

27

На правах рукописи



КОМПАНИЕЦ Константин Георгиевич

МЮОННЫЙ ГОДОСКОП УРАГАН

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва, 2008

05 ДФК 2008

На правах рукописи

КОМПАНИЕЦ Константин Георгиевич

МЮОННЫЙ ГОДОСКОП УРАГАН

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва, 2008

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Петрухин Анатолий Афанасьевич,
МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
зав. лабораторией
Кузьмичев Леонид Александрович,
НИИЯФ МГУ, г. Москва

доктор физико-математических наук,
зам. руководителя отдела
электроники
Сенько Владимир Александрович,
ГНЦ "ИФВЭ", г. Протвино

Ведущая организация: Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской академии наук, г. Троицк

Защита состоится 17 декабря 2008 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.130.07 в МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан 14 ноября 2008 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Космические лучи (КЛ) несут информацию как о физических явлениях в самих источниках излучения, так и о процессах в среде, через которую они проникают. В частности, поток мюонов, образующихся в результате взаимодействий КЛ с ядрами атомов воздуха на высотах 15-20 км, чувствителен к различным термодинамическим процессам в атмосфере Земли как естественного, так и техногенного происхождения. Таким образом, характеристики потока мюонов, регистрируемого на уровне Земли, являются эффективным индикатором динамики различных процессов в окружающей среде, включающей магнитосферу и атмосферу Земли.

Для разделения влияния атмосферных процессов и процессов в околоземном пространстве используется то обстоятельство, что гелиосферные и магнитосферные факторы изменяют поток космических лучей в больших пространственных масштабах, а атмосферные эффекты имеют, как правило, достаточно локальный характер. Решение этих задач возможно с помощью широкоапертурного координатного детектора, способного одновременно регистрировать мюоны с различных направлений в широком диапазоне зенитных углов для получения пространственно-временных характеристик потока мюонов. Такая информация позволяет получать полную картину состояния верхних слоев атмосферы и проследить динамику ее изменения, в частности, выявлять возмущенные области, определять направления и скорости их перемещения и оценивать время появления в заданной точке.

Поэтому создание аппаратуры и развитие методов дистанционного мониторинга состояния гелиосферы и магнитосферы, а также термодинамических процессов в атмосфере Земли, приводящих к образованию таких опасных явлений как ураганы, является весьма актуальной задачей.

Цель работы

Разработка и создание Установки для РАСпознавания Грозных АНОмалий (УРАГАН) - трекового мюонного годоскопа для исследования динамических процессов в атмосфере Земли и околоземном пространстве методом мюонной диагностики.

Научная новизна

Созданная установка впервые позволяет получать с высокой достоверностью непрерывные распределения характеристик потока мюонов из верхней полусферы в широком диапазоне зенитных углов вплоть до 80° . Аппаратура представляет собой новый тип наземного модульного детектора космических лучей, предназначенного для исследования связей между пространственно-временными вариациями потока мюонов космических лучей и различными динамическими процессами в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли. Оригинальность разработанной системы быстрого считывания информации мюонного годоскопа подтверждена полученным патентом.

Практическая значимость

Созданная установка позволяет вести непрерывный мониторинг состояния атмосферы и магнитосферы Земли и развить методы мюонной диагностики для дистанционного и заблаговременного обнаружения опасных явлений (ураганы, магнитные бури и т.п.). Универсальность отдельных элементов и всей системы триггирования и сбора данных позволяет использовать их в системах регистрации данных других многоканальных космофизических установок.

Личный вклад

Автор участвовал во всех этапах разработки и создания мюонного годоскопа УРАГАН. Непосредственно автором была разработана, собрана и налажена аппаратура детектора, созданы алгоритмы и программы, обеспечивающие работу системы сбора данных и триггирования, а также специализированные стенды и методики для тестирования и наладки элементов детектора. Автор принимал непосредственное участие в проведении экспериментов и в получении методических и физических результатов.

Автор защищает

1. Установку модульного типа УРАГАН, обеспечивающую годоскопический режим регистрации мюонов в полном объеме.
2. Общую структуру и основные элементы системы сбора данных и триггирования.

3. Алгоритмы и программы, обеспечивающие работу системы сбора данных и триггирования.
4. Стенды и методики для тестирования и наладки элементов детектора.
5. Полученные характеристики и оценки возможностей мюонного годоскопа УРАГАН.

Апробация

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: Европейском симпозиуме по космическим лучам (ECRS 2004), Международной конференции по космическим лучам (ICRC 2005), Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ 2006), Баксанской молодежной школе экспериментальной и теоретической физики (2006), научной сессии МИФИ (2007), опубликованы в их трудах, а также в четырех статьях в журналах "Приборы и техника эксперимента" и "Известия РАН. Серия физическая".

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 120 страниц, 72 рисунка, 7 таблиц, 46 наименований цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приводится краткий обзор аппаратуры, предназначенной для изучения вариаций космических лучей как источника информации о процессах в среде, через которую они проникают.

Вариации интенсивности космических лучей в месте наблюдения могут быть вызваны изменениями мощности источников (включая ускорительные процессы на Солнце и в Галактике), а также различными модуляционными эффектами при распространении КЛ в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли.

Из-за малой амплитуды вариаций к аппаратуре, предназначенной для их изучения, предъявляются жесткие требования. Она должна обеспечивать непрерывность измерений, высокую стабильность, а также достаточную статистическую точность. Средства мониторинга вариаций КЛ можно разделить на два класса: космические и наземные. Детекторы на борту космических аппаратов позволяют проводить прямые измерения

потока первичных частиц, но, к сожалению, их количество мало, а риск необратимого выхода аппаратуры из строя и их стоимость велики. Кроме того, приемлемую статистическую точность измерений вариаций космических лучей на космических аппаратах, из-за ограниченности их размеров, можно получить только в области малых энергий.

