

**На правах рукописи**

**БАРБАШИНА НАТАЛЬЯ СЕРГЕЕВНА**

**МЕТОД МЮОНОГРАФИИ  
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ГЕЛИОСФЕРЫ, МАГНИТОСФЕРЫ  
И АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

**01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики**

**Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук**

**Автор:**

**Москва - 2022**

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

Официальные оппоненты:

Свертилов Сергей Игоревич,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
НИИЯФ МГУ

Стародубцев Сергей Анатольевич,  
доктор физико-математических наук,  
директор Института космофизических  
исследований и аэронавтики  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН

Струминский Алексей Борисович,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Института  
космических исследований РАН

Ведущая организация: Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения  
радиоволн им. Н.В. Пушкова  
(ИЗМИРАН)

Защита состоится «26» сентября 2022 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 на базе Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, телефон: 8 (499) 132-65-54.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте института <https://www.lebedev.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

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

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.ф.-м.н.

С.П. Баранов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность*

Условия жизни на Земле определяются тремя внешними сферами: атмосферой, магнитосферой и гелиосферой, состояние которых в значительной степени зависит от активности Солнца. Динамические процессы на Солнце создают возмущения в межпланетной среде. Эти возмущения распространяются в гелиосфере и могут достигать Земли, возмущая, в свою очередь, ее магнитосферу и атмосферу.

Уникальную возможность обнаружения гелиосферных возмущений предоставляют космические лучи (КЛ), которые при прохождении через гелиосферу испытывают влияние возмущений в солнечном ветре и в межпланетном магнитном поле. Учитывая, что время прохождения космических лучей через гелиосферу измеряется минутами, а гелиосферных возмущений – сутками, непрерывная регистрация потока космических лучей позволяет отслеживать мощные гелиосферные возмущения и определять направление их движения. Поэтому такой подход давно применяется в исследованиях гелиосферных и магнитосферных возмущений с использованием детекторов космических лучей, расположенных на поверхности Земли. Для проведения подобных исследований на поверхности Земли создана сеть нейтронных мониторов (НМ) и многонаправленных мюонных телескопов (ММТ), регистрирующих нейтронную и мюонную компоненты, соответственно. Разница между этими компонентами обусловлена их пробегом в веществе. Нейтроны – сильновзаимодействующие частицы – имеют небольшой пробег и могут быть зарегистрированы лишь вблизи места их генерации. Мюоны взаимодействуют электромагнитно и имеют большую проникающую способность, которая позволяет с их помощью исследовать крупномасштабные объекты. Помимо проникающей способности поток мюонов обладает двумя другими важными особенностями, которые и позволяют исследовать возмущения в крупномасштабных субстанциях, таких как атмосфера, магнитосфера и гелиосфера.

Первая особенность связана с процессами образования мюонов в атмосфере, в основном, в распадах вторичных мезонов, которые генерируются при взаимодействии первичных космических лучей с ядрами атомов атмосферы. Высота генерации этих вторичных частиц зависит от основных параметров атмосферы: давления и температуры, а также от различных возмущений в атмосфере, которые изменяют эти параметры. Родившиеся мюоны также взаимодействуют с атмосферой, а при не очень больших энергиях ещё и распадаются. Поэтому прохождение мюонов через атмосферу зависит от давления и температуры, а также

влажности. Это открывает возможность решения обратной задачи – определение изменений параметров атмосферы по изменениям характеристик потока мюонов.

Вторая особенность потока мюонов состоит в том, что каждый из них сохраняет направление движения первичных космических частиц с достаточно хорошей точностью. Поэтому различные изменения потока первичных космических лучей, вызванные солнечной активностью и последующими возмущениями в гелиосфере и магнитосфере Земли, приводят к соответствующим изменениям характеристик потока мюонов, регистрируемых на поверхности Земли. Такая связь открывает возможность решения другой обратной задачи – восстановление параметров возмущений в гелиосфере и магнитосфере путём анализа изменений характеристик потока мюонов.

