

УДК 537.591

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА УСТАНОВКЕ «ТУНКА»

<sup>1</sup>Н.М. Буднев, <sup>1</sup>О.А. Гресс, <sup>1</sup>Т.И. Гресс, <sup>2</sup>А.В. Заблоцкий, <sup>1</sup>А.В. Загородников, <sup>2</sup>Е.Е. Коростелева, <sup>2</sup>Л.А. Кузьмичев, <sup>3</sup>Б.К. Лубсандоржиев, <sup>1</sup>Л.В. Паньков, <sup>1</sup>Ю.В. Парфенов, <sup>2</sup>В.В. Просин, <sup>1</sup>Ю.А. Семеней, <sup>2</sup>Д.В. Чернов, <sup>3</sup>Т. Шмидт, <sup>3</sup>К. Шпиринг, <sup>2</sup>И.В. Яшин

## THE EXPERIMENTAL STUDY OF PRIMARY COSMIC RAYS OF HIGH AND ULTRAHIGH ENERGY WITH “TUNKA” ARRAY

<sup>1</sup>N. Budnev, <sup>1</sup>O. Gress, <sup>1</sup>T. Gress, A. <sup>2</sup>Zablotskii, <sup>1</sup>A. Zagorodnikov, <sup>2</sup>E. Korosteleva, <sup>2</sup>L. Kuzmichev, <sup>3</sup>B. Lubsandorzhev, <sup>1</sup>L. Pan'kov, <sup>1</sup>Yu. Parfenov, <sup>2</sup>V. Prosin, <sup>1</sup>Yu. Semenev, <sup>2</sup>D. Chernov, <sup>4</sup>T. Schmidt, <sup>4</sup>Ch. Spiering, <sup>2</sup>I. Yashin.

В лекции содержится краткий обзор истории изучения космических лучей, современных проблем и экспериментальных методов их исследования. Более подробно рассмотрен черенковский метод, который используется в установке «ТУНКА». Приведены основные результаты, полученные на установке «ТУНКА-25» и план создания установки «ТУНКА-133» площадью 1 км<sup>2</sup>.

Overview of history and modern status of cosmic ray physics is done. Idea of Cherenkov method for study cosmic rays is described. EAS Cherenkov array TUNKA, its present status, main results, and future are presented.

### Историческое введение

Прошло больше 100 лет с тех пор, как в опытах Вильсона [1], Гайтеля [2] и Эльстера [3] был обнаружен эффект ионизации газа, который первоначально связывался с земной радиоактивностью. В 1911–1912 гг. Гесс [4, 5], поднимаясь на воздушных шарах до высоты 5.3 км, установил, что хотя в начале подъема интенсивность ионизации несколько падает, но выше 700 м значительно растет с увеличением высоты. Гесс предположил, что «ионизирующее излучение, обладающее высокой проникающей способностью, проникает в атмосферу сверху», т.е. имеет космическое происхождение. В 1936 г. Гессу была присуждена Нобелевская премия по физике за открытие космических лучей. Скобельцин в 1927 г. [6] в экспериментах с камерой Вильсона, помещенной в магнитное поле, зарегистрировал следы заряженных частиц с большими энергиями, чем возможны у продуктов радиоактивных распадов. Это открытие явилось стимулом для появления новых экспериментальных методов изучения космических лучей. Росси разработал метод совпадений разрядов нескольких счетчиков [7, 8], Блеккет и Оккиалини предложили управлять расширением камеры Вильсона по сигналу разрядного счетчика [9]. В результате середина прошлого века стала «золотой» порой физики космических лучей. В 1932 г. Андерсон [10] открыл позитрон, затем были открыты  $\mu$ -мезон,  $\pi$ -мезоны, K-мезоны и другие элементарные частицы.

Как теперь известно, наблюдаемые на поверхности Земли космические лучи являются вторичными, т.е. родившимися в результате взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой. «Классические» первичные космические лучи (ПКЛ) – это ядра и ионизированные атомы от протона до железа, ускоренные до высоких энергий как в пределах нашей Галактики, так и вне ее. В более широком смысле к космическим лучам можно отнести и другие стабильные и квазистабильные частицы высоких энергий, такие как электроны, нейтроны, антипрото-

