

Российская академия наук Сибирское отделение
УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ИНСТИТУТ
КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И АЭРОНОМИИ
им. Ю.Г. ШАФЕРА
(ИКФИА СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИКФИА СО РАН
к.ф.-м.н.



В. К. Елшин

2015 г.

**Программа развития Якутской комплексной установки широких
атмосферных ливней (ШАЛ) на 2015-2017 годы**

Научный руководитель
Зав. лаборатории ШАЛ
д-р физ.-мат. наук,

И. Е. Слепцов

Якутск 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Краткое описание и этапы создания Якутской установки ШАЛ.....	5
1.1. Основные параметры установки в настоящее время	9
1.2. Точность определения индивидуальных параметров ШАЛ.....	10
2. Дополнительные эксперименты на Якутской установке.....	12
2.1. Малая черенковская установка.....	12
2.2. Большой мюонный детектор	14
2.3. Описание черенковского дифференциального детектора	15
3. Цели и задачи модернизации Якутской установки ШАЛ	18
4. Логика работы модернизированной Якутской установки ШАЛ	20
4.1. Структура предлагаемой системы регистрации событий на Якутской установке ШАЛ 20	
4.2. Первичная регистрация данных индивидуальных детекторов и их точная временная привязка	21
4.3. Система синхронизации станций	23
4.4. Асинхронная система передачи данных со станций в центр обработки.....	24
4.5. Центральный регистратор.....	25
4.6. Модернизация дополнительных экспериментов	25
4.7. Состояние разработок в настоящее время.....	26
5. Развитие системы детекторов Якутской установки.....	28
5.1. Система регистрации радиоизлучения ШАЛ.....	28
5.2. Разработка дифференциального детектора черенковского излучения кругового обзора.....	29
5.3. Система быстродействующих детекторов формы сигнал от черенковского излучения ШАЛ.....	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	33
ЛИТЕРАТУРА	34

ВВЕДЕНИЕ

Якутская комплексная установка широких атмосферных ливней является стационарным научно-исследовательским полигоном института космофизических исследований и аэронавтики (ИКФИА) им. Ю.Г.Шафера СО РАН, который расположен в долине реки Лены в 55 км южнее г.Якутска (61.7° с. ш., 129.4° в.д., 110 м над уровнем моря). Проект установки [1,2,3] разрабатывался в ИКФИА под руководством Д.Д. Красильникова при участии специалистов Физического института им. П.Н. Лебедева (руководитель - С.И. Никольский) и научно-исследовательского института ядерной физики МГУ (руководитель - Г.Б. Христиансен). Строительство установки, ее поэтапный ввод в действие были начаты в 1966 г.

На Якутской установке свойства КЛ сверхвысоких энергий изучаются более 35 лет. В настоящее время она является самой большой в России и остается одной из крупнейших установок в мире. Основное и существенное отличие Якутской установки от аналогов – комплексность измерений характеристик ШАЛ в области энергий $10^{15} - 10^{20}$ эВ. Только на Якутской установке реализовано одновременное измерение трех главных компонент ливня – потока электронов, мюонов и атмосферного излучения Вавилова-Черенкова от частиц ШАЛ.

За период работы установки накоплен уникальный экспериментальный материал по регистрации широких атмосферных ливней, инициированных КЛ сверхвысоких энергий, и получены приоритетные результаты о форме энергетического спектра и изменении состава с ростом энергии, подтвержденные данными зарубежных установок ШАЛ.

В настоящее время перед действующими и проектируемыми установками ШАЛ ставятся задачи детального исследования формы энергетического спектра и количественного определения состава КЛ. Остается актуальным и исследование анизотропии как одной из его основных характеристик, непосредственно связанных с проблемой происхождения космических лучей. Для решения этих задач необходимо существенное расширение экспериментальных возможностей и улучшение точности измерений на установках ШАЛ.

Для получения качественно новых результатов программа развития Якутской установки ШАЛ на 2015 – 2017 гг. предусматривает модернизацию электроники станции наблюдения, системы сбора информации и отбора событий, которая позволит улучшить точность определения параметров в индивидуальных событиях и сможет обеспечить длительные наблюдения для получения достаточной статистики. Кроме этого

разрабатываются и внедряются новые детекторы, которые позволяют получать данные о развитии ливня в атмосфере.

1. Краткое описание и этапы создания Якутской установки ШАЛ

Основу Якутской установки составляют отдельные станции наблюдения, в которых установлено по 2 сцинтилляционных счетчика площадью 2 м^2 каждый и приемник черенковского излучения на основе одного или нескольких фотоумножителей ФЭУ-49 (диаметр фотокатода 15 см). На рис.1.1 приводится схема расположения станций и других детекторов установки[4] . На рис. 1.2 показано размещение детекторов на отдельной станции.

Логическая схема регистрации ливней разработана по принципу автономных измерений на станциях наблюдений. Электроника мастерной станции наблюдения представляет собой автоматически работающее устройство с амплитудными и временными анализаторами. Одновременное срабатывание обоих детекторов заряженных частиц является локальным триггером для обработки информации на станции. Разрешающее время схемы совпадения равно 2 мкс. При этом производится преобразование сигналов от детекторов в цифровой код и запоминание его в буферной памяти. В этот же момент по линии связи в центральное регистрирующее устройство (центральный регистратор) посылается сигнал для отбора ливней.

Преобразования аналоговых сигналов от счетчиков частиц в цифровой код производится с помощью логарифмических RC-преобразователей. Интегрирование заряда с ФЭУ на входной RC цепочке (постоянная времени - 11-14 мкс) производится в течении 2 мкс, после чего вход закрывается. Динамический диапазон такого преобразователя 10^4 , что обеспечивает измерение плотности заряженных частиц от 0.5 м^2 до $(1.5-2) \cdot 10^3 \text{ м}^2$, так как порог меньше среднего отклика на одну частицу. Точность измерения заряда со счетчика около 10% по всему диапазону. В каналах для приемников черенковского излучения используются логарифмические преобразователи на основе LC - контура со временем интегрирования около 0.5 мкс. Остальные характеристики такие же, как и у RC – преобразователей. Для определения направления прихода первичной частицы в каждой станции с точностью 100 нс измеряется отрезок времени с момента регистрации первой частицы из всех прошедших через счетчики до очередного синхроимпульса установки. Синхронизирующие сигналы непрерывно подаются установленным в центре радиопередатчиком с периодом в 100 мкс. На станциях имеются приемники этих сигналов.

В центре установки в непрерывном режиме работает центральный регистратор, который осуществляет отбор ливней, накопление информации, управление и контроль за работой установки . Отбор ливневых событий производится при одновременном срабатывании трех соседних станций, образующих треугольник. Разрешающее время

схемы совпадения равно 40 мкс. При выработке мастера установки осуществляется опрос всех станций и детекторов, подключенных к центральному регистратору. Информация от станций и команды из центра на станции передаются по радиочастотному кабелю или по воздушной линии связи.

