

3.1

15-02-05769

3.2

Поиск особенностей в спектре и изменений в массовом составе КЛ, связанных с доминированием источников различной природы в различных интервалах полного диапазона энергий 10^{14} - 10^{18} эВ.

3.5 Полученные в 2016 году важнейшие результаты

В 2016 г с января по апрель и с сентября по декабрь проведены все запланированные сеансы набора данных всеми установками Астрофизического комплекса МГУ-ИГУ. Установки, регистрирующие в безлунные ночи черенковский свет от ШАЛ (Тунка-133, TAIGA-HiSCORE), проработали около 400 часов. Установки, регистрирующие заряженные частицы и радиоизлучение ШАЛ (Тунка-Grande и Тунка-REX), проработали около 2000 часов. В течение лета (май – август) установки не работали из-за опасности повреждения их во время гроз.

Продолжено расширение установки TAIGA-HiSCORE. Оборудован новый автономный центр сбора данных на расстоянии 600 м от базового центра, установлены 20 контейнеров для размещения электроники новых оптических станций, проложены оптоволоконные кабели и кабели питания. Изготовлена большая часть электроники для новых станций. Программы обработки адаптированы к новому формату записи и обработаны данные установки Тунка-133 за 42 ночи (310 часов) с хорошей погодой. Определены параметры – направление прихода, положение оси и энергия - для более, чем 3-х млн. ливней. Из них 320 тыс. с вероятностью отбора около 100% имеют зенитные углы до 45 градусов, положение оси внутри круга радиусом 450 м и энергии более $6 \cdot 10^{15}$ эВ.

Установка TAIGA-HiSCORE в настоящее время состоит из 28 оптических станций, расположенных на площади 0.25 км^2 . В течение зимнего сезона 2015-2016 гг за 35 ночей с хорошей погодой (210 часов) было зарегистрировано около 10 млн. ШАЛ с одновременным срабатыванием 4-х и более станций. Восстановление параметров ливня проводилось с помощью алгоритмов, разработанных для установки Тунка-133. Основные параметры ШАЛ найдены для 5.5 млн. ливней внутри геометрии установки. Порог 100%-ной эффективности – 250 ТэВ.

Полное время набора данных установкой Тунка-133 за 6 лет работы составило 1850 часов (303 ночи). Всего зарегистрировано 12 млн. событий. В спектр включены события с эффективностью регистрации, близкой к 100%, ~320 тыс. ШАЛ с энергией более $6 \cdot 10^{15}$ эВ и 3580 событий с энергией более 10^{17} эВ. Построен спектр в диапазоне энергий $6 \cdot 10^{15}$ – $2 \cdot 10^{18}$ эВ (Рис.1, Рис.2).

Получен предварительный спектр по данным установки TAIGA-HiSCORE в диапазоне $2.5 \cdot 10^{14}$ – $2 \cdot 10^{16}$ эВ (Рис.3). Наблюдается хорошая стыковка результатов «прямых» баллонных и спутниковых экспериментов с результатами TAIGA-HiSCORE.

Суммарный спектр установок TAIGA-HiSCORE и Тунка-133 (Рис.4) охватывает диапазон энергий около 4-х порядков, демонстрируя такие особенности, как классическое «колесо» при энергии 3 ПэВ (изменение показателя от ~2.7 до ~3.3), переход к более пологому показателю (~3.0) при энергии около 20 ПэВ, частичное укрупнение при энергии около 80 ПэВ и более существенное увеличение показателя (3.4 ± 0.11) при энергии около 300 ПэВ. Последняя особенность трактуется как второе «колесо».

Из анализа крутизны функции амплитуда-расстояние от оси (ФАР) получена зависимость средней глубины максимума X_{max} от энергии по данным установок TAIGA-HiSCORE и Тунка-133 в диапазоне энергий 3 – 1000 ПэВ (Рис.6). Изменение средней глубины максимума интерпретируется как изменение массового состава космических лучей от

легкого к более тяжелому вплоть до энергии около 100 ПэВ и облегчение состава при дальнейшем росте энергии (Рис.7).