При наземных измерениях вариаций космических лучей обычно регистрируется либо нейтронная, либо мюонная компоненты. Нейтронные мониторы регистрируют нейтроны, которые образуются в веществе установки адронами, достигшими уровня наблюдения. В настоящее время поверхность Земли покрыта сетью нейтронных мониторов, включающей более 50 станций. Нейтронные мониторы являются приборами интегрального типа, их пространственное разрешение определяется лишь светосилой, а результаты относятся к потоку КЛ с невысокой средней энергией (2-10 ГэВ).

Вариации космических лучей исследуются также путем измерений интенсивности мюонной компоненты. Для ее измерений обычно используют стандартные телескопы, ориентированные определенным образом. Для наблюдения анизотропии космических лучей мюонные телескопы приспособлены значительно лучше, чем нейтронные мониторы. Это связано, в первую очередь, с их более узкой диаграммой направленности. Первый многонаправленный мюонный телескоп для непрерывной регистрации потока мюонов был создан в Нагое и работает с октября 1970 г. В настоящее время работают несколько наземных многонаправленных мюонных телескопов: в Нагое (Япония), Хобарте (Австралия), Сан Мартино (Бразилия), Кувейте, регистрирующих поток мюонов с различных направлений в реальном времени и в едином формате. Мюонные телескопы дают информацию, которая соответствует КЛ со средней энергией около 50 ГэВ, и позволяют детально изучать их вариации. Телескопы с крупной мозаичной структурой регистрируют КЛ из небольшого числа (4 – 20) пространственных направлений с угловым разрешением 20-30 градусов. В последние годы было создано два счетчиковых многоканальных телескопа – на горе Нориккура и большой счетчиковый телескоп индийско-японского проекта в Ооти. Но даже лучшие мюонные телескопы имеют угловое разрешение около 10 градусов.

Новым шагом в развитии методов наземного мониторинга процессов, модулирующих потоки космического излучения, является создание следующего поколения мюонных детекторов – мюонных годоскопов. Под годоскопическим режимом работы мюонного детектора понимается возможность измерения практически непрерывного пространственного распределения потока мюонов, т.е. когда

дискретность установки не вносит искажений в отображение исследуемых физических процессов. Первой в мире попыткой реализации широкоапертурного мюонного годоскопа для исследования вариаций КЛ на поверхности Земли является установка ТЕМП, созданная в МИФИ в 1995 г., угловое разрешение которой составляет 1-2 градуса.

К сожалению, реконструкция треков по двум точкам, конструктивно заложенная как во всех существующих мюонных телескопах, так и в установке ТЕМП, не может дать надежной идентификации направления пролета мюона. В результате пространственное распределение искажается из-за ложных реконструкций, связанных с дельта-электронами, группами мюонов, каскадными ливнями и случайными шумовыми срабатываниями.

В разделе 1 описываются конструкция трекового мюонного годоскопа УРАГАН, системы, обеспечивающие его работу, а также структура системы триггирования и сбора данных установки и ее основные элементы.

В качестве базового регистрирующего элемента мюонного годоскопа применяются камеры стримерных трубок с пространственной локализацией трека около $1 \text{ см} \times 1 \text{ см}$, с двухкоординатным съемом информации, ранее использовавшиеся в эксперименте NUSEX. Размер камеры $357 \times 16.7 \times 1.5 \text{ см}^3$. Основной элемент камеры - 8 стримерных трубок внутренним сечением $9 \times 9 \text{ мм}$, объединённых в один открытый профиль, изготовленный из поливинилхлорида толщиной 1 мм. На профиль нанесено графитовое покрытие с сопротивлением 50 кОм/кв.см , которое выполняет роль катода. По центру каждой трубки расположена анодная нить, изготовленная из бериллий-медного сплава и посеребрённая. Диаметр нити 100 мкм. Внешние считывающие X- и Y-стрипы изготовлены из алюминиевой фольги толщиной 40 мкм. Стрипы имеют разные размеры: ширина X-стрипов 4 мм и наклеены они с 6 мм интервалом, а Y-стрипы 10 мм ширины с 2 мм интервалом. Характерное время распространения импульса по стрипу - 6 нс/м, импеданс - 50 Ом для X-стрипов и 25 Ом для Y-стрипов. Режим ограниченного стримера обеспечивается трехкомпонентной газовой смесью (аргон и углекислый газ в пропорции 1/2 и насыщенные пары нормального пентана при стабилизированной температуре), а также выбором необходимого высоковольтного напряжения (4100 – 4300 В).

В основу конструкции широкоапертурного мюонного годоскопа УРАГАН заложен модульный принцип его построения. Основой годоскопа является автономный супермодуль (СМ), расположенный на мобильной платформе (рис.1). Число и взаимное расположение

супермодулей в мюонном годоскопе определяется характером решаемых задач и может изменяться в процессе проведения исследований. Минимальный состав мюонного годоскопа – один СМ.

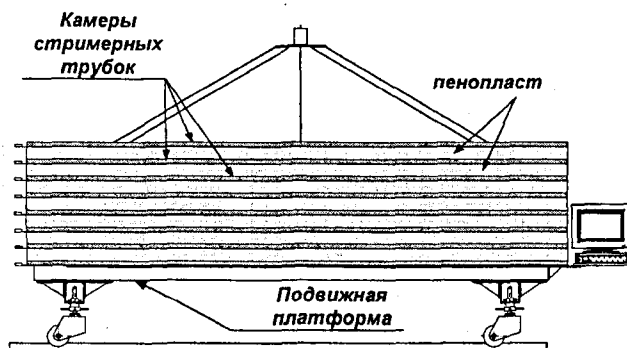


Рис. 1. Структура СМ мюонного годоскопа

Каждый автономный супермодуль состоит из восьми плоскостей камер стримерных трубок вместе с системой внешних считывающих пластин (стрипов) (всего $320X+288Y$ каналов с шагом 1,0 и 1,2 см соответственно). Регистрирующие плоскости располагаются послойно, 5 см зазор по вертикали между плоскостями заполнен сплошными пенопластовыми пластинами. Полная толщина установки по вертикали составляет ~ 11 г/см² и определяется в основном веществом камер. Каждая плоскость детектора состоит из 20 камер, уложенных с одинаковым зазором 3 мм по горизонтали и имеет эффективную площадь $\sim 11,5$ м². Конструкция супермодуля обеспечивает высокую пространственную и угловую точность регистрации мюонов (соответственно 1 см и 1 градус) в широком диапазоне зенитных углов от 0 до 80 градусов.