Исследования гелиосферы, магнитосферы и атмосферы в естественном потоке мюонов космических лучей, регистрируемых в годоскопическом режиме, дало развитие новому методу диагностики окружающего пространства – мюонографии.

### ***Цель работы***

Разработка и развитие новых подходов к исследованию космического и околоземного пространства, а также методов заблаговременного обнаружения потенциально опасных возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли.

### ***Научная новизна***

Метод мюонографии находится на таком же уровне, как и методы рентгенографии, электронографии, нейтронографии и протонографии, поскольку открывает новые области использования мюонной компоненты космических лучей для раннего обнаружения, мониторинга и предсказания дальнейшего развития потенциально опасных возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли.

Применение метода мюонографии позволило выявить качественно новые закономерности в вариациях потока мюонов космических лучей во время развития возмущений в космическом и околоземном пространстве, а именно:

- впервые получены мюонографии событий, вызванных возмущениями в космическом и околоземном пространствах: GLE, форбуш-понижений и грозовых аномалий;
- впервые введена в методику анализа событий, вызванных возмущениями в космическом и околоземном пространствах, горизонтальная проекция вектора относительной анизотропии потока

- мюонов и показано, что ее изменения могут служить предвестником геоэффективных событий;
- впервые изучены долговременные вариации проекций вектора локальной анизотропии потока мюонов космических лучей;
  - впервые с помощью одной установки и в рамках единого подхода определены интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики вариаций потока мюонов во время событий GLE и форбуш-понижений;
  - впервые на основе мюонографий и карт метеорологических доплеровских радаров показано, что параметры анизотропии потока мюонов позволяют идентифицировать грозовые явления с вероятностью ~70%, а при прохождении атмосферных фронтов – более 80%.

### ***Практическая значимость***

Метод мюонографии окружающего пространства является новым источником информации о процессах как космического, так и атмосферного масштабов.

Способ и устройство для получения мюонографий могут быть использованы при проектировании новых мюонных годоскопов и анализе их экспериментальных данных.

Разработанные методы комплексного анализа данных по исследованию вариаций потока мюонов космических лучей, зарегистрированных мюонным годоскопом, во время возмущений в космическом и околоземном пространствах могут быть использованы для анализа подобных событий, регистрируемых другими детекторами.

Многолетние экспериментальные данные могут быть использованы для проверки моделей прохождения космических лучей с энергиями выше 10 ГэВ через гелиосферу и околоземное пространство, а также в прикладных задачах, связанных с дистанционным мониторингом гелиосферных возмущений.

Изменение параметров локальной анизотропии потока мюонов являются хорошим предвестником потенциально опасных процессов в магнитосфере и атмосфере Земли.

Полученные результаты лягут в основу развития сети мюонных годоскопов для непрерывного наблюдения за солнечными событиями, возмущениями в магнитном поле и атмосфере Земли.

Научная новизна и практическая значимость самого метода мюонографии и способов обнаружения гелиосферных и атмосферных возмущений подтверждены двумя патентами на изобретения, двумя

патентами на полезные модели и двумя свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.

### ***Достоверность***

Экспериментальные результаты получены на трех независимо работающих супермодулях мюонного годоскопа УРАГАН, которые демонстрируют хорошую идентичность всех наблюдаемых явлений.

Сопоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН с данными нейтронных мониторов, полученными во время различных гелиосферных и магнитосферных явлений в пересекающихся областях асимптотических направлений, показало их высокую степень согласованности.

Сопоставление данных мюонного годоскопа УРАГАН с данными метеорологических доплеровских радаров, полученными во время гроз в Московском регионе, показало их хорошее согласие.