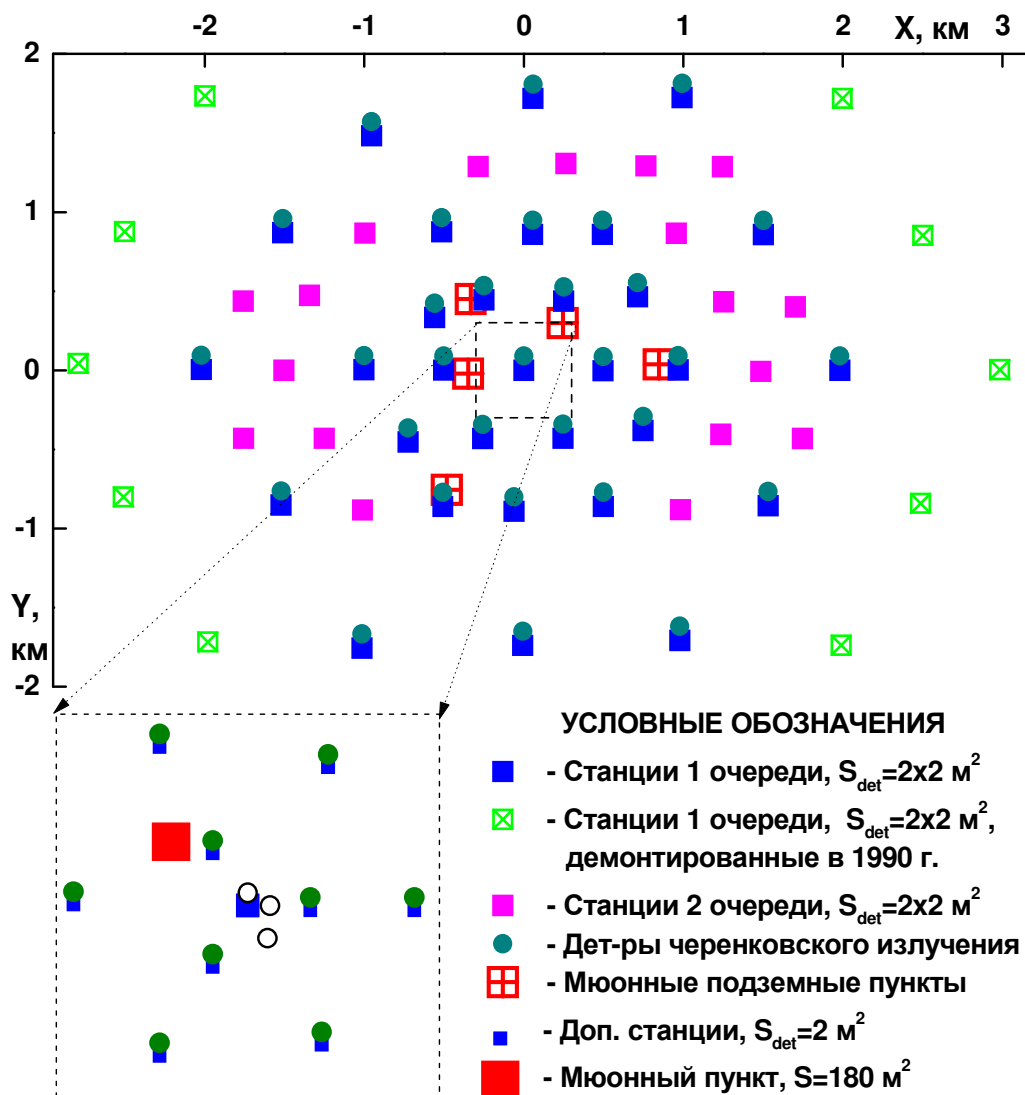


Рис.1.1. План размещения детекторов Якутской комплексной установки ШАЛ

За более 30 лет работы установки заложенная в первоначальном проекте общая схема измерений не претерпела существенных изменений. По мере появления новой элементной базы совершенствовалась электроника станции наблюдения и центральной регистрирующей системы. Если в первые годы работы установки центральный регистратор информацию о ливне фиксировал с помощью телеграфного аппарата, затем перфоратора, то в последующем вся процедура регистрации проводилась под

управлением и контролем ЭВМ. С 1995 года для этой цели стали использоваться персональные компьютеры.

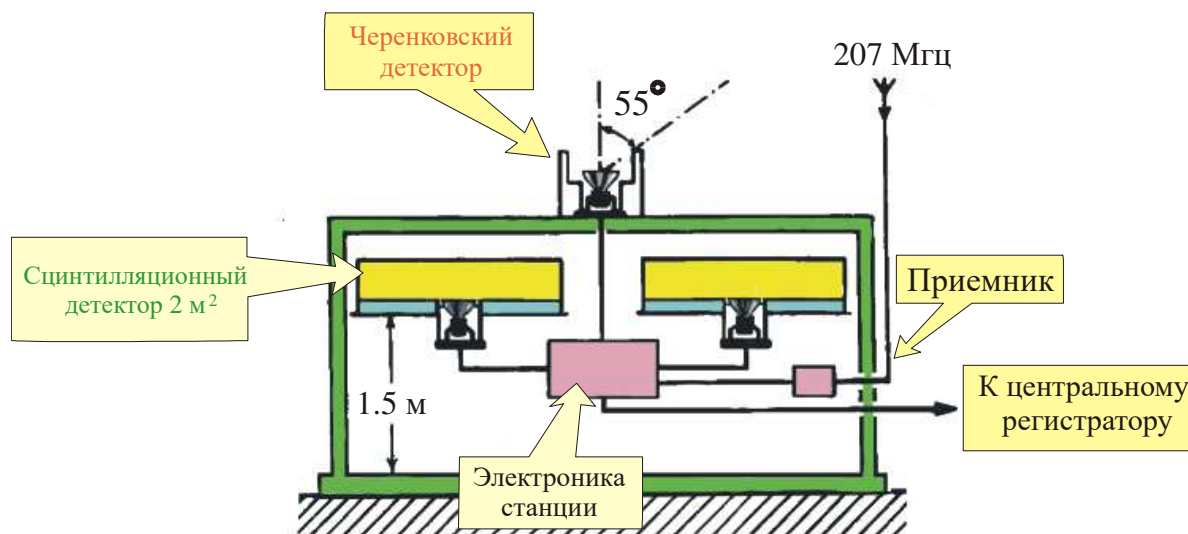


Рис. 1.2. Станция наблюдений установки Якутской установки ШАЛ

В процессе развития и модернизации установки количество мастерных станций и их расположение менялось. Прототип из 13 станций, расположенных в круге радиусом 1 км, был запущен на регистрацию в декабре 1970 г. В дальнейшем эти станции составили центральное ядро, вокруг которого шло расширение установки. С 1973 г. первая очередь установки начала действовать по полной программе. На этот момент полная площадь установки составляла более 17 км². С самого начала Якутская установка создавалась как комплексный детектор широких атмосферных ливней. Помимо традиционной регистрации основных компонент ливня, впервые в мире на Якутской установке реализовано систематическое исследование излучения Вавилова-Черенкова в атмосфере (черенковское излучение) частицами ШАЛ с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ. Измерения черенковского излучения ведутся с самого начала работы прототипа, и они значительно расширились с запуском первой очереди. С 1976 г. проводятся регулярные измерения мюонной компоненты ШАЛ

В 1973 г. триггерная система включала 35 станций. 29 из них расположены так, чтобы образовывалась сетка из правильных треугольников со стороной 1000 м. 40 таких треугольников на площади 17 км² составляли, так называемый триггер-1000. Такой триггер эффективно начинает отбирать события с пороговой энергией около $2-3 \times 10^{18}$ эВ. Остальные 6 станций расположены на расстоянии 500 м от центральной станции, вместе с которой образовывали отдельный триггер-500 с порогом меньше 10^{17} эВ. В 1979 г. были

добавлены 6 станций на расстоянии 1 км от центра, в результате чего общая площадь для малого триггера-500 достигла 3 км².

При реконструкции 1990-1992 гг. из-за демонтажа самых удаленных станций наблюдения общая площадь их размещения уменьшилась до 12 км², но их количество возросло почти в 1.5 раза. Сейчас 49 станций, участвующих в отборе событий, расположены в круге радиусом 2 км. В центральном круге радиусом 250 м в различных пунктах установлены еще 9 сцинтилляционных счетчиков по 2 м², которые не участвуют в отборе ливней, а используются для измерения плотности заряженных частиц.

Размещение детекторов черенковского излучения также менялось со временем. Сейчас они установлены на 19 станциях в круге радиусом 1 км, и еще 12 дополнительных детекторов расположены в самом центре.

Измерение в ливнях потока мюонов с пороговой энергией 1 ГэВ на Якутской установке начались на одном детекторе площадью 8 м² одновременно с запуском первой очереди установки. В 1976 г. были созданы 3 подземных пункта площадью 36 м² каждый. Сейчас работает 5 подземных пунктов, размещенных в центральном круге радиусом 1 км. В последние годы создан и запущен в эксплуатацию большой мюонный детектор (БМД) площадью 180 м².

До начала 1990 г. на установке совместно с НИИЯФ МГУ изучалась форма импульса черенковского излучения для получения характеристик продольного развития ШАЛ. Для этих исследований использовались ФЭУ с хорошим временным разрешением и анализаторы формы импульса, выполненные в стандарте КАМАК. Черенковские детекторы формы импульса располагались в центральной части установки. Чтобы получить данные при энергиях меньше, чем 10¹⁷ эВ, в этом эксперименте был создан независимый триггер, отбирающий события с энергией 10¹⁵-10¹⁶ эВ по совпадению сигналов от интегральных черенковских детекторов. С помощью такого триггера, кроме данных о развитии ШАЛ, был определен энергетический спектр в интервале 3x10¹⁵ - 10¹⁷эВ.

До 1987 г. в составе Якутской установки функционировал нейтронный монитор NM-64. Он работал в обычном режиме для получения данных по вариациям космических лучей. Кроме этого специальные электронные каналы регистрирующей системы позволяли измерять отклик монитора на ядерно-активные частицы в ливневых событиях. Благодаря этому был измерен поток низкоэнергичных адронов на больших расстояниях от оси.

Кроме перечисленных регулярных измерений различных компонент ливня на Якутской установке ШАЛ проводились также поисковые эксперименты, в том числе измерялось радиоизлучение от ливней с $E_0 > 10^{17}$ эВ.

1.1. Основные параметры установки в настоящее время

Весной 2010 г. ледоходом были унесены 3 станции наблюдения, включенных только в триггер-1000, а также разрушены линии связи к ним. Было решено эти три станции перенести, с таким расчетом, чтобы вся площадь установки была покрыта треугольниками триггера-500. На рис. 1.3 представлено размещение 49 станций, участвующих в отборе событий. Они составляют 74 треугольника, которые теперь образуют триггер-500 Якутской установки. Полная площадь установки уменьшилась и составляет 8.2 км^2 .