Система газоподготовки мюонного годоскопа УРАГАН аналогична системе, применявшейся в эксперименте NUSEX, с расширением некоторых возможностей, и работает по следующему принципу. Скорость потоков аргона и углекислого газа регулируется с помощью прецизионных контроллеров потока с точностью ± 1 % от полной шкалы и повторяемостью $\pm 0,2$ %. Газовая смесь насыщается парами п-пентана при комнатной температуре (около 20°C) и затем «пробулькивается» через п-пентан с контролируемой рабочей температурой (+7°C). Таким образом, излишек паров п-пентана конденсируется и на выходе системы образуется газовая смесь с требуемыми пропорциями.

Необходимое для режима ограниченного стримера высокое напряжение обеспечивается 40-канальным высоковольтным источником CAEN HV SYSTEM, Model SY-127. Низковольтное питание (5.25 В) считывающей электроники осуществляется блоками БНН-152.

Система триггирования и сбора данных установки УРАГАН реализована как совокупность нескольких идентичных, независимых друг от друга подсистем супермодулей с четкой общей синхронизацией по календарному времени. Таким образом, скорость сбора данных с установки определяется быстродействием системы одного супермодуля. Расширение установки легко достигается добавлением новых супермодулей, при этом возрастает статистическая обеспеченность суммарных результатов, а стабильность и идентичность работы супермодулей контролируется по величине отношения регистрируемых интенсивностей.

Управление потоком данных супермодуля и их первичная обработка осуществляются с помощью периферийной ЭВМ – промышленного компьютера с шинами расширения ISA и PCI. Каждая периферийная ЭВМ супермодуля может работать как автономно, так и в составе системы. Для сбора данных и генерации тестовых последовательностей используется плата цифрового ввода/вывода PCI 7200 ADLINK. Выделение событий и точный подсчет временных интервалов производится специально разработанным триггерным блоком.

Эффективность регистрации заряженной частицы одной плоскостью в основном обусловлена геометрией трубок (толщина стенок и т.п.) и составляет около 90 %. Наличие восьми двухкоординатных плоскостей позволяет, с одной стороны, организовать достаточно «мягкий» триггер, повышая тем самым эффективность регистрации, а с другой стороны, при реконструкции выбирать события только с прямыми треками, действительно соответствующими прохождению мюонов. Так, совпадение сигналов не менее четырех сработавших плоскостей из восьми с 99% эффективностью идентифицирует прохождение заряженной частицы через супермодуль.

Триггерные сигналы от восьми плоскостей каждого СМ приходят на триггерный блок, в котором осуществляется выработка триггера супермодуля, сигнала загрузки регистров плат считывания, прерывания в ЭВМ, флагов состояния и последовательности тактовых импульсов считывания в режиме “запрос - подтверждение”, а также подсчет живого времени и измерение темпа счета сигналов плоскостей. Структура триггерного блока включает следующие функциональные узлы: интерфейс с шиной ISA; приемник и формирователь по длительности

триггерных сигналов от плоскостей, он же являющийся сканирующим ОЗУ; в которое с частотой 40 МГц записывается состояние триггеров; логическую матрицу совпадений; схему мониторинга темпа счета триггеров и часы «живого» времени; регистры состояния триггеров и всего блока; схему выработки общесистемного триггера и прерывания; модуль выработки тактовых импульсов.

Условием выработки триггера супермодуля является совпадение не менее четырех сигналов сработавших плоскостей в течение 300 нс. Расчетное количество случайных совпадений при одинаковом уровне шумов плоскостей можно получить по следующей формуле:

$$n_4(1..8) = C_8^4 4\nu^4 \tau^3,$$

где ν – частота триггерных сигналов плоскостей, τ – длительность совпадения сигналов. С учетом измеренных шумов плоскостей (~ 3 кГц) и длительности импульсов 300 нс количество случайных совпадений составляет ~1.5 события в сутки (при темпе счета частиц 1.8 кГц).

Один супермодуль включает в себя 4864 стрипа – информационных канала. Вследствие такого большого числа каналов, одним из самых важных и дорогостоящих элементов системы считывания является устройство преобразования аналогового сигнала со стримерной камеры до уровня цифровой логики.

Базовым элементом системы сбора данных установки является специально разработанная плата быстрого считывания (ПБС), обеспечивающая усиление, дискриминацию, формирование, хранение сигналов, предварительное триггирование и последовательную передачу данных с 16 стрипов. ПБС включает в себя восемь специализированных двухканальных усилителей-компараторов, два восьмиразрядных сдвиговых регистра и схему управления. 16-канальная компоновка платы обусловлена технологическими особенностями поверхностного монтажа компонентов. Кроме того, наличие схемы управления на каждом 16-ти каналах повышает гранулированность и гибкость системы в целом.

Общая функциональная схема платы изображена на рисунке 2. Усилители-компараторы реализованы на специализированных двухканальных микросхемах F4040, которые были разработаны на основе БМК Б1451ХН3-4 ("Фархад-2") совместно со специалистами НПО «ФОРМ». Микросхема обеспечивает усиление, дискриминацию по заданному порогу и формирование выходных импульсов фиксированной длительности по двум независимым каналам. Для формирования триггерного сигнала по схеме «монтажное ИЛИ» реализован выход логического ИЛИ по двум каналам с открытым коллектором. На выходе микросхем формируются сигналы ТТЛ уровня длительностью 1 мкс, которые поступают на входы параллельной загрузки двух

восьмиразрядных сдвиговых регистров. Схема управления платой включает в себя два D-триггера, мультиплексор прохождения данных через плату, формирователь триггерного сигнала платы и схему взвода D-триггеров по триггерному сигналу платы. Платы включаются последовательно между собой, образуя каналы последовательного чтения данных.



