HiSCORE [67], которая представляет собой сеть фотодетекторов — оптических станций (OC), расположенных на поверхности Земли в узлах квадратной решетки. На текущем этапе (2016 г.) установка состоит из 28 OC, занимающих площадь 600 на 450 м. Расстояние между OC составляет около 106 м. В дальнейшем планируется сократить расстояние между станциями центральной части установки до 75 м, а также увеличить площадь установки, дополняя ее новыми ОС.

Оптическая станция является отдельным, логически завершенным элементом установки TAIGA-HiSCORE. ОС представляет собой металлический контейнер с дистанционно-управляемыми крышками для защиты от солнечного света, атмосферных осадков и пыли. В ОС размещаются 4 оптических модуля (ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см, укомплектованные конусами Винстона, увеличивающими площадь светосбора в 4 раза). Телесный угол обзора конусов Винстона и, соответственно, ОС составляет 0.6 ср.

Действующая установка Tunka-Rex представляет собой пространственную решетку из 47 радиоантенн типа SALLA на площади 0.5 км². Сбор данных на установке Tunka-Rex осуществляется с 8 октября 2012 г. по триггеру с кластеров черенковской решетки Тунка-133. Направления прихода, восстановленные по радиоданным, согласуются с результатами черенковской установки Тунка-133, что подтверждает возможность кросс-калибровки радио- и черенковских данных [69].

Сцинтилляционная установка Tunka-Grande представляет собой 19 сцинтилляционных станций наблюдения, размещенных вблизи внутренних кластеров установки Тунка-133 в круге с радиусом ~ 400 м. Площадь сцинтилляционной установки составляет около 0.5 км².

Каждая сцинтилляционная станция включает наземный детектор электронов, состоящий из 12 сцинтилляционных счетчиков общей площадью 8 м², и подземный детектор мюонов общей площадью 5 м², состоящий из 8 аналогичных сцинтилляционных счетчиков. Наземные детекторы электронов установлены в специальных легких контейнерах. Мюонные детекторы расположены в бетонных контейнерах под слоем грунта 1.5 м в непосредственной близости от детекторов электронов. Подобная геометрия позволит восстанавливать положение оси и направление прихода ливня с достаточной точностью [79].

Каждый отдельный сцинтилляционный счетчик представляет собой светособирающий дюралюминиевый кожух, внутри которого размещаются фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) PHOTONICS XP-3462 и сцинтилляционная пластина размером 800 × 800 × 40 мм. Основная часть счетчиков (352 штуки) была поставлена Туринским университетом в августе-сентябре 2012 г. Ранее они использовались в установке KASCADE-Grande.

Летом 2013 г. был произведен первый запуск центрального наземного детектора электронов установки Tunka-Grande и подготовлена часть специально оборудованных подвалов для размещения подземных мюонных детекторов. В 2014 г. полностью закончены работы по монтажу остальных 18 наземных детекторов электронов и 7 подземных детекторов мюонов. В настоящее время запущены все наземные детекторы электронов и подземные мюонные детекторы 7 станций наблюдения из внутренней части Tunka-Grande площадью 0.2 км². В остальных станциях продолжаются работы по установке и подключению подземных мюонных детекторов.

Работа сцинтилляционной установки позволит значительно увеличить число регистрируемых событий, улучшить точность измерения параметров ШАЛ, получить более надежные сведения о массовом составе ПКЛ [80], расширить энергетический диапазон в область сверхвысоких энергий и провести абсолютную энергетическую калибровку черенковских установок.

Основным недостатком черенковского метода регистрации, применяемого на установках TAIGA-HiSCORE и Тунка-133, является то, что наблюдения возможны только в ясные безлунные ночи, т.е. порядка 400 ч в год даже в условиях Тункинской долины. Другим калориметрическим методом наблюдений является регистрация радиоизлучения ШАЛ (установка Tunka-Rex). В отличие от черенковского, в принципе он является «всепогодным» (точнее, почти «всепогодным», исключаются относительно редкие периоды высокого радиофона). Однако радиометод еще недостаточно изучен с методической точки зрения. Только совместная работа установок Tunka-133, TAIGA-HiSCORE, Tunka-Rex и Tunka-Grande позволит достигнуть качественно нового уровня в исследовании энергетического спектра и массового состава КЛ и ответить на вопросы, связанные с явлением перехода от галактических КЛ к внегалактическим.