### ***Личный вклад***

Автор участвовал в разработке и создании мюонного годоскопа УРАГАН, проведении и обеспечении непрерывного длительного эксперимента в период с 2005 по 2020 гг. Автор внес весомый вклад в разработку методов исследования вариаций потока мюонов по данным мюонных годоскопов, на основе которых был разработан метод мюонографии. Автором разработаны алгоритмы для комплекса программ обработки и анализа вариаций потока мюонов во время атмосферных, магнитосферных и гелиосферных событий, а также унифицированные формы исследуемых событий. Автором получены интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики потока мюонов космических лучей в области энергий выше 10 ГэВ во время магнитосферных и гелиосферных возмущений. Автором проанализированы корреляции между характеристиками потока мюонов и параметрами атмосферных, магнитосферных и гелиосферных возмущений в исследуемые периоды и оценен прогностический потенциал данных по анизотропии потока мюонов. По инициативе автора и при его непосредственном участии было проведено сопоставление мюонографий с картами метеорологических доплеровских радаров во время грозовых явлений. Автором подготовлены статьи и представлены доклады по результатам исследований вариаций потока мюонов, зарегистрированных мюонным годоскопом во время событий, вызванных возмущениями в космическом и околоземном пространствах.

### ***Автор защищает***

1. Понятие и концепцию мюонографии – дистанционного метода исследования космического и околоземного пространства в потоке мюонов космических лучей.
2. Разработанные методы обработки двумерных угловых матриц экспериментальных данных мюонного годоскопа УРАГАН.
3. Результаты обработки временных рядов матричных данных (мюонографий), полученных в 2007 – 2020 гг. и содержащих ~1.5 триллиона зарегистрированных мюонов.
4. Методы выявления гелиосферных событий по форбуш-понижениям, зарегистрированных в потоке мюонов, и результаты анализа более ста таких событий за 2007 – 2020 гг.
5. Количественные параметры, описывающие мюонографии: вектор относительной анизотропии потока мюонов космических лучей, его горизонтальную проекцию  $r_h$  и проекции на географический юг ( $r_s$ ) и восток ( $r_E$ ), указывающие на анизотропию потока мюонов по азимутальным направлениям.
6. Интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики вариаций потока мюонов во время событий GLE и форбуш-понижений по данным мюонного годоскопа, которые впервые определены с помощью одной установки и в рамках единого подхода.
7. GSE-отображения деформаций углового распределения на основе анализа последовательностей мюонографий для гелиосферных возмущений, вызванных корональными выбросами масс, особенности регистрации геоэффективных и негеоэффективных КВМ в различные периоды солнечной активности.
8. Результаты анализа корреляций вариаций потока первичных космических лучей и параметров локальной анизотропии потока мюонов, регистрируемого мюонным годоскопом УРАГАН, которые показали, что их изменения происходят за 1 – 2 суток до прихода гелиосферных возмущений в район Земли.
9. Мюонографии грозových явлений в атмосфере и результаты их сопоставления с данными радарных наблюдений, которые продемонстрировали их хорошее согласие.

### ***Апробация***

Результаты работы были доложены на 42 международных и российских конференциях: Международной конференции по космическим лучам (International Cosmic Ray Conference - ICRC 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017); Европейском симпозиуме по космическим лучам (European Cosmic Ray Symposium – ECRS 2006, 2008, 2010, 2012, 2014,

2016, 2018); Международной конференции по физике частиц и астрофизике (International conference on particle physics and astrophysics ICPPA 2015, 2016, 2018, 2020); Международном симпозиуме по грозам и ускорению элементарных частиц (Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration ТЕРА-2016); Международном симпозиуме по космическим лучам и астрофизике (International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics IS CRA 2017, 2019, 2021); Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2020); Научной сессии НИЯУ МИФИ (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014); Баксанской молодежной школе экспериментальной и теоретической физики (БМШ ЭТФ 2007, 2008, 2009, 2010). По методу мюнографии автор выступал с приглашенными докладами на пленарных заседаниях трех международных конференций. Статьи опубликованы в трудах конференций, а также в журналах «Известия РАН. Серия физическая», «Геомагнетизм и аэрономия», «Advances in Space Research», «Journal of Physics: Conference Series», «Proceedings of Science».

По теме диссертационной работы опубликовано 44 научных труда, из которых 36 работ входят в список Scopus/Web of Science, 15 – изданы в реферируемых научных изданиях из списка ВАК, 6 – являются результатами интеллектуальной деятельности.

