

На правах рукописи

Ампилогов Николай Владимирович

Мюонный годоскоп на сцинтилляционных стрипах
с оптоволоконным светосбором

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

15 МАР 2017

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Ампилогов



006654132

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Научный руководитель: Яшин Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: Бруданин Виктор Борисович, доктор физико-математических наук, начальник отдела ОИЯИ, г. Дубна

Стожков Юрий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФИАН, г. Москва

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

Защита состоится 19 апреля 2017 г. в 15 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон (499) 324-87-66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru/dissertations>.

Автореферат разослан «07» марта 2017 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор


С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Солнечно-земные связи и их исследования являются в настоящее время одним из наиболее бурно развивающихся научных направлений. Прежде всего, это изучение различных аспектов влияния гелиофизических процессов, вызванных солнечной активностью (вспышки, корональные выбросы масс и т.д.), на геофизические процессы. Не менее важным является воздействие солнечной активности на функционирование различных технических систем (связь, навигация, интернет, линии электропередач и трубопроводы, электронная аппаратура самолетов и спутников), а также на безопасность жизнедеятельности людей. В этой связи активно развиваются методы мониторинга и прогноза космической погоды.

В настоящее время мониторинг гелиофизической обстановки в основном осуществляется спутниками, расположенными в точке либрации L1 и контролирующими вспышки на Солнце, состояние межпланетного магнитного поля и характеристики солнечного ветра, а также мировой сетью нейтронных мониторов (НМ), регистрирующих в различных точках земного шара вариации вторичных космических лучей, вызванные процессами модуляции в межпланетном пространстве и в магнитосфере. Однако спутниковая аппаратура, которая находится в точке Лагранжа, дает достоверный прогноз возникновения возмущения магнитосферы не ранее, чем за час до прихода возмущенной области к Земле, а нейтронные мониторы не могут определять направление прихода частиц, и данные НМ относятся к потоку первичных космических лучей (ПКЛ) невысоких энергий (2-10 ГэВ).

Для исследования вариаций ПКЛ более высоких энергий можно использовать мюонную компоненту вторичных космических лучей. Для этих целей в основном используют многонаправленные мюонные телескопы. Мюоны сохраняют направление движения родивших их первичных частиц,

поэтому оценка траекторий их движения с хорошей угловой точностью дает информацию о пространственных характеристиках ПКЛ. Однако мюонные телескопы не являются трековыми детекторами и дают только информацию о потоках мюонов в некотором наборе телесных углов с угловым раствором $\sim 10^\circ$.

Этого недостатка лишен мюонный годоскоп УРАГАН, созданный в НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ. Детектор УРАГАН с высокой угловой точностью ($< 1^\circ$) регистрирует в режиме реального времени каждый трек, пришедший с любого направления небесной полусферы. Создание годоскопа УРАГАН явилось основой для развития мюонной диагностики – нового метода удаленного мониторинга и изучения динамических процессов в околоземном пространстве и в атмосфере Земли.

Детектор УРАГАН существует в единичном экземпляре и воспроизвести его невозможно. Стримерные трубки, на основе которых создан годоскоп, в настоящее время не производятся. Кроме того, эффективность работы стримерных трубок зависит от внешних метеопараметров (температура, давление, влажность); для работы УРАГАН требуется достаточно высокое напряжение питания (4.5 кВ) и автоматизированная система газоподготовки. Поэтому для дальнейшего развития метода мюонной диагностики необходимы мюонные годоскопы нового типа.

Разработка простого, надежного, удобного в обслуживании и в транспортировке в любую точку земного шара годоскопа на основе современных комплектующих является актуальной научной проблемой.

Цель работы

Разработка и создание аппаратуры нового поколения для исследования и мониторинга состояния гелносферы, магнитосферы и атмосферы Земли методом мюонной диагностики.

Научная новизна

Разработан и создан первый в мире мюонный годоскоп модульного типа на сцинтилляционных стрипах с оптоволоконным светосбором, специально

предназначенный для исследования динамических процессов в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли по пространственно-временным вариациям потока мюонов. Экспериментально показано, что минимальное количество координатных плоскостей мюонного годоскопа такого типа равно четыре. Разработан и реализован новый метод on-line реконструкции треков в мюонных годоскопах, основанный на поиске прямолинейного участка среди всех сработавших каналов детектора.

Достоверность

Достоверность полученных результатов определяется тем, что базовые модули сцинтилляционного мюонного годоскопа были протестированы на сертифицированном оборудовании с помощью аттестованной методики. Фотоумножители и блоки электроники системы регистрации тестировались с использованием сертифицированного измерительного оборудования. Значения оцениваемых параметров анизотропии потока мюонов были подтверждены данными мюонного годоскопа УРАГАН.

Практическая значимость

Созданная установка используется для непрерывного мониторинга состояния околоземного пространства в реальном времени. Годоскоп прост в эксплуатации и технологичен, что позволяет рассматривать его в качестве типового детектора при создании сети мюонных годоскопов для дистанционного заблаговременного обнаружения опасных явлений (магнитные бури, ураганы и т.д.). Разработанные при его создании методы и технологические решения могут быть использованы в других детекторах трекового типа.

Личный вклад

Автор участвовал во всех этапах разработки и создания сцинтилляционного мюонного годоскопа с оптоволоконным светосбором (СцМГ). Непосредственно автором была разработана конструкторская и технологическая части проекта СцМГ, созданы большинство стендов и

методик для тестирования элементов годоскопа, собраны и протестированы все базовые модули (БМ) СцМГ. Автор принимал непосредственное участие в проведении экспериментов, получении методических и физических результатов, в написании всех статей по детектору и результатам проведённых на СцМГ исследований.