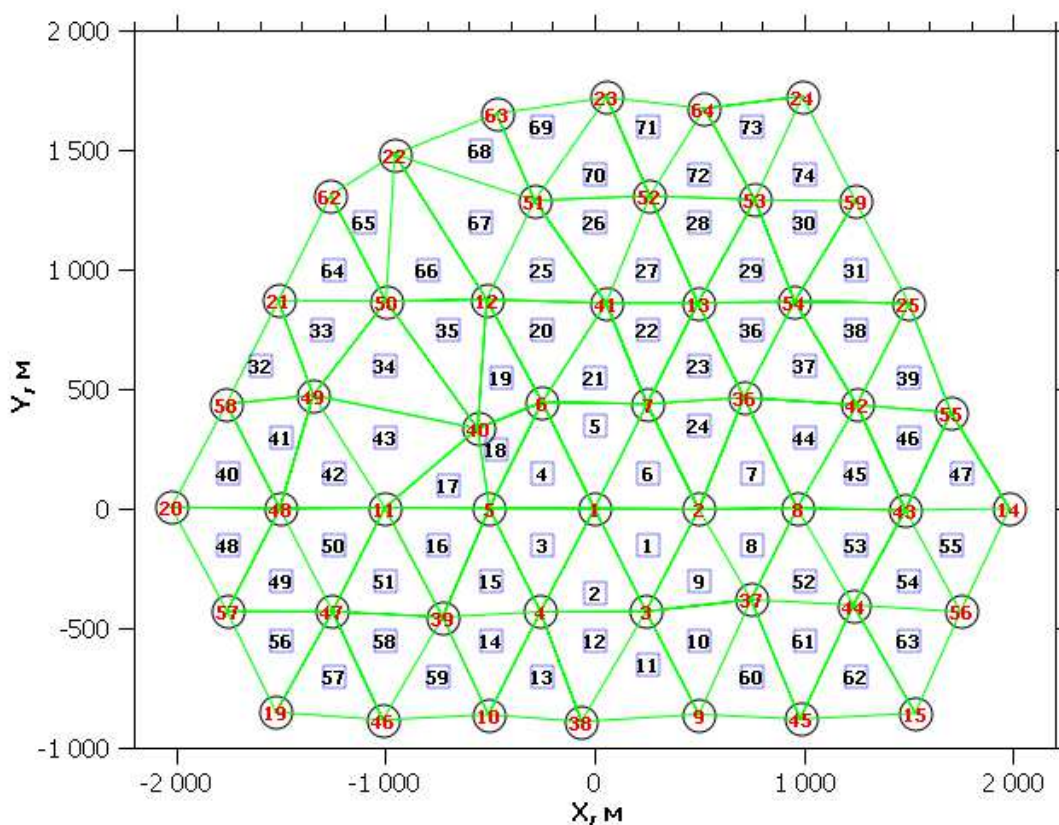


Рис. 1.3. Схема триггера-500 Якутской установки в настоящее время

В каждой станции установлено по 2 сцинтилляционных детектора по 2 м^2 . Кроме того в пунктах сгущения, расположенных в 250 м круге от центра, установлены еще 9 таких детекторов. Всего на Якутской установке имеется 107 детекторов для измерения потока заряженных частиц в ливне. Диапазон измерения плотности заряженных частиц сцинтилляционными детекторами на станциях наблюдения составляет $(0.5 - 3 \cdot 10^3) \text{ м}^{-2}$, а

для детекторов сгущения ($\approx 2 - \approx 2 \cdot 10^4$) м^{-2} . Относительная аппаратурная точность с учетом всех ошибок равна 15% по всему диапазону.

На мастерных станциях время прихода фронта ливня относительно синхроимпульса установки измеряется от момента появления первой заряженной частицы из всех зарегистрированных обоими счетчиками с точностью 100 нс.

Черенковские детекторы установлены на 19 мастерных станциях в круге радиусом 1 км и еще 12 в различных пунктах центрального сгущения. Используются детекторы двух типов: первый тип имеет 1 ФЭУ с площадью фотокатода 176 см^2 , второй тип – 3 таких ФЭУ и соответственно его площадь равна 530 см^2 . Для черенковских детекторов первого типа плотность фотонов измеряется от 60 см^{-2} до $60 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, для второго типа в диапазоне $(30-30 \cdot 10^4) \text{ см}^{-2}$ с относительной точностью (10-15)%.

Поток мюонов с энергией выше 1 ГэВ в ливнях измеряется в 5 подземных пунктах. Два из них расположены на расстоянии около 500 м от центра, а остальные три удалены приблизительно на 1000 м. В них установлены такие же, как в наземных станциях, или подобные сцинтилляционные счетчики. Общая площадь регистрирующих детекторов в трех пунктах составляет 20 м^2 и в двух 20.25 м^2 . Диапазон измерения плотности мюонов в каждом пункте – от 0.05 м^{-2} до 500 м^{-2} , аппаратурная точность 15%.

1.2. Точность определения индивидуальных параметров ШАЛ

Направление прихода первичной частицы в стандартной процедуре обработки данных определяется в предположении, что диск ливня представляет собой плоский фронт. Ошибка определения направления прихода ливня и зенитного угла зависит от аппаратурной точности измерения времени на станциях наблюдения, распределения частиц в ливневом диске на разных расстояниях от оси ливня и количеством сработавших детекторов. В таблице 1.1 приведены оценки угловых ошибок для зенитного и полного углов при определении направления для разных энергий. Из таблицы видно, что до 10^{19} эВ в основном ошибки определяются возможностями аппаратуры, т.е. точностью определения момента прихода частиц ливня на детекторы.

Выше 10^{19} эВ неопределенность из-за плоского приближения становится сравнимой с аппаратурным вкладом. Распределение частиц в диске ливня на разных расстояниях от оси для разных энергий и зенитных углов экспериментально плохо измерено. При моделировании этого распределения использовалось предположение, что средний радиус кривизны зависит от геометрического расстояния до максимума развития ливня. Эта модель точно не отражает реальное распределение, но может служить для

верхней оценки ошибки определения угла, возникающей из-за пренебрежения структурой фронта в стандартной процедуре.

Таблица 1.1. Оценка точности определения направлений прихода ливней для разных энергий.

Энергия, эВ	Ошибка определения угла		Вклад аппаратуры	
	Зенитного	Полного	Зенитный	Полный
$3 \cdot 10^{17}$	6.2	8.5	6.0	8.3
10^{18}	4.5	6.6	4.4	6.5
$3 \cdot 10^{18}$	2.9	3.9	2.8	3.8
10^{19}	2.1	2.8	1.5	1.9
$3 \cdot 10^{19}$	2.1	2.8	0.8	1.0

Определение координат оси проводится по средней функции пространственного распределения (ФПР) заряженных частиц. Для описания формы ФПР используется аппроксимация Грейзена-Линсли

$$(R) = C \cdot (R/R_0)^{-a} \cdot (1+R/R_0)^{-(b-a)},$$

где R – расстояние от оси ливня, а R_0 – мольеровский радиус (масштабный коэффициент), величина которого определяется атмосферным давлением и температурой воздуха.

Усредненные ошибки определения координат оси ливня для разных энергий представлены в таблице 1.2. В ней приведены оценки, полученные для ливней оси которых попадают в эффективную площадь триггера-500, где расстояние между соседними станциями равно 500 м. Для первой очереди установки на площади, где имелись только станции триггера-1000, ошибка определения координат оси составляла 50-70 м. Ошибка определения параметра S_{600} - плотности потока частиц на расстоянии 600 м от оси ливня около 20%. Если ось находится за пределами контура установки, точность ее определения ухудшается в 2-3 раза.

Таблица 1.2. Ошибки определения координат оси и параметра S_{600} для разных энергий

Энергия, эВ	Ошибка координат, м	Относительная ошибка S_{600}
$2 \cdot 10^{17}$	49	0.25
10^{18}	32	0.19
$5 \cdot 10^{18}$	28	0.18
10^{19}	28	0.17

2. Дополнительные эксперименты на Якутской установке

Кроме основной программы наблюдений на Якутской установке в настоящее время проводятся дополнительные эксперименты, которые позволяют расширить возможности исследования свойств ШАЛ. К ним относятся:

- Малая черенковская установка (МЧУ) для исследования космических лучей в области 10^{15} - 10^{17} эВ, объединяющая черенковские и сцинтилляционные детекторы в центральном круге радиусом 250 м.
- Большой мюонный детектор (БМД) площадью 180 м^2 , с пороговой энергией мюонов 0.5 ГэВ;
- 3 комплексных станции для изучения продольного развития ливня (Обскура 1,2,3), которые включают дифференциальный черенковский детектор (ЧДД) на основе камеры обскура.

2.1. Малая черенковская установка

На станциях сгущения, расположенных в круге радиусом 250 м от центра, используется другой по сравнению с мастерными способ передачи информации. В самих пунктах, где расположены индивидуальные детекторы, оставлены только РС или LC – преобразователи и схемы для согласования выхода преобразователя с кабелем, который соединяет его с центром. Сигналы от преобразователей по кабелю и через схемы согласования поступают на регистры, установленные в центральном регистраторе. Все функции - квантование длительности импульса РС, запоминание, хранение и передача информации в ливнях осуществляются с помощью таких регистров.

Сцинтилляционный счетчик и детектор черенковского излучения, установленные на одной и той же станции сгущения, работают независимо друг от друга. Это позволило создать малую автономную черенковскую установку с помощью отдельного регистратора, используя параллельный вход сигналов от этих станций. Регистратор МЧУ выполнен в стандарте КАМАК, в нем установлены собственные регистры, позволяющие обрабатывать входные сигналы от подключенных детекторов. Для управления установлена отдельная ЭВМ, которая накапливает данные по малым ливням и контрольную информацию независимо от главного ЦР.

Для того, чтобы определять направление прихода в ливнях, зарегистрированных МАЧУ, на детекторах была добавлена специальная электроника, позволяющая формировать быстрый сигнал и передавать его по тому же кабелю перед пачкой от LC – преобразователя к дополнительному регистратору, где и проводятся временные

измерения. В основном ЦР, как и первоначально, используются только амплитудные данные.

Таким образом, центральные детекторы Якутской установки составляют независимую установку, в которой ливни с энергией выше 10^{15} эВ отбираются по потоку черенковского излучения, а с помощью сцинтилляционных детекторов возможно измерение потока заряженных частиц.

На рис. 2.1 показан план малой установки. Она состоит из 15 черенковских детекторов с разной приемной площадью: 1 тип имеет площадь фотокатода 176 см^2 , 2 тип - 530 см^2 и 10 сцинтилляционных детекторов площадью 2 м^2 каждый. Пункты наблюдения удалены друг от друга на 50, 100, 250 м. Вблизи периметра черенковской установки находятся и несколько пунктов регистрации мюонной компоненты. Детекторы станций, расположенные на расстоянии 500 м от центра, не подключены непосредственно к автономному регистратору, но их данные используются при обработке событий одновременно зарегистрированными обоими установками.