ны, нейтрино,  $\gamma$ -кванты, и т.д., а также гипотетические объекты: магнитные монополи, суперсимметричные частицы, мини-черные дыры, если последние существуют. Во второй половине XX в. в исследованиях космических лучей преобладал астрофизический аспект, т.е. основной задачей было изучение источников и механизмов ускорения ПКЛ. В последние десятилетия вновь стал возрастать и ядерно-физический аспект исследований космических лучей, а именно, изучение свойств и взаимодействий элементарных частиц и ядер. Важнейшим открытием явилось открытие осциллирующей нейтрино [11], [12], т.е. перехода одного типа нейтрино в другой. Наличие осцилляций означает, что масса нейтрино не равна нулю, что имеет фундаментальное значение и для физики элементарных частиц, и для астрофизики. В последние годы исследования в области физики элементарных частиц все больше пересекаются с задачами астрофизики, что привело к возникновению нового раздела физики – физики астрочастиц (Astroparticle Physics).

### Современный статус физики космических лучей

На рис.1, а приведен дифференциальный энергетический спектр ПКЛ, т.е. число частиц, падающих на площадку площадью 1 м<sup>2</sup> в телесном угле 1 стер за 1 с в интервале энергии 1 ГэВ в зависимости от их энергии. В энергетическом диапазоне 10<sup>9</sup>–10<sup>20</sup> эВ плотность потока частиц меняется на 30 порядков величины! Загиб спектра при энергии меньше 10<sup>9</sup> эВ объясняется экранирующим влиянием магнитного поля Земли. Напомним, что в самых мощных ускорителях протоны разгоняются до энергии порядка 10<sup>12</sup> эВ. Средняя плотность энергии космических лучей, заполняющих нашу Галактику, – порядка 1 эВ. см<sup>-3</sup> – сопоставима с плотностью энергии других компонент Вселенной, таких как галактические магнитные поля, микроволновая радиация, свет звезд. Это позволяет предполагать, что космические лучи могут играть существенную роль в галактическом балансе энергии.

В целом, энергетический спектр космических лучей (рис. 1, а) хорошо описывается степенным законом с явными изменениями спектрального индекса при двух энергиях: при энергии  $3 \cdot 10^{15}$  эВ спектр становится круче (эта область называется «колено»), в области  $3 \cdot 10^{18}$ – $10^{19}$  эВ наклон спектра наоборот уменьшается (т.н. «лодыжка»). Предполагается, что частицы при энергии «лодыжки» и выше имеют внегалактическое происхождение. В некоторых работах отмечается менее явно выраженное второе колено в области энергий  $10^{17}$ – $10^{18}$  эВ. Эти особенности спектра гораздо нагляднее проявляются на рис. 1, б, где показана величина потока ПКЛ  $I(E_0)$  умноженная на энергию частиц  $E_0$  в кубе.

Считается, что происхождение космических лучей связано с наиболее активными и мощными объектами во Вселенной: сверхновыми звездами, пульсарами, компактными аккреционными системами, массивными звездами с мощными звездными ветрами, ядрами активных галактик и источниками гамма-всплесков. Однако, несмотря на существенный прогресс в теории ускорения и распространения кос-

мических лучей высоких энергий, до конца их природа не ясна.

Основы теории ускорения частиц в галактических магнитных полях заложены в работах Ферми [13, 14]. В настоящее время наиболее развитой является теория ускорения на фронтах ударных волн, предложенная в работах Крымского [15] и Аксфорда [16]. Качественная оценка максимальной энергии  $E_{\max}$ , до которой частица с зарядом  $Z$  ускоряется в магнитном поле  $H$  источника с размером  $L$ , может быть получена на основе правила Хиллоса:

$$E_{\max} \sim Z \cdot H \cdot L,$$

т.е. чем больше заряд ядра, тем до большей энергии оно может быть ускорено в данном источнике.

Предполагается, что основным механизмом генерации ПКЛ с энергией до  $10^{14}$  эВ является ускорение на ударной волне в оболочках сверхновых. Для этого величина магнитного поля на фронте ударной волны должна быть равна галактическому магнитному полю ( $\sim 3$  мкГс). Существует множество экспериментальных указаний (но не прямых доказательств!), что эта гипотеза справедлива. В частности, в ряде экспериментов наблюдается утяжеление химического состава ПКЛ в области  $10^{15}$ – $10^{17}$  эВ, т.е. последовательное вымирание протонов, затем ядер гелия и т.д. с ростом энергии. Возможность ускорения протонов КЛ вплоть до сотен ТэВ в оболочках сверхновых находит подтверждение в последних данных ТэВ-ной гамма-астрономии. Частота и мощность вспышек сверхновых в нашей Галактике вполне достаточна для обеспечения колоссальной плотности энергии, сосредоточенной в космическом излучении.