Рис. 2. Плата быстрого считывания данных с камер стримерных трубок.

Отличительной особенностью разработанной системы является наличие двух цепочек последовательного считывания данных. Первая цепочка формируется из D-триггеров схемы управления платой и представляет информацию о сработавших платах. Вторая – формируется из сдвиговых регистров и позволяет получить информацию с каждого канала (стрипа). Кроме того, схема управления включает сдвиговые регистры во вторую цепь лишь при наличии сработавших каналов на данной плате. Таким образом, информация считывается только со сработавших плат, что позволяет обеспечить необходимую скорость сбора данных.

В разделе 2 приводится описание аппаратуры, методик проверки, отбора и наладки элементов годоскопа, а также программного обеспечения установки.

Обеспечение годоскопического режима требует решения следующих основных задач:

- тщательного отбора камер стримерных трубок и плат считывания на специализированных стендах;

- создания адекватного программного обеспечения для организации устойчивого сбора и обработки данных в режиме реального времени и их представления в виде, удобном для дальнейшей физической обработки.

Для обеспечения надежной работы установки все камеры перед сборкой проходили полный цикл подготовки, измерения характеристик и отбора на специализированном стенде, который обеспечивает автоматизированное управление системой подачи высокого напряжения и одновременное тестирование восьми камер. В процессе тестирования измеряется эффективность срабатывания камеры в целом и уровень счета каждой трубки камеры при различных значениях высокого напряжения. Была проведена проверка более 1500 камер стримерных трубок.

Методика проверки платы быстрого считывания включает в себя поканальное определение порога 50% эффективности, вычисление среднего значения и разброса порога, проверку перекрестных наводок с канала на канал и поканальную проверку формирования триггерного сигнала. После изготовления все платы прошли наладку на специализированном стенде. По результатам проверки плат средний порог срабатывания канала составил 3.8 ± 0.4 мВ. С учетом точности установки среднего порога срабатывания плат, разброс порогов срабатывания отдельных каналов микросхем F4040 не превысил $\pm 10\%$. При нахождении среднего порога срабатывания установки на плато эффективности, 10% разброс отдельных каналов укладывается в пределах данного плато. При этом неоднородность эффективности различных каналов установки составляет величину не более 2%.

Для обеспечения работы наладочных стендов установки УРАГАН был разработан многофункциональный контроллер. Объединение нескольких функций в одной плате позволило минимизировать количество слотов, требуемых для организации системы, и оптимизировать трафик прохождения данных. Контроллер включает в себя четыре идентичных, параллельно функционирующих канала, каждый из которых обеспечивает прием данных с плат считывания, передачу их в ЭВМ, выработку тестовых последовательностей, подсчет количества триггерных сигналов и участвует в выработке общего мажоритарного триггера. Контроллер дает менее 1 сбоя на 1 млн. событий при частоте триггерных сигналов 10-15 кГц.

Отладка и настройка совместной работы платы сбора и триггерного блока в различных режимах производилась сначала отдельно от установки с имитацией событий генератором. Общая сборка измерительной системы проводилась путем последовательного наращивания цепочек плат быстрого считывания на каждой плоскости с

одновременным контролем темпа счета триггерных сигналов плоскостей и проверкой прохождения тестовых последовательностей данных. По результатам контроля определялось наличие сбоев и устранялись такие неисправности, как шумящие каналы, замыкания, обрывы, аномальные паразитные емкости, разница потенциалов стрипов. После сборки и наладки удалось достигнуть устойчивой работы системы в режиме «запрос – подтверждение» на тактовой частоте 2.5 МГц с фиксированным считыванием четырех ПБС по каждой координате всех плоскостей. Доля событий со срабатыванием не более четырех ПБС составила 99%, а время считывания каждого события при этом составило 38 мкс.

Для аппаратной части установки УРАГАН было разработано специальное программное обеспечение, во многом определяющее быстродействие и точность измерительной системы в целом. Аналогично аппаратуре, программное обеспечение системы такой сложности является модульным и многоуровневым. Общая блок-схема программного пакета для полного цикла обслуживания модульного годоскопа, представлена на рис. 3.

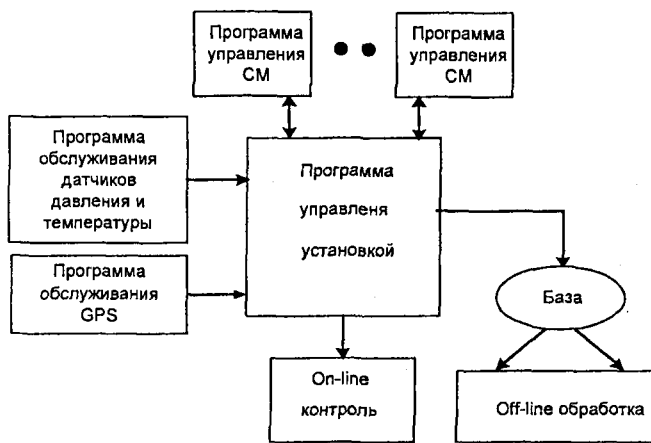


Рис. 3. Структура программного обеспечения установки УРАГАН.

В задачу программы управления супермодуля входит:

- инициализация и управление основными режимами работы системы супермодуля;
- декодирование данных и вычисление параметров трека каждого события в режиме реального времени;

- формирование экспозиционных кадров и их передача вместе с информацией мониторинга супермодуля программе управления установкой.

Работа программы управления одного СМ может осуществляться как в автономном режиме, так и под контролем программы управления всей установкой. Процесс управления потоком данных и взаимодействия основных модулей программы с аппаратной частью установки происходит следующим образом.