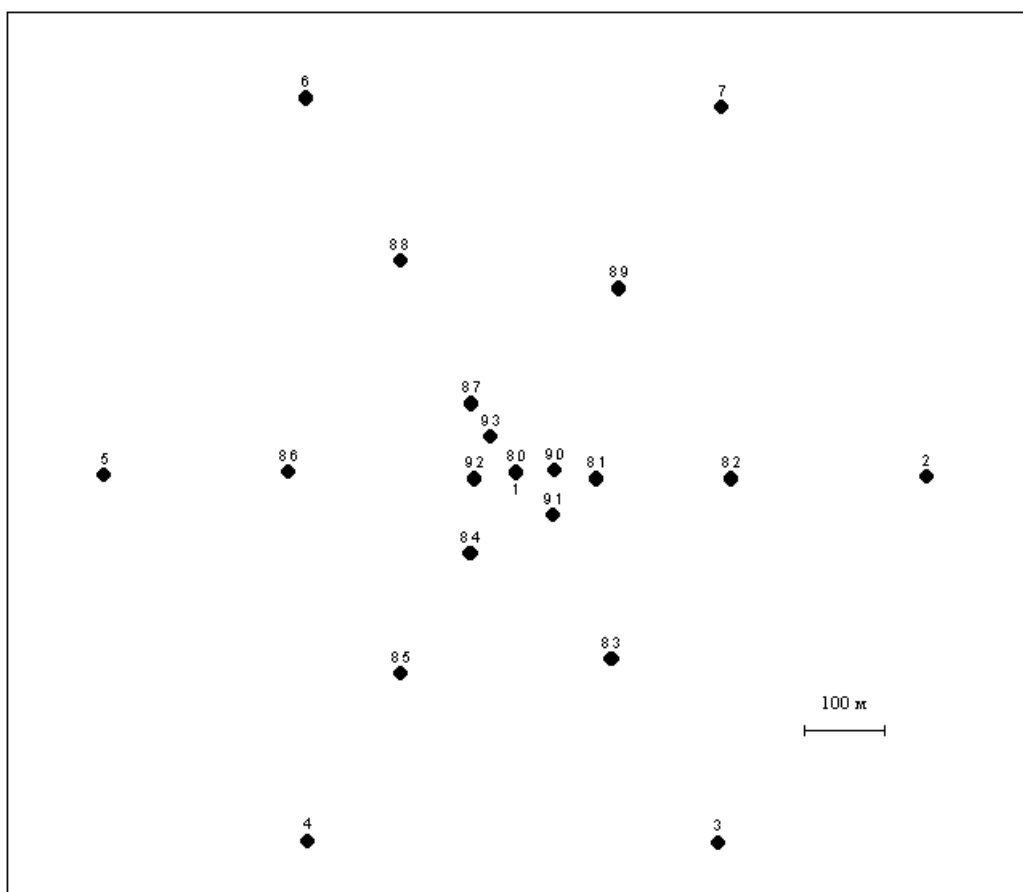


Рис.2.1. Расположение пунктов наблюдения на малой черенковской установке.

В качестве приемников черенковского света ШАЛ используются серийные фотоумножитель ФЭУ-49. Пороги приемников света устанавливались с учетом реальной фоновой засветки и отдельно для каждого типа детектора. При этом минимальные

плотности потока черенковского света составляют для первого детектора $Q = 60$ фот./см², а для второго $Q = 30$ фот./см², что соответствует пороговым энергиям 10^{15} эВ и $8 \cdot 10^{14}$ эВ согласно расчетам [5] для протона и расстояния $R = 300$ м от оси ливня.

Триггерная система отбирает события при совпадении сигналов от трех детекторов, расположенных в вершинах треугольников со сторонами в 50, 100 и 250 м. Разрешающее время для трехкратных совпадений равно 2.5 мкс. Для надежной регистрации ливней в условиях переменной засветки для отбора событий используются только сигналы от триггерных детекторов, которые превышают уровень шума не менее, чем в 3 раза. Это несколько увеличивает пороговую энергию регистрируемых ливней.

Для определения направления прихода ливней производится измерение времени от момента срабатывания детектора до внутреннего синхроимпульса таймерной системы. Сигнал "стоп" вырабатывается в самом регистраторе МАЧУ и не связан с синхроимпульсами основной установки. Частота заполняющего генератора для измерения интервал времени в настоящее время составляет 16.6 МГц.

2.2. Большой мюонный детектор

Для измерения плотности мюонов и их временного распределения во фронте ливня на больших расстояниях от оси на Якутской установке создан большой мюонный детектор (БМД). БМД состоит из 92 сцинтилляционных счетчиков площадью 2 м², аналогичных используемым на наземных станциях. Они расположены шестью рядами в подземном пункте размером 26x12 м, который находится на расстоянии 180 м от центра установки (рис. 2.2.). Энергетический порог регистрируемых мюонов в ливнях составляет ≈ 0.5 ГэВ.

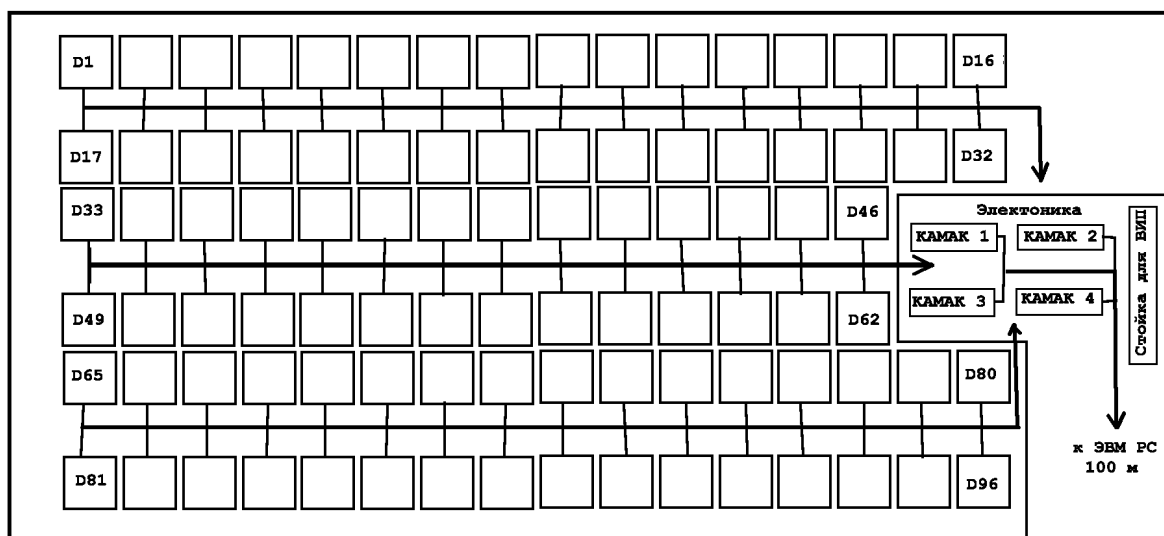


Рис.2.2. План расположения сцинтилляционных детекторов в помещении БМД.

В этом детекторе для каждого счетчика независимо от остальных производится измерение амплитуды сигнала и времени срабатывания относительно синхроимпульса основной установки с точностью 5-7 нс. Измерение с хорошей точностью времени прихода отдельных мюонов позволяет получать информацию о их временном распределении во фронте ливня на больших расстояниях от оси. Вся основная электроника расположена в четырех стойках внутри БМД в специально отгороженном зале. Там же расположены высоковольтные источники для питания ФЭУ.

Отдельный компьютер, который осуществляет контроль работы, калибровку детекторов, вывод и хранение информации с БМД расположен в лабораторном корпусе. Обмен информацией между компьютером и электроникой в подземном помещении осуществляется с помощью двух последовательных драйверов, которые имеют по 6 линий связи каждый. Последовательный контроллер К16П каждого крейта электроники подсоединяется к определенной линии драйвера кабелем длиной около 100 м. Сигнал о ливне, зарегистрированном основной установкой ШАЛ, с центрального регистратора поступает в электронику БМД по специальному кабелю. По этому сигналу вырабатывается прерывание для компьютера, работающего с БМД. Такое событие записывается всегда, независимо от того есть или нет сработавшие детекторы в БМД.

Кроме проведения измерений в качестве отдельного детектора для событий, отбираемых основной установкой, электроника БМД имеет собственную триггерную систему, позволяющую регистрировать локальные ливни в области 10^{15} эВ.

2.3. Описание черенковского дифференциального детектора

Три комплексных станций Обскура 1,2,3 предназначены для исследования продольного развития и структуры фронта ливня. В них установлены наземные и подземные сцинтилляционные счетчики, с которых в ливнях регистрируется форма сигнала с 10 нс разрешением. Для исследования продольного развития в индивидуальных ливнях создан принципиально новый дифференциальный детектор для регистрации черенковского излучения на основе камеры обскура [6].

Черенковский дифференциальный детектор (ЧДД) состоит камеры и фотомозаики (рис. 2.3). Камера представляет собой светогерметичное помещение. Стены помещения затемнены, чтобы не было отражений света. На потолке имеются две параллельные между собой щели. Фотомозаика состоит из 8 ФЭУ, расположенных вдоль перпендикулярной к щелям линии посередине между ними. Фотокатоды всех ФЭУ расположены в одной плоскости, которая параллельна к плоскости щелей.