### ***Объем и структура диссертации***

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Объем диссертации: 197 страниц, 140 рисунков, 12 таблиц, 160 наименований источников литературы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** приведен обзор детекторов и установок для регистрации мюонов космических лучей на поверхности Земли, а также освещено современное состояние проводимых на них исследований, сформулирована цель диссертационной работы, обоснована ее актуальность, научная новизна и практическая значимость, подтверждена достоверность полученных результатов, представлены научные положения, которые выносятся на защиту, продемонстрирована их апробация в докладах на международных и всероссийских конференциях и в публикациях, кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** представлено описание мюонного годоскопа УРАГАН (МГ УРАГАН), включая его регистрирующую систему, дано описание метода построения мюнографий. Представлены



характеристики локальной анизотропии потока мюонов космических лучей, описывающие мюонографии.

В экспериментах по исследованию вариаций мюонной компоненты космических лучей обычно используются газовые и сцинтилляционные детекторы, которые не могут определять направление прихода частиц. Для регистрации мюонов с определенных направлений применяют мюонные телескопы и многонаправленные мюонные телескопы. Возможности многонаправленных мюонных телескопов ограничены их конструкцией. На рис. 1 представлена схема формирования направлений регистрации частиц в многонаправленном телескопе на примере телескопа в Нагоя.

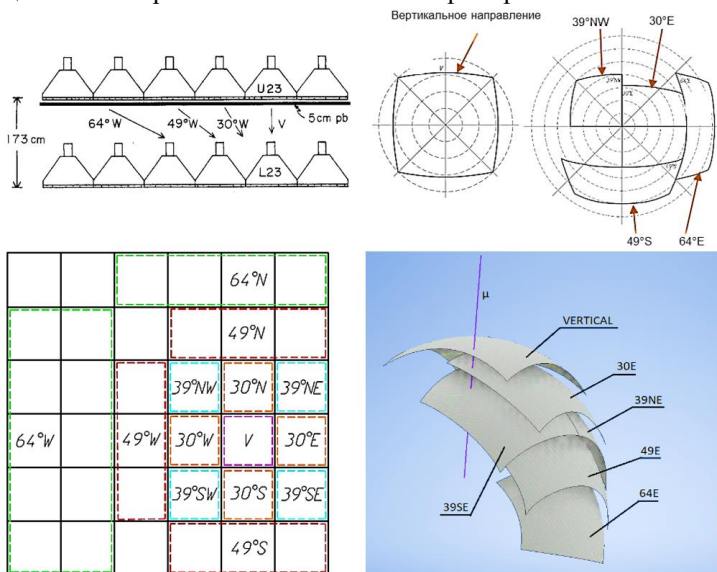


Рис. 1. Схема регистрации космических лучей многонаправленным мюонным телескопом

На левой части рис. 1 показано формирование направлений относительно детектора L23 и матрица пространственных ячеек в плоскости детектора, в которые объединяются экспериментальные данные. Каждая комбинация ячеек телескопа соответствует определенным диапазонам зенитных и азимутальных углов. На правой части представлены положения ячеек, которые формируются в многонаправленном мюонном телескопе в угловых координатах, и 3D-модель ячеек соответствующих угловых направлений. Из рисунка видно, что ячейки перекрываются и существуют некоторые зенитные и азимутальные углы, при которых мюоны могут быть зарегистрированы в

разных ячейках. Для примера на рисунке представлен околоразвертикальный трек мюона, который при прохождении через ММТ может быть записан в три различные ячейки. Таким образом, в данных многонаправленных мюонных годоскопов картина анизотропии искажается за счет усреднения по достаточно большому телесному углу апертуры каждого углового интервала.

В мюонных годоскопах в отличие от ММТ появляется возможность регистрации и восстановления в режиме реального времени направления трека каждого мюона, приходящего с любого направления небесной полусферы в пределах апертуры годоскопа. Мюонные годоскопы позволяют разделять частицы по направлениям, а не изучать суммарный поток, зарегистрированный в определенном телескопном углу, где суммируются частицы со всех направлений в границах этого телесного угла. Поэтому данные мюонного годоскопа дают более полную информацию об особенностях и динамике анизотропии потока мюонов и, соответственно, анизотропии частиц первичных космических лучей.