Разработана методика обработки данных эксперимента Тунка-Grande для получения основных параметров ШАЛ, включая число заряженных частиц. Разработана методика пересчета от числа заряженных частиц к первичной энергии.

Набраны и обработаны данные за первые 888 часов работы установки Тунка-Grande.

Построен предварительный энергетический спектр (Рис.5). Порог 100% эффективности для ливней оказался равным $5 \cdot 10^{16}$ эВ.

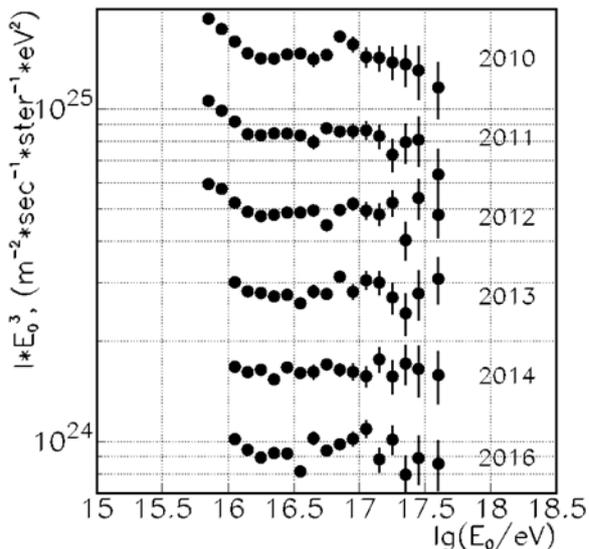


Рис.1. Дифференциальные энергетические спектры по данным установки Тунка-133 за 6 лет работы, включая 2016 год.

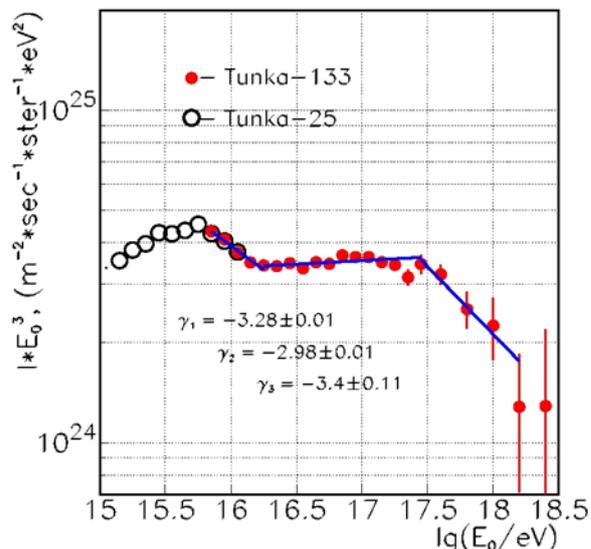


Рис.2. Суммарный энергетический спектр по данным установки Тунка-133 за 6 лет Работы в сравнении со спектром установки Тунка-25.

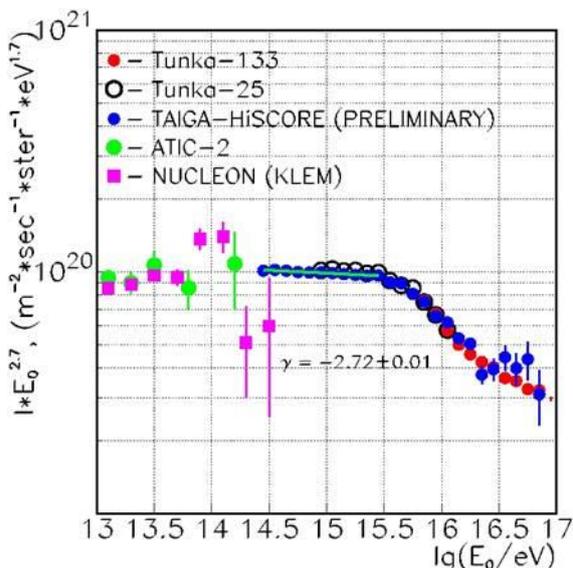


Рис.3. Энергетический спектр по данным установки TAIGA-HiSCORE в сравнении с результатами прямых экспериментов на баллонах и спутниках.