Разные ФЭУ в фотомозаике видят трек ливня через щель на разных высотах. Амплитуда сигнала на ФЭУ зависит от первичной энергии ШАЛ и расположения ливня в пространстве, т.е. координат оси ливня в плоскости установки и направления прихода. Таким образом на мозаике формируется профиль эмиссии черенковского излучения по высоте атмосферы, отражающий картину продольного развития ливня.

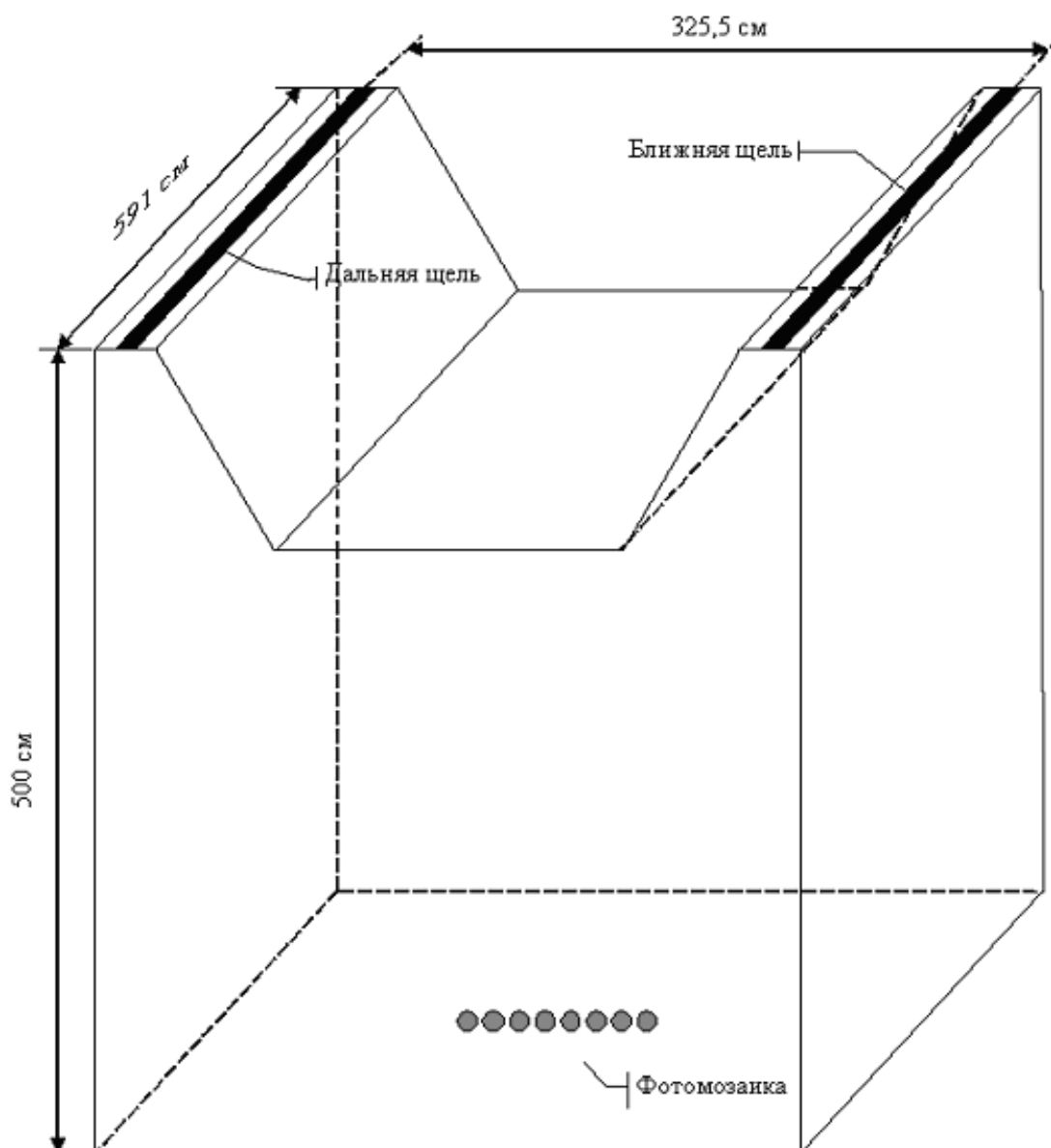


Рис. 2.3. Камера ЧДД

Важное преимущество ЧДД по сравнению с интегральными черенковскими детекторами - это существенное подавление шума ночного неба. Низкий шумовой уровень определяется маленькой областью обзора для каждого ФЭУ фотомозаики. Регистрация черенковского света с помощью дифференциального детектора увеличивает

время наблюдения ливневых событий, так как детектор может работать в сумерках и в лунные ночи.

С каждого ФЭУ регистрируется форма сигнала. Для этого используется промышленный составной компьютер класса Пентиум– 4 повышенной надежности и объединительной платой с 19-тью PCI-слотами. В PCI-слоты вставлены платы Ла-н10м8 PCI с двумя быстрыми 8-разрядными АЦП с частотой дискретизации 100 МГц и буферной памятью 2 Мбайта. Компьютер рассчитан на 20 АЦП. Каждый АЦП постоянно измеряет входную амплитуду от ФЭУ и записывает ее в буферную память в циклическом режиме.

Импульсные сигналы об отборе ливней, как от основной установки, так и от малой черенковской поступают по одному кабелю, но различаются по длительности. С приходом мастера от светодиода подается калибровочный импульс, который для каждого ФЭУ записывается вместе с данными. По программе регистрации данные из буферной памяти всех АЦП считываются в память компьютера, вместе со служебной информацией (дата, время, номер кадра и т.д.) представляются в виде кадра на экране и записываются в выходной файл. Кадр делится на 2 части: «предыстория» - время до появления мастера и «история» - изображение после него. Полезный сигнал от ливней попадает в область «предыстории». Задержка мастерных сигналов от регистраторов ливней от момента появления ливня различается для разных событий, но не превышает 50 мкс, поэтому в 10000 мкс развертку полезный сигнал заведомо попадает.

Идентификация событий при обработке данных, т.е. определение какому ливню соответствует определенный кадр, осуществляется по времени регистрации. Для точной привязки системное время компьютера ЧДД, так же как компьютеров всех других регистраторов, синхронизируется с системным временем локальной сети, которое поддерживается специальным сервером времени с помощью GPS – приемника.

3. Цели и задачи модернизации Якутской установки ШАЛ

На сегодня получено большое количество результатов по средним характеристикам ШАЛ, которые заложили прочную базу для дальнейшего, более глубокого изучения проблемы происхождения КЛ сверхвысоких энергий. В настоящее время для получения качественно новых результатов необходимо комплексное измерение ФПР электронов, мюонов и черенковского излучения ШАЛ в индивидуальных ливнях с хорошей технической и статистической точностью. Это даст возможность с помощью многопараметрического анализа более детально определять энергетический спектр первичных частиц и получать наиболее точные оценки состава первичного излучения. Кроме того появляется возможность изучать свойства первичных частиц применительно к небольшим участкам неба и отдельным точечным источникам. Уже сейчас имеется указание, что характеристики ШАЛ зависят от того, из каких направлений приходят космические лучи.

Для обеспечения дальнейшего функционирования Якутской установки ШАЛ и повышения ее эффективности требуется, в первую очередь, провести замену ее морально и физически устаревших узлов электроники на современные на основе новых технологий. При этом необходимо одновременно решить задачу существенного улучшения основных характеристик установки и усовершенствовать методику сбора и обработки данных, повысить контроль качества данных от всех детекторов.

На станциях наблюдения предполагается повысить точность измерения плотности частиц и времени их прихода на каждом детекторе. Ошибку измерения времени прихода частиц необходимо уменьшить до 10-15 нс, вместо 100 нс, существующую в работающем временном канале. Это позволит сократить вклад аппаратурных ошибок в неопределенность направления прихода частиц в ≈ 5 раз. Для ливней с энергией около 10^{18} эВ на сегодня аппаратурный вклад в общую ошибку направления является определяющим и составляет $4-5^\circ$. Уменьшение этой ошибки в 5 раз дает возможность получать направление прихода с точностью около 1° , которая, в основном, будет определяться структурой фронта ливня, а не возможностями электроники.

Улучшение точности угловых координат ливней позволит на новом качественном уровне проводить исследования по изучению мелкомасштабной анизотропии первичного излучения (поиск кластеров) во всем диапазоне энергий, а также поиск точечных источников нейтральных частиц по избыточному потоку от вероятных объектов. Кроме того существенно повышается точность анализа зарегистрированных под большим зенитным углом событий (и в первую очередь оценка первичной энергии), так как

значительно уменьшается неопределенность толщины атмосферы, которую проходят такие ливни.

Для измерения плотности частиц разработан новый амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП), который должен обеспечить измерение интегрального импульсного сигнала с ФЭУ в широком диапазоне амплитуд с точностью 2-3% при времени интегрирования не меньше 4-5 мкс. В используемых в настоящее время логарифмических преобразователях ошибка измерения составляет 10-15% и время интегрирования 2 мкс. Полный интеграл отражает число частиц, зарегистрированных данным детектором, но существенную информацию о развитии ливней и их свойствах можно получить из временного распределения прихода этих частиц. Поэтому наиболее информативной будет система преобразования, обеспечивающая измерения как интегрального сигнала, так и его формы по времени.