Широкоапертурный координатно-трековый детектор – мюонный годоскоп УРАГАН (55.7° N, 37.7° E, 173 м н. у. м.) – был создан в НИЯУ МИФИ в составе уникальной научной установки «Экспериментальный комплекс НЕВОД» в 2005 – 2007 гг. Мюонный годоскоп имеет модульную структуру и состоит из четырёх независимых идентичных супермодулей площадью ~11.5 кв. м каждый. Три супермодуля СМ01, СМ03, СМ04 работают с 2007 года в режиме непрерывной экспозиции. Супермодуль СМ02 значительную часть времени работает в режиме стенда для тестирования и калибровки детекторов и установок различного типа. Каждый супермодуль состоит из восьми слоев камер, которые содержат по 20 газовых трубок, работающих в режиме ограниченного стримера. Супермодули обеспечивают высокую пространственную (~ 1 см) и угловую (~ 1°) точность регистрации частиц космических лучей в широком диапазоне зенитных углов от 0° до 80°.

Принцип построения мюонографии основан на восстановлении направления прихода каждого мюона в режиме реального времени. Используя полученные данные, можно формировать любые угловые матрицы. Формирование таких матриц необходимо, чтобы обеспечить достаточную статическую точность в исследуемые промежутки времени. Данные мюонного годоскопа записываются в четыре вида матриц: с разбиением по зенитному ( $\theta$ ) и азимутальному ( $\varphi$ ) углам  $M_{a0}[\theta, \varphi]$ ; с разбиением по зенитному и азимутальному углам, но для треков, прошедших все восемь плоскостей рабочего объема супермодуля  $M_a[\theta, \varphi]$ ; с разбиением по проекционным зенитным углам  $M_a[\theta_x, \theta_y]$ ; в виде матрицы, ячейки которой соответствуют диапазонам тангенсов

проекционных зенитных углов  $M_{pa}[\text{tg}\theta_x, \text{tg}\theta_y]$ . Каждое зарегистрированное событие добавляется в соответствующие ячейки таких двумерных матриц. Статистическая обеспеченность таких матриц составляет около 5 миллионов треков за один час экспозиции. На рис. 2 представлена схема формирования мюнографий. Для построения мюнографий используются угловые матрицы, усредненные по данным трех супермодулей, полученные за час экспозиции. Для получения мюнографий используется следующая последовательность математических преобразований: исходные матрицы усредняются, затем нормализуются (вычитаются), фильтруются (удаляются высокочастотные флуктуации) и оптимизируются. Цвет показывает отклонение от среднего в единицах среднеквадратичных отклонений: красный цвет соответствует избытку мюонов, синий цвет - дефициту мюонов.

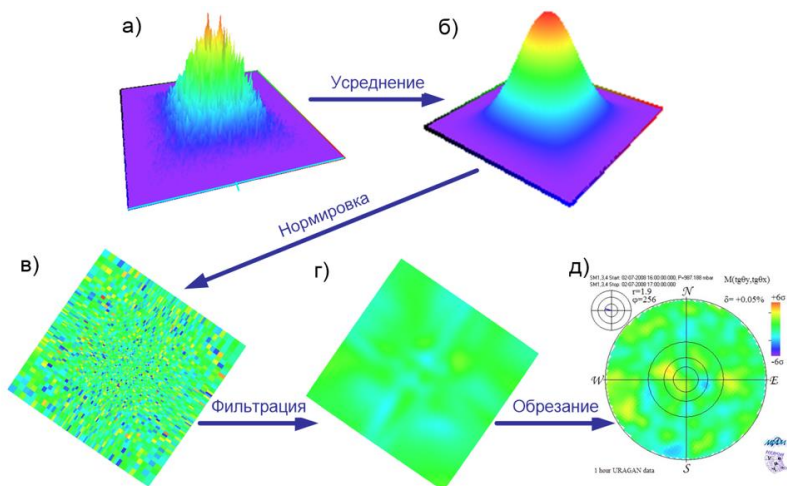


Рис. 2. Схема формирования мюнографий: а) исходная матрица; б) после усреднения; в) после нормировки; г) сглаженная матрица; д) результирующая матрица (мюнография).