При инициализации системы происходит определение базовых адресов и номеров прерываний триггерной платы и адаптера ввода-вывода. Задаются начальные значения переменных. Определяются адреса и размеры буферов данных. Устанавливаются векторы обработчиков прерываний. Далее управление передается подпрограммам измерения шумов и тестирования. По окончании мониторинга триггерная плата переводится в режим экспозиции, на адаптере ввода-вывода инициализируется режим прямого доступа к памяти и устанавливается разрешение прерываний, а управление передается подпрограмме обработки событий и формирования кадра. При фиксировании события триггерная плата выставляет сигнал прерывания. Обработчик прерываний считывает информацию о сработавших плоскостях и «живом» времени, инкрементирует счетчик событий и производит запись в кольцевой буфер. Адаптер ввода-вывода считывает данные с ПБС и в режиме прямого доступа к памяти записывает их в кольцевой буфер. Подпрограмма обработки событий постоянно анализирует разницу между указателем чтения и указателем записи кольцевого буфера и, при поступлении данных, производит декодировку и вычисление номеров сработавших стрипов, реконструкцию и определение параметров трека, суммирование «живого» времени и формирование матриц направлений треков в экспозиционном кадре. Данные формируются программой по кадрам, в которых производится суммирование статистики в заданном в конфигурационном файле временном интервале (обычно 1 минута). Ход работы отображается на экране монитора.

Программно отбираются так называемые bound треки - треки, полностью проходящие через всю регистрирующую область супермодуля. Определяются вероятности срабатываний плоскостей при прохождении через них частицы на основе анализа сработавших на треке стрипов. Подсчитывается количество срабатываний каждого стрипа в зарегистрированных за время экспозиции событиях. В кадре записываются матрицы направлений восстановленных треков, живое время экспозиции, календарное время и данные мониторинга.

Для хранения углового распределения потока частиц используются три формата матриц:

- 1) Линейное разбиение по зенитному (θ) и азимутальному (φ) углам. $M_{дл}(\theta, \varphi)$ – ячейки $\Delta\varphi = 4^\circ$, $\Delta\theta = 1^\circ$, $\varphi = 0 \div 360^\circ$, $\theta = 0 \div 90^\circ$;
- 2) Линейное разбиение по проекционным углам. $M(\theta_Y, \theta_X)$ – ячейки $\Delta\theta_{XY} = 2^\circ$, $\theta_{XY} = 0 \div 90$;
- 3) Разбиение по тангенсам проекционных углов. $M(\text{tg}\theta_Y, \text{tg}\theta_X)$ – ячейки $\Delta\text{tg}\theta_{XY} = \text{tg}80^\circ/45.5$, $\theta_{XY} = 0 \div 80$;

В разделе 3 представлены основные характеристики, влияющие на эффективность работы установки и точность получаемых данных, изложена методика их экспресс-анализа.

Исследована зависимость эффективности регистрации детектора от режима высоковольтного питания, атмосферного давления и температуры в помещении расположения установки. В качестве параметра оценки влияния внешних факторов на работу годоскопа была взята величина эффективности срабатывания каждой плоскости установки. Эффективность срабатывания для i -ой плоскости можно выразить следующей формулой:

$$Eff_i = \frac{N_i}{N_{рек}}$$

где Eff_i – эффективность срабатывания i -ой плоскости; N_i – число срабатываний i -ой плоскости в составе реконструированных треков; $N_{рек}$ – число реконструированных треков в эффективном объеме детектора.

Исследование зависимости основных параметров регистрации частиц супермодулем от изменения напряжения проводилось при незначительном изменении давления и в спокойной геомагнитной обстановке. Корреляционный анализ напряжения питания и эффективности выявил нелинейную зависимость эффективности и темпа счета СМ от напряжения питания с выходом на характерное плато, в пределах которого и была выбрана рабочая точка.

По результатам линейной аппроксимации изменений эффективности плоскостей супермодулей от давления и температуры были получены соответствующие коэффициенты. Большинство значений барометрических коэффициентов лежит в диапазоне 0.01 – 0.02 %/мбар. Температурные коэффициенты варьируются от 0.02 до 0.12 %/°C. Разброс коэффициентов вызван тем, что продув каждой плоскости специальной газовой смесью осуществляется независимо, и, следовательно, условия формирования стримерного разряда в каждой плоскости (и, более того, в каждой камере) являются индивидуальными. Поправки позволяют учесть такое поведение независимым образом для каждой плоскости.

Зависимость интегрального темпа счета всего супермодуля от атмосферного давления может быть описана стандартным выражением для учета барометрического эффекта.

$$I_{P_0} = I - \beta(P - P_0)I_0 \times 100\%,$$

где β — барометрический коэффициент. Для расчета барометрического коэффициента необходимо построить корреляционную зависимость темпа счета от давления за выбранный период наблюдений. Далее методом линейной регрессии определяется коэффициент B уравнения аппроксимирующей прямой. Барометрический коэффициент связан с параметром B следующим образом:

$$\beta = \frac{B}{I_0} \times 100\%.$$

Зная барометрический коэффициент β и значение константы I_0 , можно вводить поправку на барометрический эффект в данные темпа счета, то есть избавиться от изменений темпа счета, вызванных изменением давления. Полученные значения барометрических коэффициентов для СМ8, СМ10 и СМ11 равны 0.195 %/мбар, 0.184 %/мбар и 0,189 %/мбар, соответственно. Различия в значениях барометрического коэффициента обусловлены разными эффективными пороговыми энергиями для СМ8, СМ10 и СМ11, которые определяются местом их расположения. При введении поправок на барометрический эффект для мюонных годоскопов необходимо учитывать, что величина барометрического коэффициента зависит от зенитного угла, так как при увеличении зенитного угла возрастает средняя энергия мюона и средний путь, который мюон пролетает от точки генерации. Данная зависимость представлена на рис. 4.