Автор защищает

1. Многослойный мюонный годоскоп СцМГ модульного типа с оптоволоконным светосбором, обеспечивающий годоскопический режим регистрации мюонов, приходящих с любого направления небесной полусферы, в режиме реального времени.
2. Систему автоматизированных стендов для тестирования основных элементов базовых модулей.
3. Технологическую линию по изготовлению и отбору стрипов, тестированию элементов детектирующей системы и сборке базовых модулей СцМГ.
4. Методику исследования характеристик БМ в потоке мюонов, выделяемых супермодулем МГ УРАГАН.
5. Характеристики созданного мюонного годоскопа СцМГ.

Апробация

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: Международной конференции по космическим лучам – ICRC (2009, 2011), Международной конференции Vulcano Workshop (2012), Баксанской молодежной школе экспериментальной и теоретической физики (2008, 2009, 2010), Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ 2010), Европейском симпозиуме по космическим лучам (ECRS 2010), Международной школе по инструментам физики элементарных частиц (ICFA 2010), научных сессиях НИЯУ МИФИ (2009, 2010, 2011, 2012, 2015), Международной конференции по физике частиц и астрофизике (ICPPA-2015) и опубликованы в их трудах, а также в статьях в журналах: "Известия РАН.

Серия физическая", "Краткие сообщения по физике", "Ядерная физика и инжиниринг", "Physics Procedia", "Journal of Physics: Conference Series". В процессе работы над ЦМГ разработан и получен патент на изобретение №2461903 от 20.09.2012 «Способ калибровки мюонных годоскопов».

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения. Объём диссертации: 132 страницы, 100 рисунков, 9 таблиц, 97 наименований цитируемой литературы и электронных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко описывается метод мюонной диагностики окружающего пространства – гелиосферы, атмосферы и магнитосферы Земли, а также его преимущества по сравнению с существующими методами анализа вариаций космических лучей, основанными на данных нейтронных мониторов и многонаправленных мюонных телескопов.

Практическая реализация мюонной диагностики была осуществлена с помощью мюонного годоскопа УРАГАН, созданного в НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ. Под годоскопическим режимом работы мюонного детектора понимается регистрация и восстановление в режиме реального времени трека каждого мюона, что дает возможность измерения пространственно-углового распределения потока мюонов с высоким угловым разрешением. С помощью детектора и УРАГАН (общей площадью $\sim 46 \text{ м}^2$; угловая точность $\sim 1^\circ$) были продемонстрированы возможности мюонной диагностики по раннему обнаружению и изучению активных процессов, происходящих в атмосфере и околоземном пространстве.

К сожалению, годоскоп УРАГАН является уникальным, так как он был создан на базе детекторов, которые первоначально предназначались для решения задач физики высоких энергий. Его детектирующие элементы (стримерные трубки) не оптимизированы для решения задач мюонной

диагностики. Поэтому была поставлена задача разработки нового мюонного годоскопа типовой конструкции, который может использоваться для дальнейшего развития метода мюонной диагностики.

В разделе 1 описываются конструкция и элементы детектирующей системы супермодуля сцинтиляционного мюонного годоскопа.

Основным детектирующим элементом СцМГ является сцинтиляционный стрип с вклеенным в него спектрсмещающим оптическим волокном Y11 (Kuraray) диаметром 1 мм. При прохождении заряженной частицы в сцинтилляторе образуется световая вспышка. Фотоны сцинтилляции попадают в оптическое волокно и переизлучаются в фотоны зеленой части видимого спектра, которые и регистрируются фотоприемником.

Сцинтиляционные стрипы изготовлены из полистирола с добавлением 2 % р-терфенила и 0.02% РОРОР. Пластический сцинтиллятор обладает целым рядом свойств, обуславливающих его широкое применение при создании трековых детекторов в физике высоких энергий.

Для создания многоканального трекового детектора с оптоволоконным светосбором в качестве фотоприемника в СцМГ были использованы 64-пиксельные сборки ФЭУ H7546B и H8804 (Hamamatsu). Эти сборки ФЭУ незначительно различаются конструктивно. Данный тип ФЭУ наиболее подходил по нескольким характеристикам: низкий уровень собственных шумов; слабая температурная зависимость уровня собственных шумов в сравнении с полупроводниковыми фотоприемниками; небольшое номинальное значение высоковольтного напряжения питания; доступность разработанных для данных ФЭУ специализированных интегральных микросхем считывания сигналов (ASIC MAROC2).

Выбранное рабочее напряжение высоковольтного питания (-800 В), обеспечивает среднее значение коэффициента усиления $M = 1.03 \cdot 10^6$ ($\sigma \approx 0.19 \cdot 10^6$). Граница диапазона линейности каналов ФЭУ (средняя по всем

ФЭУ) составляет 54 ф.э. При рабочем пороге около 0.3 ф.э. частота шумовых срабатываний большинства каналов ФЭУ не превышает 1-2 импульсов/с.

Для обеспечения модульной конструкции и надёжной светонезлоляции стрипы были объединены в базовые модули по 64 стрипа в каждом. Для осуществления сборки БМ и придания ему необходимой жесткости использована технология крепления элементов с помощью двухстороннего скотча. Стрипы БМ, вклеенные между двумя алюминиевыми листами, образуют неразборную «сэндвич»-структуру, обладающую достаточной жесткостью, позволяющую эффективно светонезлолировать и защитить стрипы от повреждений. Опволоконна стрипов БМ заведены на один ФЭУ H8804.