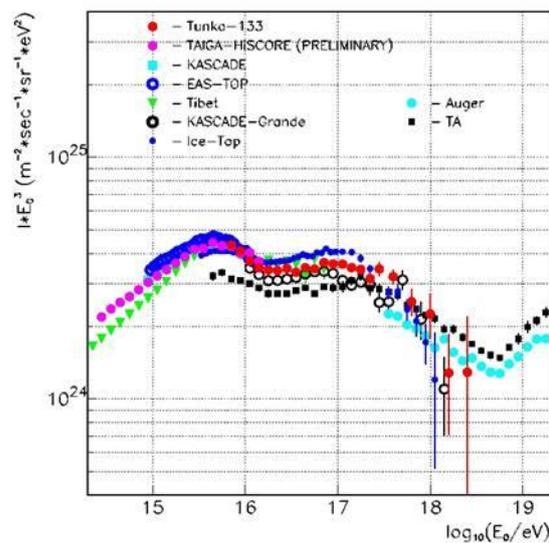


Рис.4. Суммарный спектр Тункинских экспериментов в сравнении с другими экспериментами в широком диапазоне энергий.

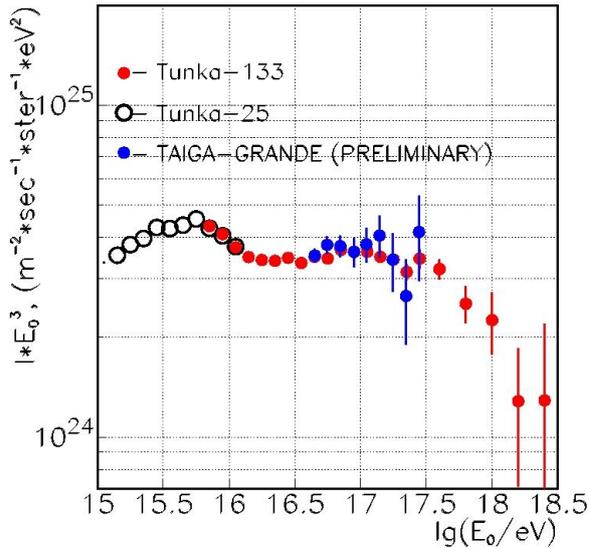


Рис. 5. Предварительный энергетический спектр по данным первого этапа работы установки Тунка-Grande.

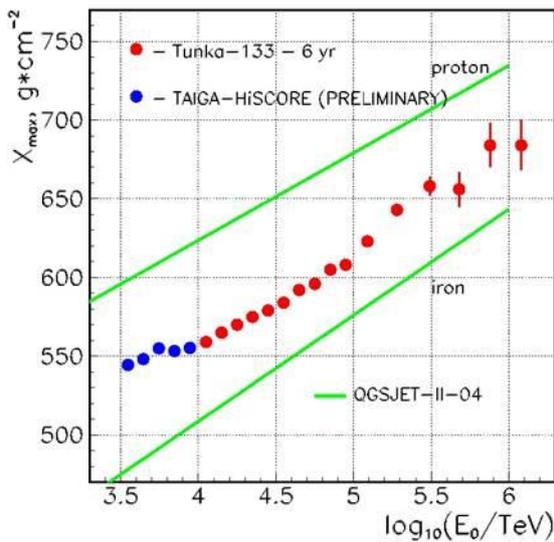


Рис.6. Зависимость средней глубины максимума ШАЛ от энергии первичной частицы по данным о крутизне ФАР, Полученным на установках Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE.