Существенный прогресс в теории ускорения до более высоких энергий на фронтах ударных волн был получен в работах Бэлла и Лучека [17], Птускина и Зиракашвили [18], показавших, что ускоряемые космические лучи могут усиливать магнитное поле вплоть до сотен микрогаусс! Максимальная энергия ПКЛ при этом увеличивается до  $10^{17} Z$  эВ, что близко к предполагаемому галактическому пределу. Ускорение до энергии  $10^{17} Z$  эВ может быть также достигнуто на ударной волне, ограничивающей Галактический ветер [19]. Весьма интересной является модель ускорения вдоль фронта ударной волны за счет резонансного взаимодействия волна – частица [20]. Частицы при этом могут ускориться до энергии порядка  $10^{20}$  эВ. Другой возможный путь рождения космических лучей сверхвысоких энергий – распады неизвестных квазистабильных тяжелых объектов, таких как мини-черные дыры, суперсимметричные частицы и т.д.

Принципиально важным является также вопрос о том, какова максимальная энергия космических лучей, которые мы наблюдаем? Грейзен [21], Зацепин и Кузьмин [22] показали, что протоны с начальной энергией  $E_0 > 5 \cdot 10^{19}$  эВ, проходя в пространстве путь  $L$ , теряют свою энергию по закону  $E(L) = E_0 \exp(-L/L_0)$ , где  $L_0 \approx 15$  Мпс из-за взаимодействия с реликтовым излучением с образованием  $\Delta(1232)$  изобары (GZK – эффект):

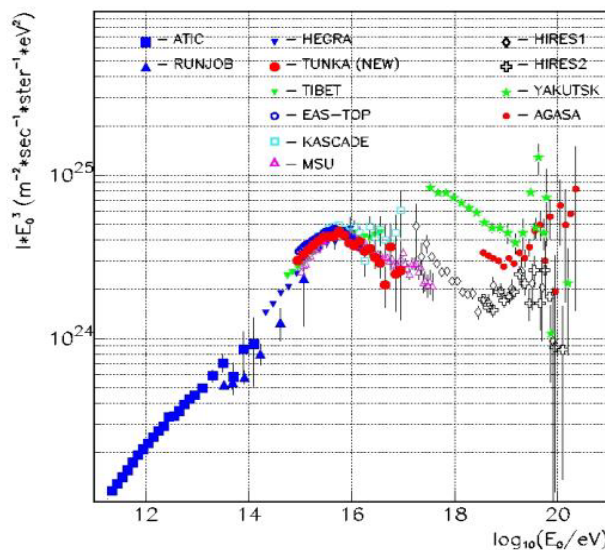
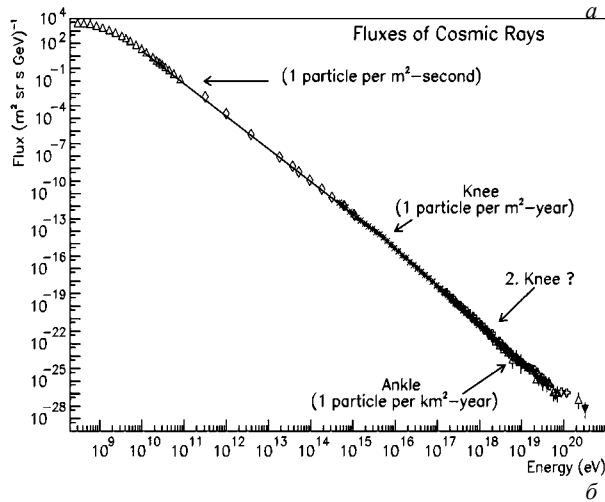


Рис. 1. Дифференциальный энергетический спектр космических лучей.

Это означает, что, если космические лучи с энергией больше  $10^{20}$  эВ действительно наблюдаются, то их источники должны находиться на расстоянии не больше 100 Мпк от Земли.

Существует и много других вопросов, на которые пока нет удовлетворительного ответа: при каких энергиях происходит переход от галактических к метagalactic космическим лучам, существует ли анизотропия космических лучей, как она зависит от энергии и т.д.? Для ответа на эти и многие другие вопросы необходимо разрабатывать новые экспериментальные и теоретические методы и создавать новые установки, поскольку, как следует из рис. 1, б, при энергиях больше  $10^{16}$  эВ наблюдается быстро растущий с энергией разброс в экспериментальных данных. Это связано как с малой величиной потоков ПКЛ при сверхвысоких энергиях, так и с трудностями в оценке энергии первичной частицы из экспериментальных данных в области, удаленной от энергий, достигнутых на ускорителях заряженных частиц.