Общий вид структуры супермодуля СцМГ представлен на рисунке 1. Из двух совмещённых по длинной стороне (смежных) базовых модулей СцМГ формируется координатный слой (КС). Два слоя базовых модулей, в которых сцинтилляционные стрипы имеют взаимно-ортогональное расположение, образуют координатную плоскость (КП). Один КС предназначен для определения координаты X, а другой – координаты Y точки пересечения трека регистрируемого мюона с КП. Супермодуль (СМ) СцМГ состоит из четырех КП. В каждой координатной плоскости локализуется место пролета заряженной частицы, по координатной информации с нескольких плоскостей

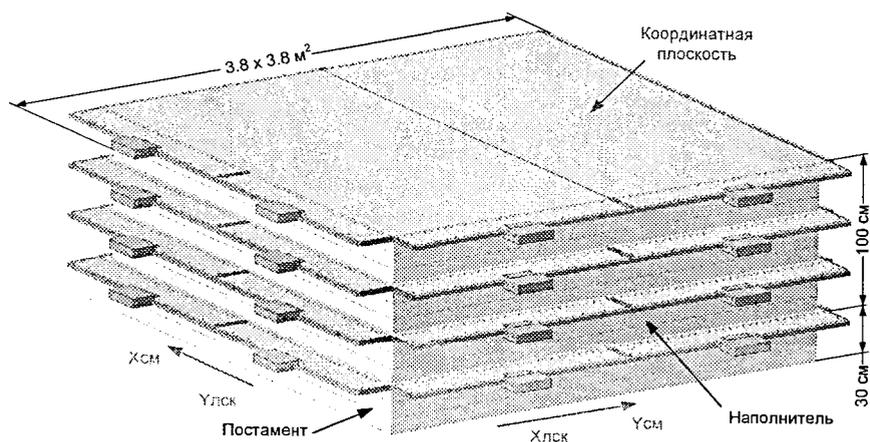


Рисунок 1. 3D-модель СМ СцМГ с четырьмя координатными плоскостями.

реконструируется прямолинейный трек мюона, прошедшего через рабочий объем детектора. Для каждого трека оцениваются зенитный (θ) и азимутальный (φ) углы и два проекционных угла (θ_x, θ_y). Фотография двух СМ СцМГ с блоками аппаратуры представлена на рисунке 2.

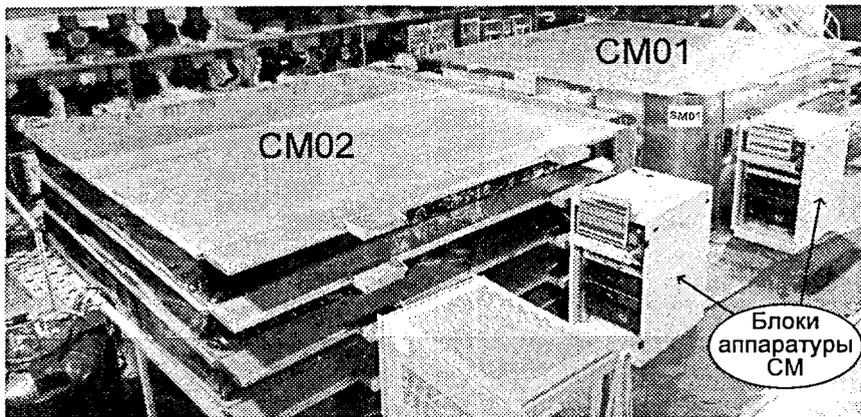


Рисунок 2. Фотография двух СМ СцМГ с блоками аппаратуры.

В разделе 2 приведено описание стенов разработанных для тестирования основных элементов детектора и методика настройки собранных супермодулей СцМГ.

При создании сцинтилляционного мюонного годоскопа, помимо разработки всех элементов конструкции, аппаратных и программных составляющих систем регистрации и сбора данных, необходимо решение целого комплекса следующих задач:

- создание стенов и методик для тестирования всех элементов детектирующей и регистрирующей систем: стрипов, ФЭУ, плат ФЭУ, собранных базовых модулей;
- организация технологической линии создания базовых модулей;
- тестирование собранных базовых модулей;
- настройка собранных супермодулей СцМГ.

Для тестирования изготовленных сцинтилляционных стрипов с оптоволоконным светосбором был создан универсальный стенд, на котором

измерялся средний отклик стрипа в зоне наименьшего светосбора. Внутри светоизолированного корпуса стенда помещались специализированные рамы со стрипами. Полированные торцы оптических волокон тестируемых стрипов заводились на 16-канальный ФЭУ Н8711. Для ускорения процесса тестирования использовался специально разработанный спектрометр электронов с триггерным каналом. С помощью магнитного поля и коллиматора из потока электронов от источника ^{90}Sr выделялся узкий пучок с энергией около 1.8 МэВ. Средний отклик стрипа на пролёт электрона ($\overline{Q_e}$) приводился к эквивалентному отклику на пролёт мюона ($\overline{Q_{\mu, \text{ф.э.}}}$):

$$\overline{Q_{\mu, \text{ф.э.}}} = \frac{\overline{Q_{\mu}}}{Q_{1e} \cdot \overline{K^{\text{опт}}}}, \quad (1)$$

где $\overline{Q_{\mu}}$ – средний отклик стрипов на пролет мюона выделенного калибровочным мюонным телескопом; $\overline{Q_{1e}}$ – средний заряд в одноэлектронном пике канала ФЭУ, на котором проводилось измерение данного стрипа; $\overline{K^{\text{опт}}}$ – средняя относительная чувствительность соответствующего канала стенда.