При полной модернизации электроники установки предполагается изменить организацию управления, отбора событий, хранения данных и связи станций наблюдения с центром на основе использования протоколов и технологий, применяемых в Интернет. Создаваемая система должна объединить уже работающие детекторы и станции наблюдения, а также иметь возможность достаточно простого включения и сбора данных от новых детекторов и дополнительных экспериментов в процессе регистрации ливней. В этом случае на каждой станции потребуется микропроцессор с достаточной оперативной памятью. Применение микропроцессора позволит усилить оперативный контроль качества работы детекторов, облегчить настройку и регулировку режимов их работы от центрального регистратора, без посещения удаленной станции техническим персоналом.

Чтобы расширить возможности исследования пространственного распределения различных компонент ливня требуется также установка дополнительных станций наблюдения с детекторами заряженных частиц и черенковского излучения, а также создание новых подземных пунктов для мюонных детекторов.

4. Логика работы модернизированной Якутской установки ШАЛ

Логическая схема организации отбора событий, сбора и накопления информации на установке ШАЛ диктуется возможностями электроники, устанавливаемой на удаленных детекторах, а также особенностью связи между ними и центральным регистратором. На Якутской установке в настоящее время на станциях наблюдения установлена минимальная электроника, позволяющая измерять плотность частиц на всех детекторах только при совпадении сигналов от сцинтилляционных счетчиков. Временной канал измеряет время прихода первой частицы, из всех попавших на оба эти счетчика. Синхронизирующий сигнал для временного канала передается по эфиру от радиопередатчика в центре установки. Обмен информацией с центральным регистратором осуществляется по кабелю, при этом используется нестандартный внутренний протокол без контроля ошибок и возможности повторной передачи информации при сбоях. Отбор событий в центре производится аппаратно и для изменения или расширения триггера необходимо переделка оборудования.

В процессе модернизации установки ШАЛ предполагается существенное повышение информативности уже существующих детекторов, организация более гибкой системы отбора событий и накопления информации. Чтобы это осуществить потребуется широкое внедрение компьютерных технологий и создание электроники для станций наблюдения с использованием быстродействующих микропроцессоров с достаточной оперативной памятью.

4.1. Структура предлагаемой системы регистрации событий на Якутской установке ШАЛ

С учетом целей и задач модернизации установки можно сформулировать основные технические требования:

- достижение точности взаимной временной синхронизации регистрируемых детекторами локальных событий не хуже 10 нс;
- обеспечение пропускной способности системы передачи, достаточной для передачи объемов информации настоящего времени и перспектив развития установки;
- обеспечение интеллектуальности станций;
- обеспечение постоянного оперативного контроля за работой станций наблюдения и возможности управления параметрами регистрирующей аппаратуры;
- облегчение процесса обслуживания установки и снижение эксплуатационных затрат.

С целью достижения указанных требований предлагается алгоритм работы установки построить по принципу: комплексная регистрация отклика ШАЛ с последующим анализом. Аппаратного мастера ливней реального времени не предусматривается. Вся информация, включая все срабатывания детекторов от фоновых частиц постоянно посылается в центральный комплекс и сортируется по времени регистрации. Затем происходит поиск и выделение событий ШАЛ по времени срабатывания разных детекторов и соответствующие данные запоминаются. Центральный комплекс использует так же фоновые срабатывания для получения калибровочных данных и ведет контроль режимов работы детекторов станций.

При выборе такой архитектуры предусматривается, что основная интеллектуальная нагрузка ложится на программную часть системы, и в случае необходимости внесения изменений в алгоритм обработки, не будет затронута аппаратная часть установки. Тем самым достигается возможность дальнейшего расширения эксперимента. Кроме того, при программной реализации отбора событий имеется возможность менять критерии и схему отбора и производить отбор событий не только по сцинтилляционным счетчикам, но и по детекторам других компонент. Можно будет отбирать события по черенковскому излучению в периоды таких наблюдений или по мюонной компоненте.

Для общей организации управления удаленными детекторами и передачи экспериментальных данных планируется использовать сетевые и Интернет технологии. Все пункты установки объединяются в локальную сеть, а обмен информацией осуществляется по ТСР/IP протоколу.

Предлагаемый подход позволяет выделить пять функционально выделенных подсистем установки и определить требования к каждой из них:

- станция наблюдения,
- система синхронизации,
- система передачи данных,
- центральный регистратор
- база данных ШАЛ.

4.2. Первичная регистрация данных индивидуальных детекторов и их точная временная привязка

На каждой станции наблюдения установлены 2 сцинтилляционных счетчика площадью 2 м². На многих станциях установлен детектор черенковского излучения. Для того чтобы существенно повысить информативность экспериментальных данных в индивидуальных ливнях, на станциях наблюдения необходимо проводить измерения

времени и плотности частиц на каждом детекторе, включая детектор черенковского излучения, независимо от совпадений между сцинтилляционными счетчиками. Это дает возможность получать и анализировать данные на более далеких расстояниях от оси ливня. Аппаратурная точность измерения интегрального сигнала от детекторов должна составлять (2-3)% в амплитудном диапазоне более 4 порядков.

Важную информацию может дать временное распределение частиц, поэтому желательно, чтобы на части станций система преобразования могла проводить не только измерение интегрального сигнала, но его формы по времени в течении 10-15 мкс с шагом 0.1 мкс. Достаточно большой временной интервал необходим для обнаружения и изучения характеристик задержанных сигналов после прохождения основного фронта ливня.

Функционально каждая станция представляет собой автономную регистрирующую систему, фиксирующую каждый локальный акт взаимодействия частиц со сцинтиллятором, события черенковского детектора, а также информацию о состоянии и параметрах станции наблюдения (таких как температура внутри станции, контрольные уровни напряжения, состояние датчиков охраны и другие). Информация накапливается в запоминающем устройстве станции и передается в центр по оптической линии по запросу. Для каждого события фиксируется амплитуда и абсолютное время установки, в которое произошло это событие. Управляет работой станции ЭВМ.

Для измерения времени прихода сигналов на детекторы необходимо также обеспечить синхронизацию временных каналов всех детекторов, чтобы определять направление прихода ливня. Для этого на каждой станции устанавливается приемник импульсов системы синхронизации установки. Для измерения отрезка времени от импульса синхронизации до момента прихода регистрации детектором частицы планируется использовать высокостабильный генератор на 100 МГц. Стабильность частоты генератора должна обеспечивать точность измерений на всем временном отрезке между синхроимпульсами не хуже 10 нс. Период для следования синхроимпульсов должен быть существенно больше, чем время распространения радиосигнала в пределах расположения станций наблюдения, чтобы в основном отсчет временного канала в разных пунктах определялся одним и тем же индивидуальным синхроимпульсом. В противном случае требования на высокую стабильность периода должны распространяться на задающий генератор для СВЧ передатчика. Если синхроимпульсы подавать раз в секунду от GPS приемника, то для таймера требуется стабильность частоты 10^{-8} .

4.3. Система синхронизации станций

Для измерения времени прихода фронта ливня на разнесенных пунктах необходима синхронизация внутренних таймеров, которая обеспечит требуемую точность измерения. Чтобы суммарная точность временных измерений соответствовала ≈ 15 нс, необходимо иметь более высокую точность отдельных узлов временного канала. Поэтому неопределенность привязки сигнала синхронизации должна быть 10 нс.

Из нескольких рассмотренных вариантов (радиоканал, GPS-приемники) в настоящее время остановились создать систему синхронизации с использованием волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), которые планируется использовать и для передачи информации. При разработке такой системы ставится задача создать такую схему, которая позволит получить требуемую точность 10 нс на уже разработанных блоках для станции и на которой можно достаточно просто увеличить точность синхронизации для перспективных новых детекторов.

В настоящее время был выбран следующий алгоритм работы - из единого центра синхронизации по ВОЛС на станции постоянно передается тактовая частота для временного канала станции, внутренний генератор на станции отключается в такой схеме. Секундные синхроимпульсы передаются с помощью модуляции тактовой частоты. На каждой станции блок синхронизации восстанавливает синхроимпульс и отправляет обратно в центр для измерения задержки в реальном времени.

Применение единого для всей установки тактового генератора устраняет значительное количество неопределенностей, связанных с разбросом частоты и нестабильностью индивидуальных генераторов в каждой станции. При использовании индивидуальных таймеров, чтобы добиться точности измерения времени 10 нс, требуются очень высокая стабильность частоты при частоте синхроимпульсов 1 Гц. Распространенные кварцевые генераторы позволяют достичь требуемой точности при частоте синхронизации 10 кГц и выше. Но при такой частоте синхронизации появляются высокие требования к стабильности интервалов между синхроимпульсами, чтобы осталась требуемая точность в событиях, в которых время на разных станциях синхронизовано с разными временными метками из-за различающихся задержек распространения сигнала. Применение единого генератора тактовой частоты снимает эти проблемы.

4.4. Асинхронная система передачи данных со станций в центр обработки

На каждой станции наблюдения установлены 2 сцинтилляционных счетчика площадью 2 м^2 . Фоновая загрузка каждого такого счетчика не должна превышать 500 Гц. На многих станциях установлен детектор черенковского излучения. Фон определяется в первую очередь свечением ночного неба и во время регистрации поддерживается на уровне 300-500 Гц. Увеличение засветки значительно увеличивает поток фоновых событий. Для современной системы обработки сигналов предельно допустимый фон составляет 1000 Гц. Для оценки потока информации примем это значение.

Если измерять только интегральную амплитуду сигнала и время его прихода, то для этой информации требуется 10 байт на одно событие индивидуального детектора. Всего для одной станции с детектором черенковского излучения оценка объема вырабатываемой информации составляет $2 \cdot 10^4$ байт/сек, без такого детектора или в отсутствии оптических наблюдений в 2 раза меньше. На установке имеется 50 станций наблюдения и на 20 из них установлены приемники черенковского излучения. В 5 подземных пунктах для регистрации мюонной компоненты установлено 50 аналогичных сцинтилляционных счетчиков. В итоге общий объем информации от имеющихся детекторов составляет около 10^6 байта в секунду или 10 Мбит/сек. Такой объем вполне возможно передавать с помощью современных каналов для Интернет. Для передачи информации будут использоваться волоконно-оптические кабели.