#### Экспериментальные методы исследования первичных космических лучей

Прямая регистрация космических лучей возможна только с помощью детекторов поднятых в стратосферу или расположенных на спутниках. Очевидно, что площадь таких детекторов сильно ограничена, она не может быть больше, чем несколько квадратных метров, и разумную статистику, как видно из рис. 1, а, можно получить при энергии частиц не более чем  $10^{14}$ – $10^{15}$  эВ. Изучать ПКЛ более высоких энергий можно только, регистрируя продукты их взаимодействия с атмосферой. В результате такого взаимодействия развиваются так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ), включающие ядерный и электромагнитный каскады. При высоких энергиях в ШАЛ могут присутствовать практически все элементарные частицы, но до поверхности Земли доходят преимущественно электроны, мюоны,  $\gamma$ -кванты, нейтрино, черенковское, флуоресцентное и радиоизлучение. В принципе, все они могут регистрироваться. Заряженные частицы ШАЛ на уровне Земли суть вторичные космические лучи, регистрировавшиеся Гессом и другими – в основном это электроны. Релятивистские заряженные частицы ШАЛ и их черенковское излучение приходят на поверхность Земли в пределах небольшого интервала времени, длительность которого зависит от энергии и зенитного угла траектории первичной частицы, и распределяются по площади радиусом до нескольких сотен метров. ШАЛ были открыты Оже, Мазе и Гривет-Мейер в 1938 г. [23], когда они обнаружили, что расположенные на расстоянии многих метров друг от друга детекторы космических лучей часто срабатывают одновременно. К настоящему времени все данные о космических лучах при энергии больше  $10^{15}$  эВ получены путем измерения тех или иных характеристик ШАЛ и последующего восстановления направления прихода, энергии и массы первичной частицы. Последнее осуществляется с использованием различных моделей о взаимодействии ПКЛ с атмосферой и последующем развитии ШАЛ.

Очевидно, что точность определения параметров первичной частицы зависит как от экспериментальной методики, так и от качества используемых теоретических моделей.

Большинство наземных «шаловских» установок представляют собой сеть отдельных детекторов, регистрирующих заряженные частицы или черенковское излучение ШАЛ. Все установки могут быть разбиты на 2 группы: «плотные», в которых расстояние между детекторами не превышает нескольких десятков метров, и «гигантские», в которых расстояние между детекторами составляет сотни метров. Поскольку число регистрируемых событий в первом приближении пропорционально площади установок, плотные установки – KASCADE ( $S=4 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ ) [24], EAS-TOP ( $S=0.1 \text{ км}^2$ ) [25], TIBET ( $S=0.12 \text{ км}^2$ ) [26], KASCADE-GRANDE ( $S=0.5 \text{ км}^2$ ) [27] позволяют более или менее детально изучать структуру ШАЛ в энергетическом диапазоне  $10^{14}$ – $10^{18}$  эВ. Гигантские – Якутск ( $S=10 \text{ км}^2$ ) [28], AGASA ( $S=100 \text{ км}^2$ ) [29], крупнейшая сооружаемая в настоящее время в Аргентине установка AUGER ( $S=3000 \text{ км}^2$ ) [30] – предназначены для изучения ПКЛ ультравысоких энергий.

#### Черенковский метод исследования первичных космических лучей

Во всех перечисленных выше установках регистрируется заряженная компонента ШАЛ. Другой метод изучения ПКЛ высоких энергий состоит в измерении пространственно-временной структуры импульса черенковского излучения релятивистских заряженных частиц ШАЛ, а именно: функции пространственного распределения (ФПР), т.е. зависимости плотности черенковских фотонов от расстояния до оси ливня, и формы импульса, т.е. зависимости числа регистрируемых черенковских фотонов от времени. Экспериментальные данные, полученные при помощи черенковских измерений, в наименьшей степени модельно зависимы, поскольку характеристики потока черенковского света, создаваемого ШАЛ, определяются, в основном, развитием электронно-фотонного каскада, теоретическое описание которого может быть осуществлено с гораздо большей точностью, чем каскада адронов. Кроме того, поток черенковского света является результатом интегрирования по всем глубинам развития каскада в атмосфере, что в значительной мере сглаживает влияние флуктуаций, присущих развитию ливня в атмосфере. Можно сказать, что в этом случае атмосфера играет роль гигантского природного калориметра. Расчеты показывают, что зависимость характеристик черенковского излучения ШАЛ от принятой модели адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействий практически полностью определяется различием предсказываемых глубин максимума развития ШАЛ. Это обстоятельство существенно упрощает анализ экспериментальных результатов и делает его выводы более достоверными. Положение оси ливня и направления его прихода может быть определено из данных о временах срабатывания детекторов и амплитудах импульсов. Полное число черенковских фотонов пропорционально числу релятивистских заряженных частиц ШАЛ, число кото-