Связь $\overline{Q_{\mu}}$ с $\overline{Q_e}$ получена с помощью измерений на контрольной группе стрипов, для каждого стрипа которой был измерен отклик как с помощью мюонного телескопа, так и с помощью спектрометра. Минимальный порог отбора стрипов по световыходу составил 4 ф.э., что соответствует ~ 98 % эффективности регистрации мюона при пороге 0.3 ф.э. Всего в процессе создания СцМГ на данном стенде было протестировано около 2.5 тысяч стрипов.

Перед использованием в базовых модулях на специализированном стенде проверялась исправность всех каналов плат электроники ФЭУ (подробнее данная плата описана в разделе 3) и изучались следующие их характеристики: чувствительность АЦП; чувствительность ЦАП предусилителя; чувствительность ЦАП компаратора; взаимные наводки каналов.

После сборки базовые модули СцМГ тестировались в потоке мюонов с известными треками, выделяемыми одним из супермодулей координатно-трекового детектора УРАГАН. Тестируемый БМ располагался на СМ УРАГАН. Триггерная система годоскопа УРАГАН выделяла треки частиц, которые пересекали рабочую площадь БМ, при этом происходило считывание сигналов-откликов со всех каналов данного БМ.

По результатам тестирования для каждого базового модуля составлялся паспорт, содержащий наиболее важную с эксплуатационной точки зрения информацию о БМ. Тестирование всех 32-х БМ показало, что измеренная средняя интегральная эффективность срабатывания БМ составила 98.8 % ($\sigma = 0.5$ %).

После сборки супермодули настраивались на режим максимального темпа счета мюонов. Параметрами настройки были коэффициенты усиления предусилителей каналов регистрации БМ и общий порог для всех каналов одного БМ. В результате:

- выровнен разброс частоты срабатывания каналов (“Hit”) для БМ на уровне ≤ 12 %;
- определены параметры настройки СМ, обеспечивающие максимальный темп счета реконструированных треков мюонов;
- уменьшен разброс средних уровней “Hit” между различными БМ одного СМ до уровня ≤ 4 %.

В разделе 3 приводится описание платы съёма сигналов ФЭУ базового модуля, систем триггирования, регистрации и обработки данных СцМГ , алгоритм реконструкции треков и структура формата выходных данных детектора.

Для обеспечения эффективной регистрации малых вариаций потока мюонов на поверхности Земли со всех направлений верхней полусферы была разработана многоуровневая, модульная регистрирующая система, которая обеспечивает съем и обработку сигналов, поступающих с мультианодных ФЭУ БМ в следующих режимах работы:

- 1) режим непрерывной экспозиции;
- 2) режим мониторинга темпа счета БМ;
- 3) режим светодиодного мониторинга БМ.

Считывание сигналов со всех каналов 64-анодного ФЭУ каждого БМ выполняется с помощью специализированной микросхемы MAROC2, которая работает в составе специально разработанной платы ФЭУ. На входе каждого канала MAROC2 расположен предусилитель с переменным коэффициентом усиления от 0 до 4, далее детектирующий канал разделяется на триггерную и спектрометрическую ветви. Номера сработавших каналов и коды АЦП считываются с помощью ПЛИС (EP1C6Q240C6), которая обеспечивает формирование триггера первого уровня и осуществляет управление настройками микросхемы MAROC2.

Аппаратный триггер первого уровня представляет собой мажоритарную схему совпадения сигналов «ИЛИ» со всех координатных слоев СМ. При выполнении аппаратного триггерного условия, загружаемого из конфигурационного файла при старте экспозиции, триггерная система вырабатывает сигнал HOLD, инициируя далее считывание информации со всех детектирующих каналов СМ, а также вычисляется «живое» время регистрации и темп счета шумов БМ при выбранных порогах.

Центральный блок (Суслепе III) считывает информацию от сработавших БМ (триггерная информация) и о состоянии всех каналов СМ (данные) и передает её в периферийный ПК, который проводит реконструкцию треков мюонов и предварительный отбор событий и формирует основу кадра данных. Далее серверный ПК дописывает в кадр информацию с внешних датчиков атмосферного давления, температуры и относительной влажности в экспериментальном зале; метку календарного времени от системы ГЛОНАСС/GPS. Кадры последовательно записываются в постоянную память ПК вместе с файлами справочной информации.

Для обеспечения эффективной работы супермодуля СцМГ был разработан комплекс программного обеспечения, который реализует обмен

данными между всеми блоками систем регистрации, сбора и формирования данных (DAQ). Функциональная схема комплекса DAQ приведена на рисунке 3.

Для восстановления параметров треков мюонов в реальном времени был разработан новый метод реконструкции событий – метод поиска прямолинейного участка.



Рисунок 3. Функциональная схема DAQ супермодуля СцМГ.