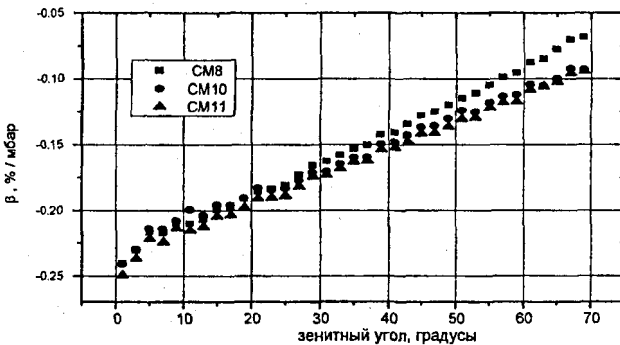


Рис. 4. Зависимость барометрического коэффициента от зенитного угла для трех супермодулей координатного детектора

Влияние температуры атмосферы на интегральный поток мюонов имеет более сложный характер, т.к. температурный эффект обусловлен изменением температуры по всей высоте атмосферы. Для его точного учета необходимо знать дифференциальные температурные коэффициенты (ДТК), позволяющие вносить поправку в темп счета установки с учетом изменения температуры на всех высотах.

К сожалению, высотное распределение температуры в каждый конкретный момент времени, особенно в периоды изменений состояния атмосферы, неизвестно. Поэтому оценку температурного эффекта обычно проводят по темпу счета детектора, усредненному за одни сутки, и по температуре на поверхности Земли, также усредненной за эти сутки. Метод оценки такой же, как и для определения параметров барометрического эффекта. Полученный таким образом среднемассовый температурный коэффициент для годоскопа УРАГАН составляет величину $-0,15\%/^{\circ}\text{C}$

Стабильность и идентичность работы двух супермодулей установки была проверена путем сравнения их интегральных темпов счета за период всего 2007 г. (рис. 5).

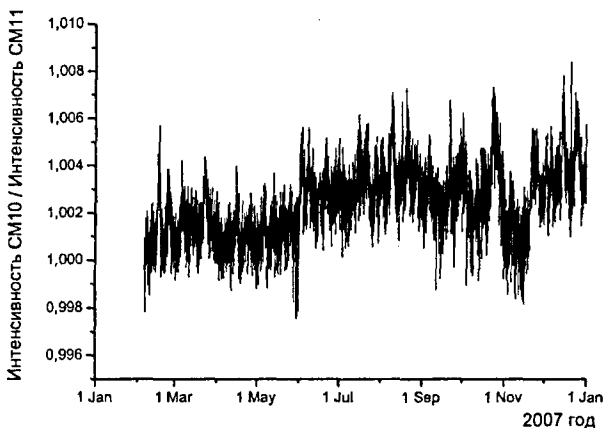


Рис. 5. Отношение темпов счета срабатывания двух супермодулей УРАГАН.

Отношение частоты срабатываний двух супермодулей мюонного годоскопа очень близко к единице, среднее значение составляет 1.003 ± 0.005 , что подтверждает идентичность их отклика на прохождение мюонов. Исследования вариаций полного потока из верхней полусферы одновременно двумя идентичными широкоапертурными мюонными годоскопами проводятся впервые и

позволяют значительно повысить достоверность экспериментальной информации, так как на основе сравнительного анализа работоспособности двух супермодулей установки УРАГАН минимизируются систематические неопределенности, связанные с возможными отклонениями работы регистрирующей системы каждого СМ от штатного режима.

Корректность работы супермодулей мюонного годоскопа УРАГАН может быть проверена по азимутальной анизотропии потока мюонов на поверхности Земли. Хорошо известно, что из-за влияния магнитного поля поток частиц с западного направления немного превышает поток с восточного направления. Но влияние перекрытий и стен здания, в котором размещается УРАГАН, может изменить это отношение, что и было обнаружено на супермодулях СМ10 и СМ11, которые находились в углу экспериментального зала. С целью проверки симметрии собственной светосилы супермодулей был проведен эксперимент, в ходе которого СМ10 и СМ11 были передвинуты в центр зала и размещены рядом с СМ8. При таком размещении СМ10 и СМ11 в центре зала, симметрично по отношению к стенам здания, регистрируемые ими асимметрии потока стали практически идентичными СМ8 и выявили характерную восточно-западную анизотропию, обусловленную магнитным полем Земли.

В процессе работы мюонного годоскопа постоянно проводится экспресс-анализ всех мониторируемых характеристик: атмосферного давления; температуры в помещении установки; количества триггеров за время набора кадра; количества реконструированных событий в кадре; количества bound-событий в кадре; живого времени экспозиции; шумов плоскостей; количества срабатываний плоскостей на треке; таблиц срабатывания стрипов в плоскостях X- и Y-проекции. Минутные матрицы угловых распределений не всегда могут использоваться для анализа, из-за больших статистических флуктуаций, но просуммированные часовые матрицы могут быть использованы для контроля направления интегрального вектора потока частиц. Этот вектор характеризует светосилу и эффективность самого супермодуля, динамика изменений этого вектора характеризует изменение характеристик как самого супермодуля, так и потока регистрируемых частиц.

Получаемые данные ежемесячно заносятся в паспорт работы супермодуля, в котором отражено поведение основных характеристик и приводится список интервалов времени, которые необходимо исключить при анализе данных супермодуля.

В разделе 4 обсуждаются исследовательские возможности мюонного годоскопа УРАГАН.

Возможности установки по исследованию зависимости динамики потока мюонов во время атмосферных и внеатмосферных процессов были изучены в ходе проведения непрерывных измерений пространственно-временных вариаций интенсивности потока мюонов в 2005-2007 гг. Аппаратура работала стабильно с малой долей времени нештатной работы (не более 3% от полного времени регистрации). В ходе эксперимента были получены первые данные по пространственно-угловым вариациям потока мюонов во время различных нестационарных процессов в атмосфере Земли и околоземном пространстве

Например, в периоды развития форбуш-понижений наряду с резким падением интенсивности потока мюонов наблюдается значительное искажение азимутального распределения потока мюонов, максимум которого за 4 часа поворачивается примерно на 60°. Этот эффект обусловлен вращением Земли и движением конуса чувствительности детектора относительно облака солнечной плазмы. После прохождения максимальной фазы форбуш-понижения такие искажения постепенно исчезают.