рых, в свою очередь, пропорционально энергии первичной частицы. Как показали расчеты [31], для диапазона энергий от 1 до 20 ПэВ и зенитных углов от 0 до 25 градусов энергия первичной частицы  $E_0$  с хорошей точностью может быть определена, например, по величине плотности потока черенковского света  $Q_{175}$ , измеренной на расстоянии 175 м от оси ливня:

$$E_0[\text{ТэВ}] = 370 (Q_{175})^{0.96} [\text{фотон}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{эВ}^{-1}]. \quad (3)$$

Характер продольного развития ШАЛ, в особенности положение его максимума, зависит от массы первичной частицы. В свою очередь, к положению максимума ливня очень чувствительны крутизна ФПР черенковского излучения и длительность импульса света, что можно использовать для изучения массового состава первичных космических лучей [31]. Недостатком черенковского метода является то, что измерения можно вести только в ясные безлунные ночи в местах с высокой прозрачностью атмосферы и удаленных от населенных пунктов. При этом черенковский сигнал от ШАЛ выделяется из фонового свечения звезд с помощью метода совпадений.

### Установка «ТУНКА»

Крупнейшая черенковская установка «ТУНКА» [32] расположена в Тункинской долине (51.49° N, 103.04° E) в 50 км к западу от южной оконечности оз. Байкал, на высоте 675 м над у.м.

Установка состоит из 25 интегральных детекторов на базе полусферических фотоприемников «КВАЗАР-370» диаметром 37 см, развернутых с шагом 85 м в виде квадратной сетки с размером 340×340 м<sup>2</sup> (рис. 2). Фотоприемники «КВАЗАР» (рис. 3) регистрируют фронт сигнала и заряд с временем интегрирования 100 нс. Четыре детектора на базе 8-дюймовых фотоумножителей Thorn-EMI D669 измеряют форму импульса на большом расстоянии от оси ливня. Установка позволяет определять энергию и положение максимума ШАЛ в диапазоне энергий 5·10<sup>14</sup>–10<sup>17</sup> эВ. Одновременное измерение пространственной и временной структуры черенковской вспышки позволяет определять энергию первичных частиц с погрешностью около 15 % и положения максимума атмосферного ливня с погрешностью <30 г/см<sup>2</sup>, что существенно лучше, чем на традиционных установках ШАЛ, регистрирующих только заряженные частицы.

Главные результаты, полученные к настоящему времени на установке «ТУНКА», показаны на рис. 4 и 5 [32]. На рис. 4 представлен дифференциальный энергетический спектр ПКЛ. Ниже 3 ПэВ спектр имеет степенной вид с показателем 2.71±0.01. При энергии выше 6 ПэВ спектр аппроксимируется степенной функцией с показателем 3.22±0.05. В области энергий от 3–6 ПэВ спектр имеет излом и единой степенной функцией не описывается. Сравнение с данными других экспериментов (рис.1, б) показывает, что наши данные находятся в хорошем согласии с данными большинства «плотных» установок.

На рис. 5 приведены зависимости средней глубины максимума развития каскада, полученные на основе результатов анализа формы функции пространственного распределения света (сплошные круж-

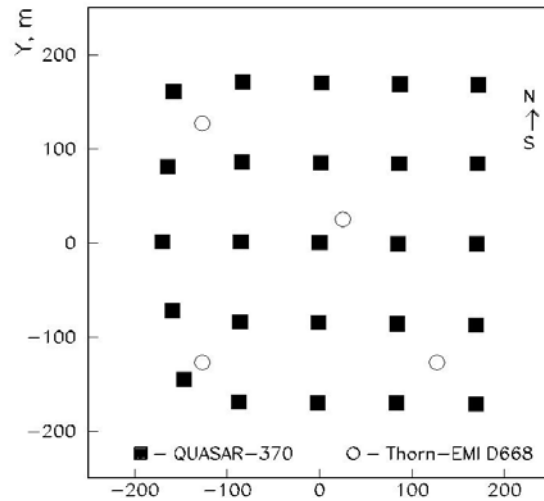


Рис. 2. Схема установки «ТУНКА-25».