В дополнительных экспериментах (большой мюонный детектор, дифференциальный черенковский детектор) и для станций с системой измерения формы сигнала с детекторов объем информации будет на порядки выше. Для записи данных временного интервала в 15 мкс с шагом 100 нс требуется 300 байт, вместо 4 для интегральной амплитуды. В этом случае можно использовать другой подход организации передачи информации. С каждого детектора, если он используется для отбора ливней, передается минимальная информация, в основном, время срабатывания, по которому в центре отбираются события согласно алгоритму, а основные данные накапливаются в оперативной памяти. При отборе ливня все детекторы по запросу из центра передают свои показания в определенном отрезке времени вокруг отобранного события. Калибровочные и контрольные программы устанавливаются в управляющей ЭВМ станций наблюдения. Такой подход снижает общий объем пересылаемой информации и позволяет увеличить объем пересылаемых данных в отобранных событиях.

Предлагаемая система потребует мощного вычислительного комплекса в центре и высокоскоростных каналов связи между центральным комплексом и периферийными пунктами. Для каналов связи планируется использовать оптический кабель.

4.5. Центральный регистратор

Исходя из предлагаемой новой логики работы установки (комплексная регистрация отклика с последующим анализом) основная часть нагрузки при решении задачи отбора событий ШАЛ ложится на программно-аппаратную часть центрального регистратора. Для этого необходимо приобрести быстродействующие серверы, которые будут объединены высокоскоростной линией в локальную сеть.

Большой объем работы заключается в разработке программного обеспечения регистрирующего комплекса. Для выделения реальных ливней из общего потока поступающих со станций данных нужно разработать алгоритмы, которые реализуют отбор событий по оптимальным критериям. Разработать программы для их реализации. Отобранные события будут накапливаться в базе данных, структуру которой необходимо разработать. Для обработки событий, отобранных в эту базу данных, и дальнейшего анализа необходимо создать удобное программное обеспечение.

4.6. Модернизация дополнительных экспериментов

В связи с изменением логики работы основной установки потребуется адаптация работы электроники дополнительных экспериментальных установок, включая большой мюонный детектор и дифференциальный черенковский детектор. Сигнал об отборе ливня от основного регистратора не будет поступать сразу же, как в настоящее время, а по сети будет приходить сообщение об отборе ливня в определенный момент времени. Задержка такого извещения может составлять 1-2 секунды, поэтому необходимо данные в этих экспериментах хранить достаточное время в оперативной памяти, а после приема извещения выбирать необходимую информацию по времени ливня и записывать в долговременную базу данных.

Для возможности выбора нужных событий, время любого из них должно быть синхронизировано со временем центрального регистратора, выбирающего ливневые события. Для этого необходимо в локальных регистраторах дополнительно устанавливать такой же таймер, как на станциях наблюдения, и синхронизировать его с помощью радиосистемы.

Такой подход требует большого объема памяти в каналах АЦП ЧДД. Возможно расширение такой памяти вызовет затруднения, поэтому рассматривается возможность создания для этих экспериментов дополнительного аппаратного мастера, который позволит вести наблюдения в существующем режиме.

4.7. Состояние разработок в настоящее время

В настоящее время выполнены следующие работы по модернизации установки:

- - Завершена разработка электроники для станций наблюдения и мюонных детекторов, проведена проверка ее работоспособности на различных сцинтилляционных детекторах, используемых на Якутской установке. Испытания показали, что разработанные схемы работоспособны и соответствуют техническим требованиям. Амплитудное разрешение АЦП лучше 5%, точность измерения времени событий 10 нс.
- Разработана программа управления для станций наблюдения, работающая на платформе операционной системы Linux. Программа осуществляет функции управления и контроля за работой детекторов станции, а также передачу данных в центр.
- Проведен капитальный ремонт линий связи и прокладка оптических кабелей к станциям наблюдения для синхронизации и передачи данных.
- Разработана система синхронизации временных каналов с использованием единого тактового генератора в центре установки. Частота опорного генератора передается на станцию наблюдения по оптическому кабелю, по которому также посылаются синхроимпульсы (секундные метки). Такая схема позволяет исключить ошибки, связанные с использованием независимых тактовых генераторов на каждой станции и имеет возможность в будущем увеличить точность синхронизации, довести ошибку синхронизации до 1 нс.
- Одновременно с основной программой регистрации ШАЛ запущена в опытную эксплуатацию часть установки в новой архитектуре и создана базовая версия программного обеспечения отбора, регистрации и обработки ливней. Опытная установка состоит из 7 станций в центральной части, которые образуют 6 триггерных треугольников со стороной 250 м и 4 станции на периферии – 2 треугольника со стороной 500 м. На такой установке регистрируется больше 1 события в минуту. Оперативный контроль и управление работой макета можно осуществлять удалено из Института в Якутске.

В настоящее время все основные узлы новой электроники разработаны и проверены, ведется опытная регистрация на макете из 11 станций. Начат анализ данных, поступающих с макета. x анализ. На следующем этапе необходимо тиражирование узлов электроники и перевод детекторов в центре установки на новую систему регистрации, для создания прототипа из 15-20 станций для окончательной отладки всего программного

обеспечения, включая формирование базы данных и их анализ. Такой прототип по существу станет малой установкой ШАЛ для полноценных исследований в области энергий $10^{15} - 10^{16}$ эВ.

5. Развитие системы детекторов Якутской установки

Для повышения точности измерения различных компонент в индивидуальных ливнях необходимо, чтобы измерения в отдельных событиях проводились в достаточно широком интервале расстояний. В современной конфигурации Якутской установки основная статистика данных для ливней выше 10^{17} эВ по заряженной компоненте и черенковскому излучению начинается с 200-300 м от оси. Чтобы получать данных вблизи оси ливня необходимо иметь более частую сетку детекторов на достаточно большой площади, а для этого необходимо установить дополнительные станции наблюдения с детекторами для обоих компонент.

Для получения данных по мюонной компоненте ШАЛ необходимо модернизировать существующие подземные детекторы путём замены электроники, счётчиков частиц и проведения капитального ремонта помещений, а также создавать новые пункты для регистрации мюонов. В ливнях с энергией меньше 10^{18} эВ обычно дают показания 1-2 мюонных детектора, так как их всего пять и расстояние между ними около 1 км. Добавление даже 3 новых детекторов удвоит статистику индивидуальных ливней, в которых можно оценивать пространственное распределение мюонов.

Создание новых станций наблюдения и мюонных детекторов в необходимом количестве требует больших капитальных затрат и возможно только при отдельном достаточном финансировании такого проекта. В условиях существующего финансирования в ближайшие два года планируется создание специализированных новых детекторов, позволяющих расширять объем информации в ливнях – система регистрации радиоизлучения и дифференциальные детекторы черенковского излучения для исследования продольного развития ШАЛ.

5.1. Система регистрации радиоизлучения ШАЛ

На Якутской установке создается система регистрации радиоизлучения от ШАЛ на частоте 32 МГц. Регулярные наблюдения на одной антенне начаты в апреле 2010 г. Для регистрации высокочастотных сигналов были выбраны полуволновые диполи, поднятые на высоту $\lambda/4$, и один ориентирован в направлении восток – запад другой север – юг. Полоса пропускания радиотракта – 4 МГц, чувствительность ~ 10 мкВ ($2 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^{-1} \text{ МГц}^{-1}$), динамический диапазон 50. Регистрация радиосигнала производится синхронно с “мастером” установки, отбирающей ливни. Выборочный анализ отдельных событий показал, что отношение сигнал/шум для наклонных ливней на расстояниях до 1000 м от

оси составляет около 20 дВ, что указывает на перспективность развития исследований радиоизлучения. В будущем планируется расширение системы.

Кроме приемников на 32 МГц на Якутской установке ведутся наблюдения радиоизлучения в ОНЧ диапазоне (10-100 КГц) и регистрация флуктуаций электрического поля с помощью флюксометров. Имеющееся оборудование позволяет выделять периоды грозовых условий, лоцировать молниевые разряды и регистрировать их радиоимпульсы, а также выделять положительные пробои. Это позволяет проводить исследования о влиянии космических лучей на процесс образования грозовых условий. Космические лучи образуют заряженные частицы в атмосфере, что может играть большую роль в создании грозовых условий. Широко обсуждается роль космических лучей высоких энергий в механизме инициации молний, в частности, создание условий пробоя лавиной быстрых электронов и ШАЛ. Эти теоретические представления нуждаются в экспериментальных исследованиях.

5.2. Разработка дифференциального детектора черенковского излучения кругового обзора

Проект направлен на разработку принципиально нового детектора черенковского излучения для получения сведений о развитии широких атмосферных ливней в атмосфере, а также на детальное исследование галактической компоненты космических лучей по данным совместной регистрации ливней с помощью нового детектора и установки ШАЛ в Якутске.

В настоящее время промышленность выпускает ФЭУ с координатно-чувствительным анодом (position-sensitive PMTs, multianode PMTs, см. сайт производителя www.hamamatsu.com). На их основе можно создать детектор черенковского излучения ШАЛ, измеряющий угловое распределение фотонов, с круговой приемной диаграммой. Другой возможной альтернативой является применение матрицы из лавинных фотодиодов, работающих в Гейгеровском режиме (G-APD). Чтобы сфокусировать поток фотонов, приходящих под определенным углом, в точку на фокальной плоскости, можно использовать зеркало, или объектив с соответствующим фокусным расстоянием.