Прямолинейный трек мюона в пространстве восстанавливается по двум проекциям, поиск которых ведётся отдельно по X и Y координатным слоям путём перебора всех комбинаций. В каждом КС выбираются наборы сработавших каналов, которые укладываются в прямолинейный коридор шириной L (параметр алгоритма реконструкции). Для окончательной реконструкции трека используются координаты сработавших стрипов, наилучшим образом расположившихся в пределах указанного коридора и в большем количестве координатных слоев. Сравнение результатов тестовых наборов данных супермодулей СцМГ и УРАГАН, а также применение другого метода реконструкции треков одиночных мюонов к данным детектора СцМГ, позволило определить оптимальные условия выработки триггера – больше 5 сработавших координатных слоёв из 8, и ширину коридора реконструкции $L = 40$ мм.

Моделирование методом Монте-Карло в программном пакете Geant4 показало, что новый метод реконструкции дает угловое отклонение реконструированного трека мюона от модельного не более 1.3° (для 95 % событий).

Данные СМ СцМГ набираются по минутным интервалам времени (кадрам) и содержат мониторинговую информацию, по которой проводится оценка корректности работы детектора, и матрицы угловых распределений параметров реконструированных треков.

Для удобства дальнейшего физического анализа угловых распределений, в структуре кадра данные накапливаются в несколько матриц (размеры каждой матриц 91×91 угловых ячеек):

- 1) с разбиением по зенитному (θ) и азимутальному (φ) углам для всех зарегистрированных треков: $M_{\text{all}}(\theta, \varphi)$;
- 2) матрица аналогичная $M_{\text{all}}(\theta, \varphi)$, но для треков прошедших все КП рабочего объема СМ – «bound»: $M(\theta, \varphi)$;
- 3) с разбиением по проекционным углам – $M(\theta_x, \theta_y)$;
- 4) матрица, ячейки которой соответствуют интервалам тангенсов проекционных углов $M(\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x)$.

В процессе проведения экспозиции осуществляется последовательное покадровое суммирование матриц за интервалы времени 5 мин и 60 мин соответственно, и формируются временные ряды различных параметров, используемых для анализа углового распределения потока мюонов: вектор локальной анизотропии \vec{A} (сумма единичных векторов треков частиц, нормированная на число треков); длина и проекции \vec{A} : $A, A_{\text{South}}, A_{\text{East}}, A_z$; относительный вектор анизотропии \vec{r} ; горизонтальная проекция r_h :

$$\vec{r} = \vec{A} - \vec{A}_N, \quad r_h = \sqrt{r_{\text{South}}^2 + r_{\text{East}}^2}, \quad (2)$$

где \vec{A} – текущий вектор локальной анизотропии; \vec{A}_x – вектор \vec{A} , усреднённый за предыдущие 24 часа.

Для получения волновых характеристик изменения углового распределения частиц используется 2D Фурье-преобразование сглаженной матрицы проекционных углов $M(\theta_x, \theta_y)$.

Для визуализации динамики изменений пространственно-угловых характеристик потока мюонов используется мюонография – матрица вариаций (отклонений от усредненной за предыдущие 24 часа матрицы) углового распределения потока мюонов. Мюонографии формируются из матриц $M(\text{tg}\theta_y, \text{tg}\theta_x)$ и строятся в географической системе координат. Аналогично для ПКЛ строятся мюонографии в системе координат GSE (Geocentric Solar Ecliptic).

В разделе 4 описываются процедуры мониторинга работы супермодулей СцМГ; приводятся результаты изучения эффективности регистрации в зависимости от азимутальной ориентации СМ; оцениваются дифференциальные и барометрические коэффициенты для этого детектора и описывается процедура учета в данных СцМГ барометрического и температурного эффектов; сравниваются данные мюонных годоскопов СцМГ и УРАГАН, находящихся в одном помещении; приводятся примеры откликов в данных СцМГ на форбуш-эффект и грозу. Также оцениваются перспективы использования СцМГ в составе сети мюонных детекторов.

DAQ формирует мониторинговую информацию: темпы счета триггеров, реконструированных треков, шумов БМ и т.д., а также эффективности X и Y и показания датчиков P, t, H; которая отображается в графическом интерфейсе программы в виде 1-минутных временных рядов (за последние 24 часа). Отдельная программа позволяет строить off-line временные ряды произвольной периодичности (кратной 1 мин) за необходимый временной интервал.

В одной из тестовых серий, каждый четырёхплоскостной СМ был разделен на СМ по две координатные плоскости. Двухплоскостные СМ2 и СМ3 были повернуты в азимутальной плоскости относительно СМ1 на 45° и 90° соответственно, при этом в настройках СМ эти углы не учитывались.

Результаты данной тестовой серии показали, что относительный вектор анизотропии (\vec{r}) и его горизонтальная проекция r_h и проекции на направления Север-Юг (r_{South}) и Восток-Запад (r_{East}), дающие информацию о деформации углового распределения регистрируемого потока частиц, не зависят от ориентации стрипов супермодулей.

При исследовании вариаций потока мюонов на поверхности Земли, вызванных внеатмосферными явлениями, необходимо учитывать барометрический и температурный эффекты:

$$M^{cor}(\theta, \varphi, t, \Delta t) = M(\theta, \varphi, t, \Delta t) + \Delta M^P(\theta, t, \Delta t) + \Delta M^T(\theta, t, \Delta t), \quad (3)$$

где $M(\theta, \varphi, t, \Delta t)$ – минутная матрица зарегистрированных треков мюонов, θ и φ – зенитный и азимутальный углы для середины угловых ячеек матрицы, размер ячеек 1° по зенитному углу θ и 4° по азимутальному углу φ , t – календарное время начала набора матриц, Δt – интервал суммирования. ΔM^T и ΔM^P – поправки на температурный и барометрический эффекты.