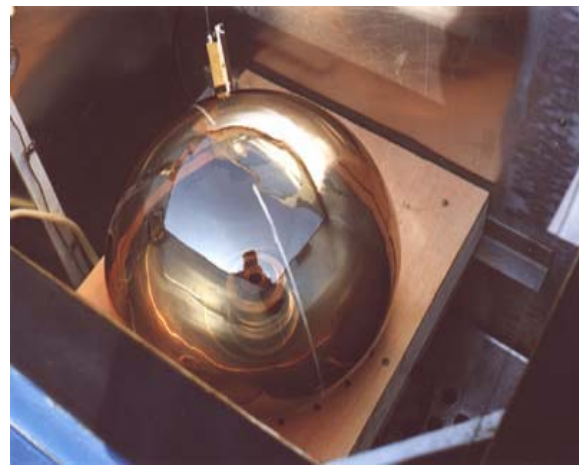


Рис. 3. Детектор на базе фотоприемника «КВАЗАР».

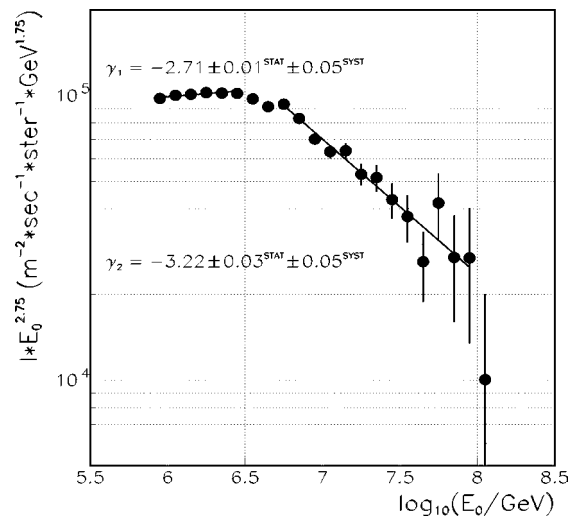


Рис. 4. Дифференциальный энергетический спектр.

ки) (сплошные кружки) и длительности черенковского импульса (пустые кружки). Сплошные и пунктирные линии на рисунке показывают ожидаемую в теоретических моделях адронных взаимодействий зависимость  $X_{\text{max}}$  от энергии для чисто «протонного» и чисто «железного» составов ПКЛ. Значения  $X_{\text{max}}$ , полученные различными методами, хорошо согласуются между собой, а характер зависимости  $X_{\text{max}}$  от энергии



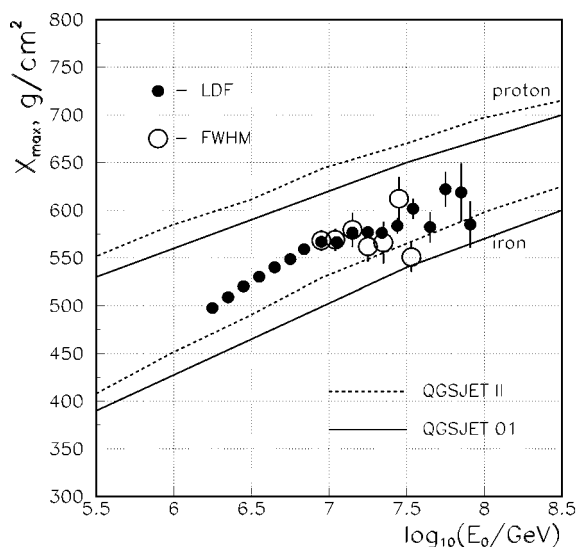


Рис. 5. Средняя глубина максимума ШАЛ.