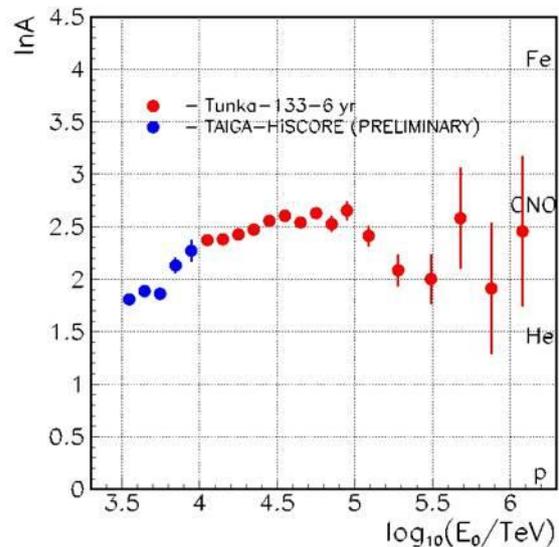


Рис. 7. Зависимость среднего логарифма масс первичных частиц от энергии из из интерполяции результатов с рис. 6.

3.6 Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

Установки Тунка-133, TAIGA-HiSCORE, Тунка-Grande, и Тунка-REX составляют вместе уникальный по информативности комплекс. Диапазон измерений около 4-х порядков по энергии от $2 \cdot 10^{14}$ до $2 \cdot 10^{18}$ эВ.

Полученный по данным установок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE энергетический спектр первичных космических лучей охватывает единой методикой диапазон энергий около 4-х порядков, что превосходит диапазон, достигнутый на Германских установках KASCADE и KASCADE-Grande, а также других установках, кроме последних результатов эксперимента Telescope Array с расширением TALE. Однако, в последнем эксперименте применена сложная методика разделения черенковского и ионизационного света.

Сложной и не вполне ясной является и оценка эффективной площади. По-видимому, эти факторы явились причиной существенного отличия абсолютной интенсивности спектра установки TALE от совокупности данных большинства мировых установок, согласующихся между собой, при энергиях 10 – 100 ПэВ. Все особенности спектра, полученного в наших экспериментах, наблюдаются во всех современных экспериментах, работающих в этом диапазоне энергий: KASCADE-Grande, IceTop, Telescope Array с расширением TALE.

3.7.1 Методы и подходы, использованные в ходе выполнения Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)

Изменен формат записи данных на базовой установке для регистрации ШАЛ по черенковскому свету Тунка-133. Вместо сплошного потока данных от всех 25-ти кластеров, теперь записываются файлы данных отдельно от каждого кластера. Введена единая синхронизация таймеров всех установок от GPS. Каждая антенна установки Тунка-REX состоит из 2-х рамочных антенн, ориентированных перпендикулярно друг другу. Поэтому для записи сигналов с нее требуется 2 канала в блоке электроники. Для подключения радиоантенн установки Тунка- REX ранее использовались входы 15 и 16 блока электроники каждого кластера установки Тунка-133. После введения в строй 19 станций установки Тунка-Grande появились 19 дополнительных блоков электроники, в которых для подключения радиоантенн выделены по 4 входа с 13-го по 16-й. В результате число радио антенн установки Тунка-REX внутри плотной части установки Тунка-133 радиусом 0.5 км удалось увеличить до 57. Увеличение числа точек измерения потока радиоизлучения улучшает точность восстановления параметров ШАЛ этим методом. Низкопороговая широкоугольная установка Тунка-HiSCORE в настоящее время состоит из 28-ми станций, расположенных на площади 0.25 м². Все станции наклонены к югу на 25 градусов.