Заключение

Особый интерес для современных исследователей представляет изучение ПКЛ в переходном диапазоне энергетического спектра 10¹⁶-10¹⁸ эВ. При этом необходимо стремиться к регистрации в одном эксперименте как можно большего числа компонент ШАЛ. Сложность задачи заключается в синхронизации работы и калибровке детекторов различного типа. Пока наилучшее качество калибровки было достигнуто на установке KASCADE-Grande. Но, несмотря на трудности, связанные с одновременной регистрацией нескольких компонент ШАЛ, проекты подобного класса уже занимают (Auger, Telescope Array, ЯкуШАЛ) или в скором времени займут (TAIGA) лидирующие позиции в исследовании ПКЛ. Благодаря большой площади установки и высокой плотности распределенных на ней детекторов, гамма-обсерватория TAIGA охватит энергетический диапазон от 10¹⁴ до 10¹⁹ эВ. Возможность одновременной регистрации черенковского, электронно-фотонного, мюонного и радиоизлучений ШАЛ позволит продвинуться глубже в исследовании энергетического спектра и массового состава ПКЛ, экспериментально подтвердить или опровергнуть вычисленные модельно границы перехода от галактических к внегалактическим ПКЛ как для отдельных элементов, так и для суммарного потока всех частиц ПКЛ.

Таким образом, экспериментальные данные как гигантских установок, так и работающих до 10¹⁸ эВ, показывают существование внегалактической компоненты. Однако вопросы, связанные с положением границы перехода галактических КЛ к внегалактическим, поведением энергетического спектра и изменением массового состава в переходной области, остаются открытыми. Для их решения необходимы комплексные подходы, объединяющие в себе теоретическое моделирование поведения ПКЛ в переходной области и качественные экспериментальные данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ (договоры 14.В25.31.0010, 14.593.21.0005, 3.10131.2017/NM, 3.9678.2017/8.9, 3.904.2017/4.6), РФФИ (гранты 16-32-00344, 14-02-00372 и 13-02-00214) и Программы стратегического развития ИГУ.

Список литературы

- 1. Акимов В.В., Григоров Н.Л., Губин Н.В. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. **35**. С. 2434.
- Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Роганова Т.М. Галактические космические лучи // Модель космоса / Под ред. проф. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. М.: КД «Университет», 2007. С. 1000.
- Berezhko E.G., Ksenofontov L.T. // JETP. 1999. 78. P. 391.
- Kalmykov N.N., Khristiansen G.B. // J. Phys. G. 1995.
 P. 1279.

- 5. Птускин В.С., Роговая С.И., Зиракашвили В.Н. // 31-я ВККЛ. Москва, МГУ, 2010.
- Allekotte I., Barbosa A., Bauleo P. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2008. 586. P. 409.
- Schussler F. (for the Pierre Auger Collaboration) // 31st ICRC (Lodz, Poland). arXiv: 0906.2189v2 [astro-ph.HE] (10 Jul 2009).
- Kawai H., Yoshida S., Yoshii H. et al. // Nucl. Phys. B: Proc. Suppl. 2008. 175–176. P. 221.
- 9. Зотов М.Ю., Калашев О.Е., Пширков М.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. Принят к печати.
- 10. Linsley J. // Proc. 8th ICCR. Jaipur, 1963. 4. P. 77.
- Nagano M., Watson A.A. // Rev. Mod. Phys. 2000. 72, N 3. P. 689.
- Edge D.M., Evans A.C., Garmston H.J. et al. // J. Phys. A. 1973. 6, N 10. P. 1612.
- Lawrence M.A., Reid R.J.O., Watson A.A. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1991. 17. P. 733.
- Winn M.M., Ulrichs J., Peak L.S. et al. // J. Phys. G: Nucl. Phys. 1986. 12. P. 653.
- Chiba N., Hashimoto K., Hayashida N. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 1992. **311**. P. 338.
- Shinozaki K., Teshima M. (for AGASA Collaboration) // Nucl. Phys. B (Procc. Suppl.) 2004. 136. P. 18.
- Bird D.J., Corbato S.C., Dai H.U. et al. // Astrophys. J. 1994. 424. P. 491.
- Bergman D. (for the HiRes Colaboration) // arXiv: 0807.2814vl [astro-ph] (17 Jul 2008).
- Abbasi R.U., Abu-Zayyad T., Allen M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. 100. 101101.
- 20. Глушков А.В. // ЯФ. 2009. 72, № 1. С. 91.
- Pierre Auger Collaboration // Nucl. Instrum. Meth. A. 2008. 586. P. 409.
- Pierre Auger Collaboration // Phys. Lett. B. 2010. 685. P. 239.
- 23. http://www.telescopearray.org
- Артамонов В.П., Афанасьев Б.Н., Глушков А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1994. 58. С. 92. (Artamonov V.P. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 1994. 58. P. 2026).
- 25. http://www.auger.org
- Abraham J. (for the Pierre Auger Collaboration) // Phys. Lett. B. 2010. 685. P. 239.
- Di Giulio C. (for the Pierre Auger Collaboration) // 31st ICRC (Lodz, Poland). arXiv: 0906.2189v2 [astro-ph.HE] (10 Jul 2009).
- Pesce R. (for the Pierre Auger Collaboration) // 32st ICRC (Beijing). arXiv: 1107.4809 [astro-ph.HE] (2011).
- Heck D., Pierog T. Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide (Version 7.5600 from August 17, 2016) // KIT — Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft. 2016. P. 175.
- Kuempel D., Kampert K.H., Risse M. // Astropart. Phys. 2008. 30, N 4. P. 167.
- Tokuno H., Tameda Y., Takeda M. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sec. A. 2012. 676. P. 54.
- 32. Takeshi O. // 2014. e-Print: arXiv: 1401.8109.
- Charles C.H. Jui (for the Telescope Array Collaboration) // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. 273–275. P. 440.
- http://taiga-experiment.info/wpcontent/uploads/2015/02/prosin_ricap14.pdf
- Ivanov A. (for the Yakutsk array group) // EPJ Web of Conferences. 2013. 53. 04003.