указывает на «облегчение» массового состава космических лучей в диапазоне  $10^{15}$ – $10^{16}$  эВ и на утяжеление состава при более высоких энергиях. При энергии выше  $10^{16}$  эВ наши данные по массовому составу находятся в хорошем согласии с данными установок KASCADE и EAS-TOР. и расходятся с ними в диапазоне энергий  $10^{15}$ – $10^{16}$  эВ. Данные установок, регистрирующих заряженную компоненту ШАЛ, указывают на утяжеление массового состава в этом диапазоне. Такое различие в оценке поведения массового состава характерно не только для наших данных, но также для других черенковских установок ШАЛ (BLANKA, VULKAN и др.). Это обстоятельство особо отмечалось в одном из докладов на XXIX конференции ICRC по космическим лучам (Индия, 2005). В ближайшие годы планируется увеличить чувствительность установки «ТУНКА» в области энергий  $10^{14}$ – $10^{15}$  эВ с тем, чтобы осуществить «стыковку» с данными, полученными при исследовании космических лучей в экспериментах на высотных аэростатах (ATIC, RUNJOB). Возможно, после этого мы лучше поймем особенности нашей методики изучения массового состава.

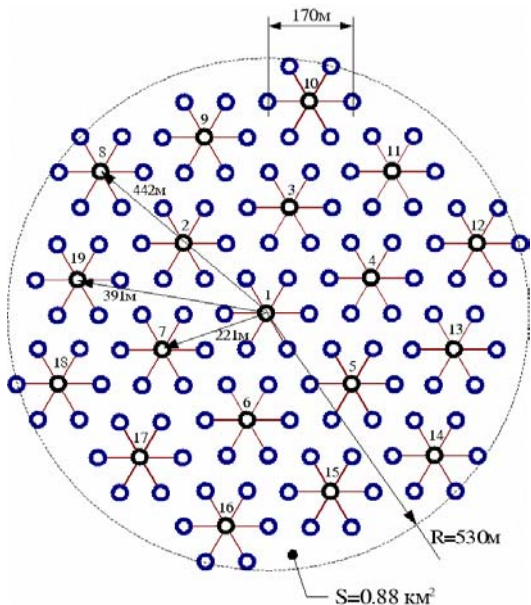


Рис. 6. Схема установки ТУНКА-133.

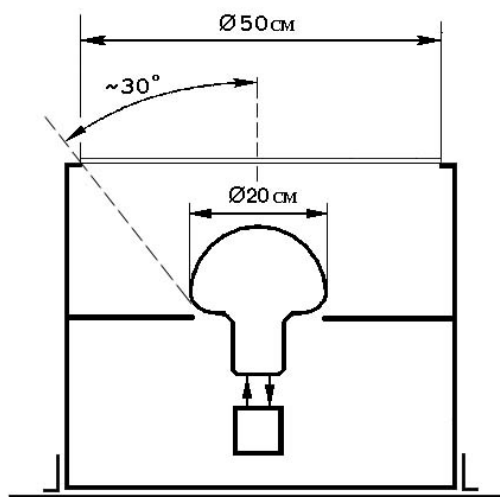


Рис. 7. Оптический детектор.

В настоящее время начаты работы по созданию черенковской установки «ТУНКА-133» [34] с площадью около  $1 \text{ км}^2$ , что в 10 раз больше, чем у существующей установки «Тунка-25». Это позволит продвинуться в область более высоких энергий вплоть до  $10^{18}$  эВ, а также существенно увеличить статистику при меньших энергиях. Установка (рис. 6) будет состоять из 133 детекторов (рис. 7) на базе фотоумножителей ЕМ1 9350 (диаметр фотокатода 20 см), которые будут сгруппированы в 19 кластеров, по семь детекторов в каждом. Расстояние между детекторами, равное 85 м, будет таким же, как и в установке «Тунка-25».

### Заключение

Черенковская методика позволяет измерять энергетический спектр и массовый состав ПКЛ с наилучшей точностью. Уникальные природные условия Тункинской долины – высокая прозрачность атмосферы, большой процент ясных ночей, удаленность от городов, умеренный климат – явились важными природными факторами, обеспечившими успех в создании черенковской установки «Тунка-25». На этой установке получены наиболее точные сведения о ПКЛ в области «колена». В ближайшие годы здесь планируется создать крупнейшую черенковскую установку «Тунка-133» с площадью  $1 \text{ км}^2$ . Проект установки одобрен в конце 2005 г. Научным советом РАН по комплексной проблеме «Космические лучи». Создание установки ТУНКА-133 позволит измерить энергетический спектр в области энергий  $10^{14}$ – $10^{18}$  эВ, и осуществить «стыковку» со спектрами гигантских установок и тем самым улучшить их энергетическую калибровку; проверить наличие второго колена и других возможных неоднородностей в спектре; проследить на одной установке как утяжеление ПКЛ при энергиях  $10^{15}$ – $10^{17}$  эВ, так и его облегчение при энергиях  $>10^{17}$  эВ, т.е. определить область перехода от галактических к метagalactic космическим лучам; исследовать анизотропию направлений прихода космических лучей; осуществить поиск локальных источников гамма-квантов с энергией выше  $10^{15}$  эВ и разработать метод выделения гамма-квантов из диффузного потока космических лучей; изучить возможную

связь между грозowymi явлениями и широкими атмосферными ливнями.