Для восстановления положения оси и энергии ШАЛ применяется фитирование измеренных амплитуд функцией амплитуда-расстояние (ФАР), разработанной для установки Тунка-133. Для оценки энергии E_0 используется плотность потока черенковского света на расстоянии 200 м от оси ШАЛ Q_{200} . Для смешанного состава из расчетов по программе CORSIKA была получена формула: $\lg E_0 = C + 0.94 * \lg Q_{200}$. Однако, при энергиях вблизи порога, с одной стороны, срабатывает слишком мало станций, а, с другой стороны, ФАР становится слишком пологой для успешного фитирования. Последнее замечание особенно существенно для ливней с большими зенитными углами, т.к. ФАР становится положе с ростом зенитного угла. В результате Q_{200} оценивается с большой систематической ошибкой. Экспериментальная проверка применимости методики обработки проводится путем сравнения энергетических спектров, построенных для узких диапазонов по зенитному углу. Спектры для всех зенитных углов должны быть одинаковы. Действительно, это справедливо для энергий более 10¹⁵ эВ до зенитного угла 40 градусов. При энергиях менее 10¹⁵ эВ спектры одинаковы только до угла 15 градусов. Для больших углов заметно искажение спектра в виде кажущегося повышения интенсивности возле порога, которое с увеличением зенитного угла смещается в сторону больших энергий. В связи с этими недостатками методики итоговый спектр строится до энергии 10¹⁵ эВ для углов до 15 градусов, а для больших энергий – до 40 градусов. Для больших углов в пороговой области разрабатывается другая методика. В этой методике положение оси ливня восстанавливается по центру тяжести амплитуд импульсов в 4-х ближайших к оси ливня станциях. Энергия вычисляется по средней плотности потока света в этих станциях. Моделирование ливней для разработки этой методики сделано по программе CORSIKA. Конкретные формулы пересчета находятся в стадии разработки и проверки на реальных событиях. Окончательный вид формул пересчета с учетом угловых и энергетических поправок будет опубликован в следующем 2017 году.

Для установки Тунка-Grande событием ШАЛ называется одновременная регистрация заряженных частиц в 5-ти или более станциях. При этом геометрия расположения станций такова, что в каждом событии надежно регистрируется средняя плотность заряженных частиц на расстоянии 200 м от оси. При восстановлении параметров методом фитирования измеренных значений функцией НКГ определяются координаты оси и число частиц N_e . Энергия ШАЛ для установки Тунка-Grande определяется по формуле:

$$E_0 = 2.5 \cdot 10^{10} (N_e)^{0.877}, \text{ эВ.}$$

Методика определения энергии по параметру плотности на расстоянии 200 м, которая, в принципе может обеспечить лучшую точность определения E_0 находится в стадии разработки.

Продолжается разработка методов анализа состава первичного космического излучения как для низких, так и для предельно высоких энергий. Для энергий установки Тунка-HiSCORE разделение ливней от легкой и тяжелой компонент первичного излучения будет проводиться по глубине максимума, определяемой по крутизне пространственного распределения света.

Количественной мерой крутизны ФАД служит либо параметр " b_A " этой функции, либо для пороговых энергий отношение амплитуд на двух расстояниях от оси ШАЛ, например, 70 и 200 м. Первое расстояние соответствует среднему расстоянию для 4-х ближайших к оси станций. Для определения глубины максимума ШАЛ требуется найти связь относительного положения максимума ($\Delta X_{\max} = X_0/\cos\theta - X_{\max}$) с измеряемым параметром. Измеряемый параметр выбирается таким образом, чтобы получить линейную связь с искомым относительным положением максимума. Для этого используются результаты расчетов по программе CORSIKA. Например, связь линейна для параметра $\lg(b_A - 2)$. Для уточнения этой зависимости по экспериментальным данным был использован, так называемый, феноменологический подход, при котором связь ΔX_{\max} с измеренным параметром вычисляется, исходя из зависимости этого параметра от зенитного угла. По данным установки TAIGA-HiSCORE-28:

$\Delta(X_{\max}) = 2824 - 3416 \times \lg(b_A - 2)$. Для получения этой формулы использованы ливни с энергией 10 ПэВ, отобранные в центральной части эффективной области на расстоянии более 50 м от края установки и с зенитными углами от 0 до 40 градусов. Полученные параметры близки к тем, которые были найдены для установки Тунка-133. Этот метод оценки глубины максимума работает, начиная с энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ. Для меньших энергий выбор параметров и методики находятся в стадии разработки.

В области энергий ШАЛ, регистрируемых установкой Тунка-Grande, разделение легкой и тяжелой компонент космических лучей проводится за счет разницы в соотношении числа мюонов и электронов в ливнях для различных первичных ядер.