На рисунке 4 показано сравнение темпа счета супермодуля СцМГ для ячеек матрицы $26^\circ \leq \theta \leq 34^\circ$ и $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ за период 01.01.2016 – 25.08.2016 без коррекции и с коррекцией на метеоэффекты. После коррекции на атмосферные эффекты отчетливо проявляется модуляция характеристик потока мюонов внеатмосферного происхождения. Также после поправок на атмосферные эффекты проявляются суточные колебания темпа счета, связанные с вращением Земли в геомагнитном поле.

Сравнение темпов счета СМ СцМГ между собой показало, что отношение темпов счета СМ описывается нормальным распределением. Это указывает, что оба супермодуля СцМГ работают одинаково. На рисунке 5 приведены временные ряды отношения темпов счета одиночных мюонов для каждого СМ СцМГ и усреднённого по трем СМ МГ УРАГАН. Из этого рисунка видно, что разброс в темпе счета одиночных мюонов любого СМ СцМГ относительно СМ УРАГАН не превышает 0.4 % (для 95 % точек экспозиции). Разница (≈ 3.3 %) между темпами счета двух СМ СцМГ обусловлена различием их расположения в помещении относительно стен.

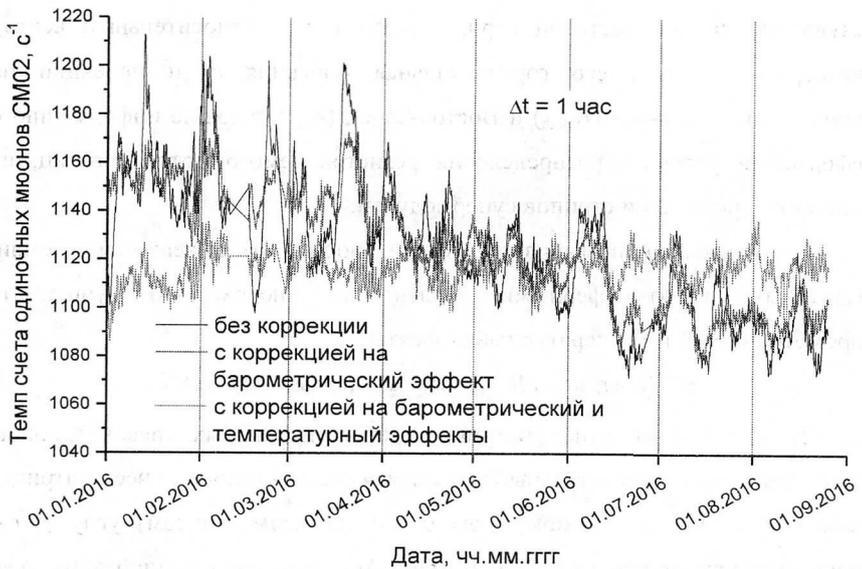


Рисунок 4. Среднечасовой темп счета одиночных мюонов SM_{02} $СцМГ$: без коррекции и с учетом атмосферных эффектов.

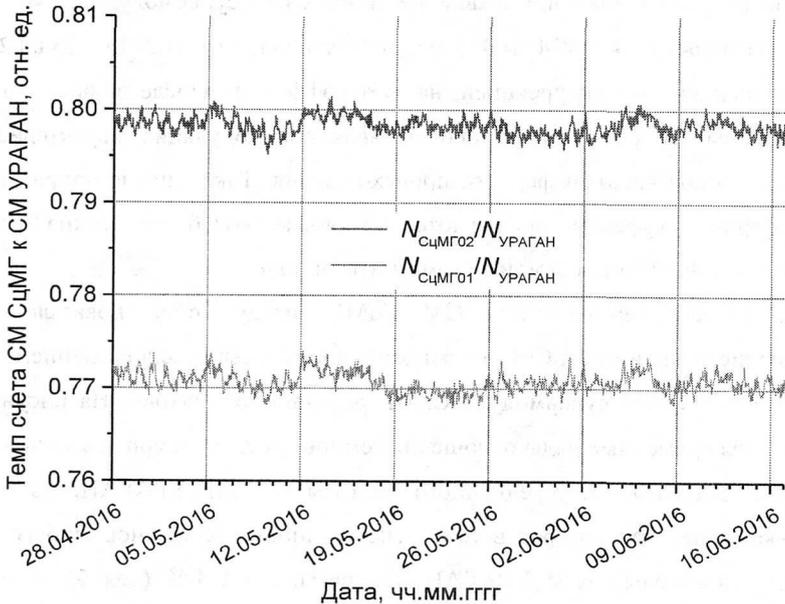


Рисунок 5 – Временные ряды отношения темпов счета одиночных мюонов $СМ_{01}$ и $СМ_{02}$ $СцМГ$ к $СМ$ $УРАГАН$ в период с 20.04.2016 до 15.06.2016.

На рисунке 6 приведены среднечасовые временные ряды темпов счета Московского нейтронного монитора – МНМ (мин^{-1}), СцМГ (с^{-1}) и МГ УРАГАН (с^{-1}). В течение второй половины июля 2015 г. хорошо видны отклики всех детекторов на фобуш-понижение 22 июня 2015 г. Темпы счета одиночных мюонов по данным СцМГ и УРАГАН уменьшались одинаково $\sim 3\%$. Падение темпа счета МНМ составило $\sim 6.5\%$. Приведённые данные показывают, что детектор СцМГ чувствителен к мощным процессам солнечной активности.