Работа поддержана РФФИ (гранты 02-02-17162, 03-02-16660, 05-02-04010) и Федеральным агентством по науке и инновациям (государственный контракт 02.452.12.7050).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wilson C.T.R. Proc. Cambr. Phil. Soc. 1900. V. 11. P. 52.
2. Geitel H. Phys. Zs. 1900. V. 2. P. 116.
3. Elster J. Phys. Zs. 1900. V. 2. P. 560.
4. Hess V.F. Phys.Zs. 1911.V. 12. P. 998.
5. Hess V.F. Phys.Zs. 1912.V. 13. P. 1084.
6. Скобельцин Д.В. // Zs. Phys. 1927. V. 43. P. 354.
7. Rossi B. Nature. 1930. V. 125. P. 636.
8. Rossi B. Lincei Rend. 1930. V. 11. P. 831.
9. Blackett P.M.S. Occhialini G.P.S. Proc.Roy.Soc. 1933. V. A139. P. 699.
10. Anderson C.D. Phys. Rev. 1932. V. 41. P. 405.
11. Ashie Y. et al. (Super-Kamiokande Collaboration) // Phys.Rev. D. 2005. V. 71. P. 112005.
12. Sinclair D. et al. (SNO Collaboration) // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2004. V. 137. P. 15.
13. Fermi E. // Phys. Rev. 1949. V. 75. P. 1169.
14. Fermi E. // Astrophys. 1954. V. 119. P. 1.
15. Крымский Г.Ф. // ДАН СССР. 1977. Т. 234 С. 1306.
16. Axford W. et al. // Proc 15-th ICRC. Plovdiv. 1997. V. 11. P. 132.
17. Bell A.R., Lucek S.G. // MNRAS. 2001. V. 321. P. 433.
18. Ptuskin V.S., Zirakashvili V.N. // Astron. Astrophys. 2005. V. 29. P. 755.
19. Jokipii J.R., Morfill G.E. // Astrophys. J. 1985. V. 290. P. L1.
20. Кичигин Г.Н. // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. Вып. 6. С. 1038–1049.
21. Greisen K. // Phys. Rev. Lett. 1966. V. 16. P. 748.
22. Зацепин Г.Т., Кузьмин В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 4. С. 114.
23. Auger P., Maze R, Grivet-Meyer T. // Compt. rend. 1938. V. 206. P. 1721.
24. Roth M. et al. // Proc. 28th ICRC. 2003. Tsukuba. Japan. V. 1. P. 139.
25. Valchierotti S. (EAS-TOP Collaboration) // Proc. 28th ICRC. 2003. Tsukuba. Japan.V. 1. P. 151.
26. The Tibet EAS-Collaboration // Proc. 28th ICRC. 2003. Tsukuba. Japan. V. 1. P. 143.
27. Haungs A. (KASCADE-GRANDE Collaboration) // Proc. 28th ICRC. 2003. Tsukuba. V. 5. P. 985.
28. Глушков А.В., Правдин М.И. // ЖЭТФ. 2005. Т. 101. С. 103.
29. Shinozaki K., Teshima M. [AGASA Collaboration] // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2004. V. 136. P. 18.
30. Letessier-Selvon A. [Auger Collaboration] // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2005. V. 138. P. 313.
31. Буднев Н.М. и др. // Известия РАН. Сер.физ. 2005. Т. 69. № 3. С. 343–346.
32. Budnev N.M. et al // Proc. 27th ICRC. 2001. Hamburg. V. 1. P. 581.
33. Budnev N. et al. Astro-ph/0511215.
34. Буднев Н.М. и др. // Известия РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 3. С. 347–349.

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет

<sup>2</sup>НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцина Московского государственного университета

<sup>3</sup>Институт ядерных исследований РАН

<sup>4</sup>ДЕЗИ-Цойтен, Германия