Одним из наиболее ярких результатов использования мюонных годоскопов для сканирования небесной сферы в режиме мониторинга различных процессов модуляции потока КЛ является возможность получения "мюонных снимков" верхней полусферы. В период до конца суток 9 июля 2006 г. состояние магнитосферы оставалось невозмущенным, однако СМ УРАГАН зарегистрировали ночью 7 июля около 2:00 UTC изменение темпа счета мюонов в определенном угловом секторе небесной полусферы. Это явление исчезло через 4 часа вследствие вращения Земли. Ситуация повторилась ровно через сутки 8 июля в 2:05 UTC. Однако положение возмущения сместилось на небесной полусфере, а амплитуда изменения темпа счета резко увеличилась. Через сутки, когда в зону апертуры СМ10 и СМ11 опять попал данный сектор небесной сферы, понижение дифференциального углового темпа счета мюонов было зарегистрировано значительно раньше – около 22:00 8 июля (рис. 6). Причем отчетливо прослеживалось движение возмущенной области в течение экспозиции данного сектора небесной сферы. Зенитно-азимутальная анизотропия потока мюонов отчетливо проявилась вновь во время начала магнитной бури и регистрировалась в течение всего ее активного периода.

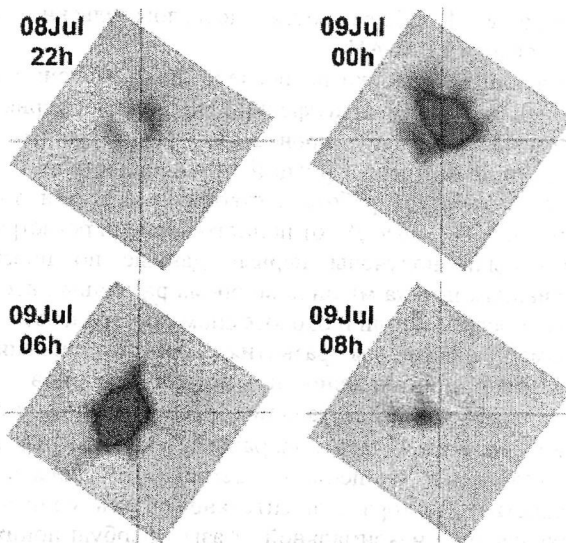


Рис. 6. Мюонные снимки неба 8 и 9 июля 2006 года (усредненные за 1 час экспозиции).

Полученные данные указывают на то, что установка УРАГАН зарегистрировала движение в гелиосфере сгустка магнитной плазмы, образованной во время КВМ на Солнце 6 июля 2006 г., за двое суток до его прихода к орбите Земли.

Одной из основных задач установки УРАГАН является мониторинг вариаций потока мюонов в периоды атмосферных возмущений, в частности, во время мощных гроз. Прохождение грозы над установкой сопровождается своеобразной "впадиной" в темпе счета мюонов. Следует отметить, что наблюдаемое "отражение" поведения давления отличается от обычного "статического" барометрического эффекта. Во время грозы проявляется как бы "динамический барометрический эффект", который приводит как к изменению коэффициента корреляции между интенсивностью мюонов и давлением. Величина "динамического" барометрического коэффициента составляет $\beta_D = -0.33\%/\text{мбар}$ для СМ10 и $\beta_D = -0.32\%/\text{мбар}$ для СМ11. Эти значения почти в два раза превышают обычный "статический" барометрический коэффициент для мюонов.

Особый интерес представляет поиск скрытых периодичностей в потоке мюонов. С использованием разработанных алгоритмов вейвлет-

анализа была проведена обработка данных установки УРАГАН за период 22 – 29 июня 2005 г. с целью выявить в темпе счета квази-периодические сигналы, которые могли возникнуть вследствие волновых процессов в верхних слоях атмосферы (внутренние гравитационные, а также ударные волны). Следует подчеркнуть, что в ходе анализа было выявлен не только сам факт наличия периодического сигнала в потоке мюонов, но и моменты его возникновения (ночь с 24 на 25 июня) и исчезновения (ночь с 26 на 27 июня). Период колебания составляет около пяти часов. Этот сигнал совпадает по времени с прохождением мощного атмосферного фронта через Московскую область. Необходимо отметить, что данная гармоническая составляющая не была обнаружена по измерениям приземного атмосферного давления.

Во время спокойной геомагнитной обстановки зенитно-азимутальные вариации потока мюонов отражают развитие различных атмосферных неоднородностей, например грозových ячеек. Для проверки этой гипотезы был проведен предварительный анализ накопленного материала мюонных снимков, полученных суммированием зарегистрированных данных тремя супермодулями годоскопа УРАГАН в пятиминутных интервалах. Для исследования было выбрано две грозы: 13 мая и 13 июля 2007 года. Первый снимок 13 мая в 12:54 показывает спокойный фон мюонов над московским регионом. Небольшие флуктуации составляют величину порядка одного среднеквадратичного отклонения. На следующем снимке в 12:59 заметно появление небольшого возмущения на северо-востоке в районе г. Мытищи. Далее видно, что возмущение продвигается на юг и достигает максимума в 13:14, находясь в районе г. Люберцы. Далее возмущение перемещается на юг по направлению к г. Подольск. Примерно через час после начала грозы в 13:49 возмущение практически рассеивается.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1) Разработка аппаратуры.

- Разработана структура супермодуля УРАГАН на базе камер стримерных трубок, обеспечивающая регистрацию мюонов в диапазоне зенитных углов $0^\circ - 84^\circ$ с высоким пространственным (~ 1 см) и угловым ($\sim 0.8^\circ$) разрешением.