Простые прикидки показывают необходимые размеры зеркала – по аналогии с атмосферными черенковскими телескопами, измеряющими свечение от ШАЛ, вызываемое космическим гамма-излучением. Так, телескопы, составляющие HESS имеют диаметр 13 м, работают в области энергий $E > 10^{11}$ эВ. Поток черенковского света от ШАЛ приблизительно пропорционален энергии первичной частицы, порождающей ливень. Поэтому детектор, работающий в области энергии выше 10^{15} эВ, должен иметь

зеркало диаметром в 13 см, чтобы создавать сравнимую плотность потока фотонов на аноде. Соответственно уменьшается и цена прибора, определяемая размерами зеркала.

Численное моделирование углового и временного распределения черенковского света, излучаемого релятивистскими электронами ливня, показало, что необходимо угловое разрешение ~ 1 градус, а временное разрешение ~ 10 наносекунд, для того чтобы успешно различать ШАЛ, образованные протонами, тяжелыми ядрами или фотонами. Соответственно, если выбрать в качестве детектора ФЭУ Hamamatsu R2486 с фотоанодом из 16×16 проволочной решетки, помещенной в фокус сферического зеркала, то оптимальные размеры зеркала получаются следующие: диаметр 26 см, радиус кривизны 22.5 см. Параметры выбраны так, чтобы получить наибольший угол обзора детектора (около 30 градусов), при котором искажение изображения светящейся точки на бесконечности не превышает разрешающей способности многоанодного ФЭУ по всей поверхности фотокатода.

По сравнению с уже работающими черенковскими дифференциальными детекторами Обскура новый детектор будет обладать рядом преимуществ. ЧДД может проводить измерения только в узком азимутальном интервале поперек щели, новый детектор будет иметь круговую диаграмму. Кроме того угловое разрешение нового детектора будет выше, чем в ЧДД.

В настоящее время разработан и создан экспериментальный прототип черенковского телескопа с широким полем обзора для совместной работы с другими детекторами Якутской установки ШАЛ. начаты его полевые испытания. В течение зимнего периода наблюдений 2013-2014 зарегистрирован массив событий ШАЛ, сопровождающихся черенковским излучением, в режиме совпадения сигналов с наземными сцинтилляционными детекторами установки. В текущем сезоне наблюдений черенковского излучения с осени 2014 г. опытная регистрация продолжается.

Из полученных в опытной серии данных была оценена эффективность регистрации ливней с помощью телескопа, определен его эффективный радиус регистрации. Угловые и временные параметры черенковских сигналов измерены в реальных событиях ШАЛ. Показано, что измерения интенсивности, формы и времени прихода черенковских импульсов позволяют определить энергию ливня, направления прихода и положение максимума черенковского свечения в ШАЛ с энергией выше 10^{15} эВ при условии развертывания решетки детекторов, синхронизированных с точностью 1-5 нсек.

В следующие годы планируется создание еще несколько таких черенковских телескопа для создания сети для детального исследования развития ливня с глубиной атмосферы.

5.3. Система быстродействующих детекторов формы сигнал от черенковского излучения ШАЛ

В проекте предполагается использовать главным образом измерение черенковского измерения, сопровождающего ливень релятивистских частиц в атмосфере, для изучения спектра и направлений прихода КЛ, массового состава частиц, инициирующих ШАЛ. При этом результаты измерения электронно-фотонной и мюонной компонент ливней будут привлекаться для оценки энергии и массы первичных частиц ШАЛ, определения некоторых параметров ливней.

Основной задачей проекта является определение массового состава КЛ в области энергий от 10^{15} эВ до 10^{20} эВ. Дополнение измерений энергетического спектра и распределения направлений прихода КЛ, выполняемых на Якутской установке ШАЛ, надежными данными о составе частиц КЛ позволит совершить прорыв в исследовании происхождения галактической и внегалактической компонент КЛ.

Для решения этой задачи предполагается оснастить модернизированную Якутскую установку ШАЛ системой синхронизированных детекторов черенковского света, способных измерять пространственное распределение, а также форму черенковского сигнала с кардинально улучшенным разрешением по времени, достаточным для определения возраста индивидуального ливня и массового состава первичных частиц ШАЛ.

Новизна поставленной задачи связана с возможностью определения глубины максимума каскадной кривой, X_{\max} , и/или возраста ливня, s , связанного с массой первичной частицы ШАЛ, посредством измерения формы пространственного и временного распределения черенковского сигнала на определенном расстоянии от оси ШАЛ. Как было показано Фоминым и Христиансенем с помощью моделирования, ширина импульса черенковского света, измеренная на периферии ливня, $r > 300$ м на уровне моря, явным образом связана с X_{\max} [7].

Кроме того, развитие техники синхронизации больших сетей детекторов элементарных частиц, а также современных быстрых детекторов и систем сбора данных, позволяет применить метод прямого вычисления положения максимума ливня из измерений формы импульса черенковского света. Имея время прихода оси ливня на плоскость установки с точностью 1-5 нс, легко вычислить расстояние вдоль оси ливня до максимума интенсивности света, определяемое только неопределенностью ширины измеренного импульса по времени (от 10 до 100 нсек в зависимости от расстояния до оси ШАЛ), и неопределенностью коэффициента преломления света в атмосфере.

Объединяя X_{max} и s с другими характеристиками ШАЛ, полученными с помощью наземных и подземных сцинтилляционных детекторов, например, с энергией КЛ и долей мюонов в ливне, можно определить средний массовый состав КЛ, и выявить его поведение с ростом энергии. База экспериментальных данных для выяснения происхождения «колена» и «лодыжки» в спектре КЛ значительно обогатится с добавлением измерений пространственного и временного распределения черенковского сигнала в диапазоне энергий выше 10^{15} эВ

В предлагаемом проекте мы планируем дополнить, и в перспективе, установить детекторы, измеряющие форму импульса черенковского света в каждой станции наблюдения Якутской установки. Современные детекторы, дополненные соответствующей системой сбора данных и синхронизации, способны существенно улучшить точность определения параметров ливня. При точности синхронизации детекторов в сети не хуже 1 нс определяющим фактором становится точность измерения времени прихода фотонов и формы импульса сигнала. Так, при точности определения времени нарастания импульса 10 нс на расстоянии 300 м от оси ШАЛ, точность определения направления прихода первичной частицы становится около 0.3 градуса, а точность определения X_{max} около 10 г/кв. см.

Эта программа позволит исследовать энергетический спектр и состав КЛ в широком интервале от 10^{15} эВ до 10^{20} эВ на одной установке, основываясь на измерениях черенковской компоненты ливней. Ни на одной из гигантских установок ШАЛ, действующих в мире, такой возможности пока нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения дальнейших исследований на Якутской установке ШАЛ на мировом уровне и повышения ее эффективности в необходимо завершить разработку и замену ее морально и физически устаревших узлов электроники на современные на основе новых технологий. При этом одновременно решается задача существенного улучшения основных характеристик установки и увеличения точности определения параметров в индивидуальных событиях по всем основным компонентам ШАЛ.

Для достижения этой цели планируется:

- Добиться точности взаимной временной синхронизации всех детекторов не хуже 10 нс, вместо существующей 100 нс, что позволит значительно улучшить пространственную локализацию положения оси ливня и тем самым расширить ее физические возможности;
- Заменить существующие низкоскоростные кабельной линии передачи данных на оптоволоконную систему с высокой пропускной способностью, что обеспечит повышение эксплуатационных характеристик и надежности установки в целом;
- Оснастить станции наблюдения современной электроникой для достижения их высокой интеллектуальности.

Кроме модернизации архитектуры установки и ее электроники планируется:

- Создать сеть из черенковских телескопов кругового обзора на основе многоанодного ФЭУ для прямых измерений продольного развития ШАЛ;
- Разработать систему из быстродействующих детекторов формы черенковского света с точной временной синхронизацией (1-5 нс) между ними.
- Расширить возможности регистрации радиоизлучения ШАЛ, установить несколько новых антенн.

Новые комплексные данные позволят получить наиболее точную оценку массового состава космических лучей в широком диапазоне энергий от 10^{17} эВ до $2\cdot 3\cdot 10^{19}$ эВ, уточнить другие характеристики первичного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернов С.Н., Егоров Т.А., Ефимов Н.Н. и др.// Изв.АН СССР. Сер.физ. 1965. Т.29. № 9. С.1690
2. Efimov N.N., Egorov T.A., Krasilnikov D.D., Pravdin M.I., Sleptsov I.Ye. Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays. // Word Data Center C2. Japan. – 1988. – N 3. – 56p
3. Дьяконов М.Н., Ефимов Н.Н., Егоров Т.А. и др. Космическое излучение предельно высокой энергии. – Новосибирск: Наука, 1991. – 254с
4. Артамонов В.П., Афанасьев Б.Н., Глушков А.В. и др.// Изв.АН СССР. Сер.физ. 1994. Т.58. № 12. С.92
5. Лагутин А.А., Учайкин В.В., Черняев Г.В., Шабельский Ю.М.. Расчет широких атмосферных ливней в модели кварк-глюонных струн. // Ленинград. Препринт № 1289, июнь 19879
6. . Garipov G.K and Khrenov B.A. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 1994, V. 20, P. 1981 – 1988
7. Ю.А .Фомин, Г.Б.Х ристиансен. ЯФ, т. 14 (1971), с. 642.