- 36. Иванов А.А., Кнуренко С.П., Правдин М.И., Слепцов И.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 56. (Ivanov А.А., Knurenko S.P., Pravdin М.I., Sleptsov I.E. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2010, N 4. Р. 292.)
- 37. Clark G., Bradt H.L., La Pointe M. et al. // Proc. 8th ICRC (Jaipur, 1963). **4**. P. 65.
- Деденко Л.Г., Глушков А.В., Кнуренко С.П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2009. 90. № 11. С. 787. (Dedenko L.G., Glushkov A.V., Knurenko S.P. et al. // JETP Lett. 2009. 90, N 11. P. 691.)
- Деденко Л.Г., Иноуе Н., Подгрудков Д.А. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2009. 73, № 5. С. 639. (Dedenko L.G., Podgrudkov D.A., Inoue N. et al. // Bull. Russ Acad. Sci. Phys. 2009. 73, N 5. P. 600.)
- Tsunesada Y. (The Telescope Array Collaboration) // Proc. of the 32nd ICRC. August 2011, Beijing, China. arXiv: 1111.2507.
- Creusot A. (for the Pierre Auger Collaboration) // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sec. A: Accel., Spectrom., Detect., Equip. 2012. 662, Suppl. 1. P. S106.
- Egorova V.P., Glushkov A.V., Ivanov A.A. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2004. 136. P. 3.
- 43. Berezinsky V. // Astropart. Phys. 2014. 53. P. 120.
- Калмыков Н.Н., Кузьмичев Л.А., Куликов Г.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 40. (Kalmykov N.N., Kuzmichev L.A., Kulikov G.V. // Moscow. Univ. Phys. Bull. 2010, N 4. Р. 275.)
- 45. http://www-ik.fzk.de/KASCADE/ KASCADE_welcome_Grande.html
- Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Khristiansen G.B. et al. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 1996. 22. P. 1839.
- 47. http://icecube.wisc.edu
- Aartsen M.G., Abbasi R., Abdou Y. et al. // Phys. Rev. D. 2013. 88. P. 042004. arXiv: 1307.3795.
- Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al. // EPJ Web of Conferences. 2016. 121. 03004.
- Khristiansen G.B., Kulikov G.V., Fomin Yu.A. Cosmic Rays of Superhigh energies. München: Verlag Karl Thiemig, 1980. P. 246.
- 51. Веденеев О.В., Гарипов Г.К., Игошин А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. **67**, № 10. С. 1457.
- 52. Horandel J.R. // Astropart. Phys.. 2003. 19. P. 193.
- Kuzmichev L.A., Sveshnikova L.G., Korosteleva E.E. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2013. 409, N 1. P. 012062.
- Калмыков Н.Н., Котсоми Х., Сулаков В.П., Фомин Ю.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2008. № 5. С. 62. (Kalmykov N.N., Cotzomi J., Sulakov V.P. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2008. N 5. P. 359.)
- Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Сулаков В.П., Фомин Ю.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011, N 1. C. 84. (Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Sulakov V.P., Fomin Yu.A. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2011. N 1. P. 92.)
- Apel W.D., Arteaga J.C. et al. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2010. 620. P. 202.
- Antoni T. et al. (KASCADE Collaboration) // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. 513. P. 490.
- Aglietta M. et al. (EAS-TOP Collaboration) // Nucl. Instr. Meth. A 1993. 336. P. 310.
- 59. Horandel J.R. // Astropart. Phys. 2002. 16, N 3. P. 245.
- 60. Horandel J.R. // Astropart. Phys. 2003. 19. P. 373.
- Apel W.D. et al. (KASCADE Collaboration) // Astropart. Phys. 2006. 24. P. 467.