- Разработаны системы триггирования и сбора данных, как для одного супермодуля, так и для совокупности нескольких идентичных супермодулей с общей синхронизацией по календарному времени.

- Разработаны основные элементы измерительной системы супермодуля – плата быстрого считывания и триггерный модуль, обеспечивающие сбор данных с мертвым временем около 10%, подсчет

живого времени с дискретностью до 125 нс, мониторинг шумов плоскостей и тестирование цепей считывания.

- Совместно со специалистами НПО ФОРМ разработана специализированная микросхема двухканального усилителя-дискриминатора-формирователя, предназначенная для преобразования сигналов со стрипов детектора в сигналы ТТЛ уровней заданной длительности.

2) Обеспечение годоскопического режима работы.

- Разработаны методики и созданы стенды для тестирования и наладки элементов детектора. Разработан многофункциональный контроллер, алгоритмы и программное обеспечение для тестирования плат быстрого считывания в автоматическом режиме.

- Проверено и налажено более 1000 плат быстрого считывания, обеспечено их функционирование в области плато эффективности с разбросом порогов срабатывания в узком интервале (3.8 ± 0.3 мВ).

- Последовательно в течение 2005 – 2007 гг. собраны, налажены и введены в эксплуатацию три супермодуля мюонного годоскопа УРАГАН.

- Разработано программное обеспечение для обслуживания установки УРАГАН: программы регистрации и управления супермодулями, обслуживания датчиков атмосферного давления и температуры, on-line контроля работы супермодулей.

- Разработан комплекс программ, обеспечивающий непрерывное накопление мюонных снимков-матриц и получение непрерывных пространственно-угловых распределений регистрируемого потока мюонов.

3) Исследование характеристик мюонного годоскопа.

- Проведено несколько методических серий по изучению характеристик супермодулей.

- Исследовано изменение отклика детектора при вариациях атмосферного давления, температуры, рабочего напряжения и состава газовой смеси. Полученные результаты позволили определить основные факторы, влияющие на стабильность работы супермодулей, получить зависимость эффективности плоскостей от различных параметров.

- Измерены барометрический ($-0,18$ %/мбар) и температурный ($-0,15$ %/°C) коэффициенты для различных супермодулей. Измерена восточно-западная асимметрия потока мюонов.

- Разработаны методика экспресс-анализа экспериментальных данных и паспорт супермодуля, которые позволяют формировать базы данных для физического анализа.

4) Исследовательский потенциал созданной установки.

- В 2005 – 2007 гг. обеспечено проведение длительных измерений пространственно-временных вариаций потока мюонов. Аппаратура работала стабильно с малым числом сбоев – отношение времени нештатной работы к суммарному времени не превышало 3%. Отношение частоты срабатываний двух супермодулей мюонного годоскопа близко к единице, среднее значение и разброс составили 1.002 ± 0.005 .

- Продемонстрирована возможность обнаружения гелиосферных возмущений, вызывающих форбуш-понижения, за двое суток до их появления в околоземном пространстве.

- Продемонстрирована возможность наблюдения грозовых явлений в потоке мюонов и подтверждено существование волновых процессов в периоды возникновения и развития ураганов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

- 1) Н.Н.Вонсовский, К.Г.Компаниец, Ю.Н.Родин, В.В.Шутенко Многофункциональный контроллер для сбора данных со стримерных камер координатного детектора, Приборы и техника эксперимента, 2000, № 2, с. 58-62.
- 2) Н.С.Барбашина, А.А.Езубченко, Р.П.Кокоулин, К.Г.Компаниец, А.А.Коновалов, А.А.Петрухин, Д.В.Чернов, В.В.Шутенко, Э.Е.Янсон. Координатный детектор для исследования горизонтального потока космических лучей, Приборы и техника эксперимента, №6, 2000, с. 20-24.
- 3) D.V. Chernov, N.S. Barbashina, G. Mannocchi, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, A.A. Petrukhin, O. Saavedra, V.V. Shutenko, D.A. Timashkov, G. Trincherо, I.I. Yashin. Experimental setup for muon diagnostics of the Earth's atmosphere and magnetosphere (the URAGAN project). Proc. 29th ICRC, Pune, India, 2005, v. 2, pp. 457-460.
- 4) К.Г.Компаниец. Широкоапертурный мюонный годоскоп большой площади УРАГАН. Труды 7-й Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики, т. 2, М., МИФИ, 2007, с. 127-138.
- 5) Н.В.Ампилогов, К.Г.Компаниец, Учёт влияния внешних факторов на эффективность работы установки УРАГАН. Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научн. трудов. М., МИФИ, 2007, т. 7, с. 89-90.
- 6) Н.С.Барбашина, Р.П.Кокоулин, К.Г.Компаниец, Дж.Маннокки, А.А.Петрухин, О.Сааведра, Д.А.Тимашков, Дж.Тринкоро, Д.В.Чернов, В.В.Шутенко, И.И.Яшин. Широкоапертурный мюонный

детектор для диагностики атмосферы и магнитосферы Земли. Известия РАН. Серия физическая, Т. 71, № 7, 2007, с. 1072-1074.

- 7) Н.С.Барбашина, Р.П.Кокоулин, К.Г.Компаниец, Дж.Маннокки, А.А.Петрухин, О.Сааведра, Д.А.Тимашков, Дж.Триккоро, Д.В.Чернов, В.В.Шутенко, И.И.Яшин. Широкоапертурный мюонный годоскоп большой площади УРАГАН. Приборы и техника эксперимента, 2008, № 2, с. 26-32.
- 8) К.Г.Компаниец, Д.А.Тимашков, В.В.Шутенко, И.И.Яшин. Система считывания информации со стримерных камер. Патент РФ на изобретение №2327209, регистр. 20 июня 2008 г.

Подписано в печать 12.1.1.08 Заказ 350 Тираж 100 экз.

Типография МИФИ. Москва, Каширское шоссе, 31

24