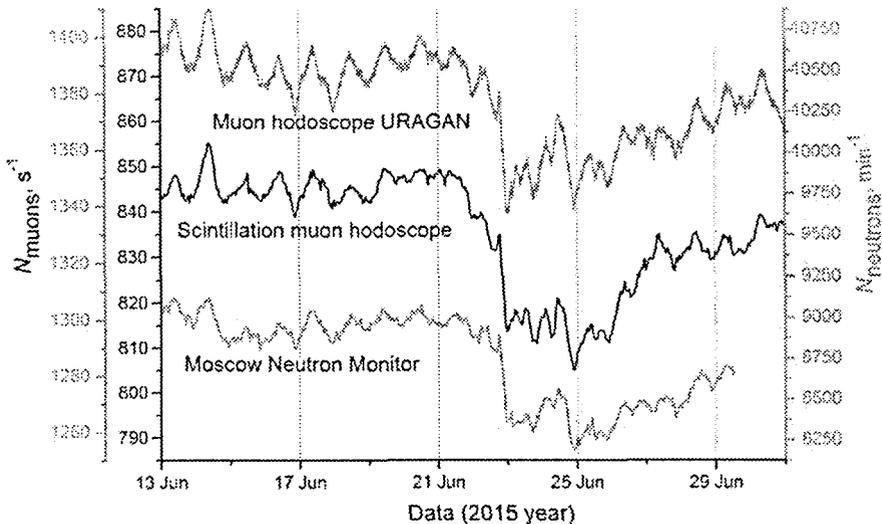


Рисунок 6. Временные ряды темпов счета одного СМ мюонного годоскопа УРАГАН, СцМГ и московского нейтронного монитора (каждая точка – усредненные данные за час) во время фобуш-понижения 22 июня 2015 г.

Активные турбулентные процессы в атмосфере Земли, например грозы, приводят к резким короткопериодическим изменениям анизотропии потока мюонов. Для визуализации динамики таких изменений используются серии мюонографий. Примеры таких 5-минутных мюонографий, полученные по данным СМ01 СцМГ и СМ01 МГ УРАГАН, во время грозы 14 июня 2014 г. приведены на рисунке 7. Оттенками серого на каждой из мюонографий показаны отклонения числа зарегистрированных частиц в единицах

стандартного отклонения. Оба детектора демонстрируют схожий уровень уменьшения потока мюонов: $\delta \approx -0.47\%$ для СМ01 СцМГ и $\delta \approx -0.43\%$ для СМ01 МГ УРАГАН. При этом были определены близкие значения азимута горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии r_h : $\varphi \approx 304^\circ$ для СМ01 СцМГ и $\varphi \approx 298^\circ$ для СМ01 МГ УРАГАН. Приведённые данные показывают, что СцМГ чувствителен к мощным турбулентным процессам в атмосфере.

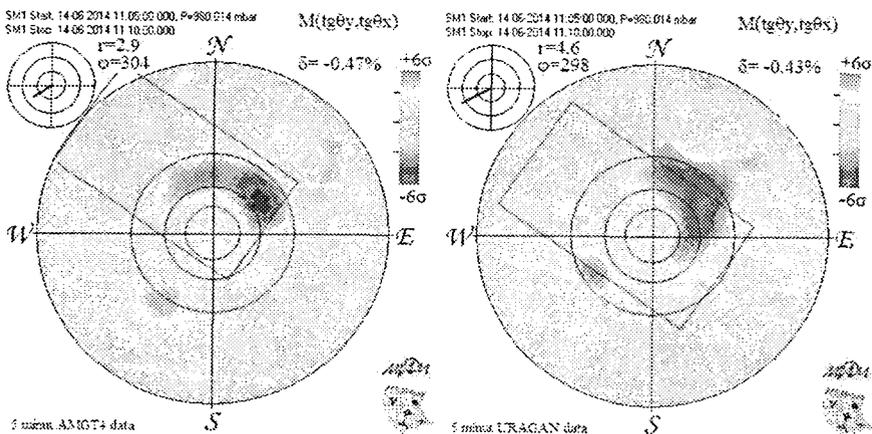


Рисунок 7. Мюнографии по данным СМ01 СцМГ и СМ01 МГ УРАГАН во время грозы 14 июня 2014 г.

Для непрерывного наблюдения за возмущениями в магнитосфере Земли и ближней гелиосфере, а также селекции в данных СцМГ откликов процессов атмосферного и гелиосферного происхождения, хорошо подходит анализ данных от сети аналогичных мюонных годоскопов, расположенных на значительном удалении друг от друга по всему земному шару.

Построение сети мюонных годоскопов, перекрывающих своими конусами приёма (диапазон углов $\varphi \in [0; 360)^\circ$; $\theta \in [0; 45)^\circ$ содержит 81% событий от полной апертуры детектора: $\varphi \in [0; 360)^\circ$; $\theta \in [0; 78)^\circ$) большую часть северного полушария возможно при установке детекторов в пределах территории России. Проявления в данных, носящие общий характер для

годоскопов сети, вызваны возмущениями в гелиосфере, а носящие индивидуальный характер, вероятнее всего, вызваны локальными атмосферными процессами.