- 62. Apel W.D., Arteaga-Velazquez J.C. et al. (KASCADE Collaboration) // Astropart. Phys. 2012. **36**. P. 183.
- Toma G., Apel W.D., Arteaga-Velazquez J.C. et al. // 33rd ICRC. Rio de Janeiro, 2013.
- Antoni T. et al. (KASCADE Collaboration) // Astropart. Phys. 2005. 24. P. 1.
- Abbasi R. (IceCube Collaboration) // Nucl. Instrum. Meth. A. 2013. 700. P. 188.
- Aartsen M.G. et al. (IceCube Collaboration) // Astrophys. J. 2013. 765. P. 55.
- 67. Budnev N.M. et al. // JINST. 2014. 9. C09021.
- Berezhnev S., Budnev N.M., Ivanova A.L. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2013. 732. P. 281.
- 69. Hiller R., Budnev N.M. et al. // Phys. Procedia. 2015.61. P. 708.
- Berezhnev S.F., Besson D. et al. // 33rd ICRC. Rio de Janeiro, 2013. N 0617.
- Berezhnev S.F., Besson D., Ivanova A. et al. // 33rd ICRC. Rio de Janeiro, 2013. N 0418.
- 72. Буднев Н.М., Вишневский Р., Гресс О.А. и др. // 30-я РККЛ. СПб., 2008. С. 45.
- Буднев Н.М., Вишневский Р., Гресс О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2005. 69. № 3. С. 347. (Budnev N.M.

et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2005. **69**, N 3. P. 391.)

- 74. Prosin V.V. et al. // EPJ Web of Conferences. 2015. 99. P. 04002.
- Korosteleva E. et al. // Nucl. Physics B (Proc. Suppl.).
 2007. 165. P. 74.
- Berezhnev S.F., Budnev N.M., Chiavassa A. et al. // JPS Conf. Proc. 2016. 9. 010009.
- 77. Sveshnikova L.G., Kuzmichev L.A., Korosteleva E.E. et al. // Cosmic Rays beyond the Standard Model. San Vito di Cadore (BL), Italy, 16–22 March 2014.
- Epimakhov S., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al. // 33rd ICRC. Rio de Janeiro, 2013. N 0326.
- 79. Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 4. С. 80. (Budnev N.M., Ivanova A.L., Kalmykov N.N. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2014. N 4. P. 375.)
- Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 2. С. 80. (Budnev N.M., Ivanova A.L., Kalmykov N.N. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2010. N 4. P. 160.)

Investigations of the transition region between Galactic cosmic rays and extragalactic ones with arrays for extensive air shower detecting

N. M. Budnev¹, **A. L. Ivanova^{1,a}**, **N. N. Kalmykov²**

¹Research Institute of Applied Physics, Irkutsk State University. Irkutsk 664003, Russia. ²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia. E-mail: ^a annaiv.86@mail.ru.

We discuss the results of the cosmic ray energy spectrum and mass composition studies obtained with arrays for extensive air showers detecting. A survey of ground arrays performing such researches and a brief description of the primary particle characteristics recovery methods from experimental data are presented. Particular emphasis is given to the energy range of $10^{16}-10^{18}$ eV where a transition from Galactic cosmic rays to extragalactic ones is expected. The complex of arrays created in the Tunka Valley for studies in this range is considered specially.

Keywords: PCR, CR, EAS, giant arrays, Gamma Ray Observatory TAIGA. PACS: 96.50.sd, 96.50.sb. *Received 3 November 2016.*

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2017. 72, No. 6. Pp. .

Сведения об авторах

- 1. Буднев Николай Михайлович доктор физ.-мат. наук, директор института, профессор; тел.: (3952) 33-21-70, е-mail: nbudnev@api.isu.ru.
- 2. Иванова Анна Леонидовна канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (3952) 33-21-70, e-mail: annaiv.86@mail.ru.
- 3. Калмыков Николай Николаевич доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, профессор; тел.: (495) 939-23-69, e-mail: alm@eas.sinp.msu.ru.