В заключении приводятся основные результаты работы:

- 1) Разработан и создан сцинтилляционный мюонный годоскоп с оптоволоконным светосбором для мюонной диагностики процессов в атмосфере Земли и околоземном пространстве.
- 2) Разработаны системы триггирования, регистрации и сбора данных СМ, обеспечивающие регистрацию одиночных мюонов с эффективностью $> 98 \%$ в диапазоне зенитных углов $0^\circ - 78^\circ$ с высоким угловым разрешением ($< 1.3^\circ$).
- 3) Разработаны и реализованы технологии изготовления стрипов и сборки базовых модулей, создана необходимая сопутствующая оснастка. Изготовлено более 2400 стрипов, отобрано для СцМГ 2048 шт. и из них собрано 32 базовых модуля.
- 4) Разработана и создана технологическая линия оригинальных стандов для сборки и тестирования элементов СМ по специально-разработанным методикам:
 - стенд для тестирования элементов стрипов и стрипов в сборе с помощью β -спектрометра на основе изотопа ^{90}Sr (протестировано более 2400 стрипов);
 - стенд для тестирования многоанодных ФЭУ (протестированы 32 шт. 64-канальных ФЭУ Н7546В и Н8804);
 - стенд для тестирования плат считывания сигналов с многоанодных ФЭУ (протестировано и налажено 32 платы);
 - стенд для тестирования базовых модулей в потоке одиночных мюонов, выделяемых координатно-трековым детектором УРАГАН (протестировано и паспортизовано 32 БМ).
- 5) Разработан и создан комплекс программ, обеспечивающих годоскопический режим работы СцМГ: режим экспозиции и

- мониторинга, считывание датчиков атмосферного давления, температуры и относительной влажности в экспериментальном зале, on-line контроль работы супермодуля.
- 6) Разработан и реализован новый метод для on-line реконструкции треков в мюонных годоскопах, основанный на поиске прямолинейного участка среди всех сработавших каналов детектора.
 - 7) Экспериментально показано, что минимальное число координатных плоскостей мюонного годоскопа, предназначенного для мюонной диагностики гелиосферы, магнитосферы и атмосферы Земли, равно четыре.
 - 8) Созданы и введены в эксплуатацию два супермодуля детектора ScMГ по четыре координатных плоскости в каждом.
 - 9) Проведено несколько методических серий по изучению характеристик супермодулей ScMГ . Исследовано изменение отклика детектора при вариациях атмосферного давления, температуры. Полученные результаты позволили определить основные факторы, влияющие на стабильность работы ScMГ . Определены барометрический ($-0.15 \text{ \%}/\text{мбар}$) и температурный ($-0.25 \text{ \%}/^\circ\text{C}$) коэффициенты для супермодулей ScMГ .
 - 10) Проведено сопоставление данных ScMГ и УРАГАН во время грозы, и с данными МНМ во время форбуш-понижения, показано их полное соответствие.
 - 11) Оценены перспективы использования ScMГ в качестве типового МГ для создания сети мюонных годоскопов.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах

- 1) I.I. Yashin, N.V. Ampilogov, I.I. Astapov et al. Scintillation hodoscope for muon diagnostics // Proc. 31st ICRC, Lodz, Poland, 2009. Paper ID 1049.
- 2) Ампилогов Н.В., Астапов И.И., Барбашина Н.С. и др. Новый мюонный годоскоп для мониторинга гелиосферных и атмосферных возмущений. Краткие сообщения по физике, №7, 2010, С. 43-46.

- 3) N.V. Ampilogov, I.I. Astapov, N.S. Barbashina et al. Large area scintillation muon hodoscope for monitoring of atmospheric and heliospheric processes. *Astrophysics and Space Sciences Transactions*, vol. 7, 2011, Issue 3. PP. 435-438.
- 4) N.V. Ampilogov, I.I. Astapov, N.S. Barbashina et al. Study of characteristics of scintillation muon hodoscope. *Proc. 32nd ICRC, Beijing, China, 2011*, vol. 11, code 104676. PP. 447-450.
- 5) Ампилогов Н.В., Астапов И.И., Барбашина Н.С. и др. Базовый модуль сцинтилляционного мюонного годоскопа. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2012. Т. 3. № 5. С. 460-468.
- 6) I.I. Yashin, N.V. Ampilogov, I.I. Astapov et al. Large area hodoscopes for muon diagnostics of heliosphere and Earth's magnetosphere. *Acta Polytechnica*, 2013, vol. 53, Issue Supl.1. PP. 807-810.
- 7) Ампилогов Н.В., Барбашина Н.С., Компаниец К.Г. и др. Применение мюонного годоскопа УРАГАН для калибровки детекторов заряженных частиц. *Известия РАН. Серия физическая*. 2015. Т. 79. № 3. С. 420-422. ISSN: 0367-6765. (*Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 2015, Vol. 79, No. 3. PP. 386–388).
- 8) А.А. Ковыляева, Н.В. Ампилогов, А.Н. Дмитриева и др. Учет барометрического и температурного эффектов в данных сцинтилляционного мюонного годоскопа за 2015 г. *Труды Конференции–конкурса молодых физиков, Москва, 2016, том. 22, № 1S, С. 64-65.*
- 9) N.V. Ampilogov, I.I. Astapov, N.S. Barbashina. et al. Muon hodoscope with scintillation strips // *Physics Procedia*, Volume 74, 2015. PP. 478-485.
- 10) Ampilogov N.V., Astapov I.I., Barbashina N.S. et al. First results of the cosmic ray muon variation study by means of the scintillation muon hodoscope. *Journal of Physics: Conference Series (ICPPA 2015)*, vol. 675, Issue 3, 2016, Article number 032042.