Мюнография – это отношение матрицы углового распределения мюонов за выбранный интервал времени к матрице нормализации за предыдущий более длительный период в единицах статистических ошибок по цветовой шкале. Обычно для гелиосферных возмущений выбирается интервал в 1 час, а нормализованная матрица берется за 24

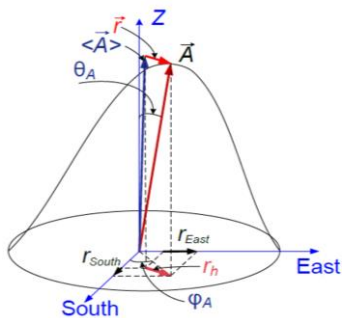


Рис. 3. Взаимное расположение вектора локальной анизотропии и его проекций

единичных векторов треков мюонов, нормированная на количество событий. По определению его величина порядка единицы. Вектор может быть проецирован на направления географического юга  $A_S$  и востока  $A_E$ . Для исследования отклонений от среднего направления вектора анизотропии используется вектор относительной анизотропии  $r$  и его проекции  $r_S$  и  $r_E$  на юг и восток:

$$r = A - \langle A \rangle, r_S = A_S - \langle A_S \rangle, r_E = A_E - \langle A_E \rangle.$$

Величины  $r_S$  и  $r_E$  удобны для исследования изменений азимутальной анизотропии потока мюонов во время различных возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере Земли. Особый интерес представляет длина горизонтальной проекции этого вектора

$r_h = \sqrt{(r_S)^2 + (r_E)^2}$ , которая характеризует величину бокового

воздействия на угловое распределение потока мюонов и определяет степень его деформации.

Используя асимптотические направления первичных протонов, которые генерировали зарегистрированные мюоны, можно перевести мюонографии, полученные в лабораторной системе, в геоцентрическую солнечно-эклиптическую систему (GSE систему). На рис. 4 представлен пример мюонографии в GSE

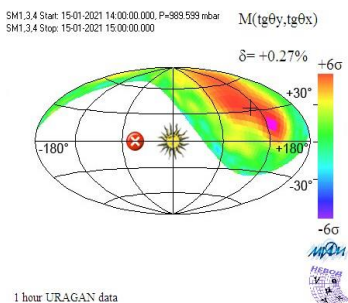


Рис. 4. Мюонографии в GSE системе

системе. Цветовая градация показывает уровень отклонений относительно предыдущих суток: зеленый цвет обозначает, что вариации отсутствуют, синий – понижение потока КЛ из определенной области, красный – повышение потока космических лучей. Такие муноографии в системе GSE позволяют визуализировать изменения потока космических лучей и их угловое распределение во время различных активных процессов в гелиосфере, и наблюдать анизотропию потока, вызванную этими процессами.

Во второй главе анализируются долговременные вариации космических лучей по данным муонного годоскопа УРАГАН,

полученные за 14-летний период с 2007 по 2020 гг. Приводится сравнительный анализ с данными нейтронных мониторов в Москве и Апатитах, а также корреляционный анализ параметров потока космических лучей с характеристиками межпланетного магнитного поля и околоземного пространства.

На протяжении всего периода измерений в вариациях проекций вектора локальной анизотропии наблюдается наличие сильных суточных колебаний. На рис. 5 представлены проекции суточные колебания проекций  $A_Z$ ,  $A_S$ ,  $A_E$ . Из рисунка видно, что наблюдается уменьшение магнитуды суточных отклонений в 2009 и 2018 годы, соответствующие минимуму солнечной активности, и ее увеличение в 2015 и 2016 годы. В 2014 – 2017 гг. примерно на час (ранее было 11 – 12h, а стало 10 – 11h) сместилось положение пика скорости счета и  $\Delta A_Z$ . Отмечается аномальное поведение

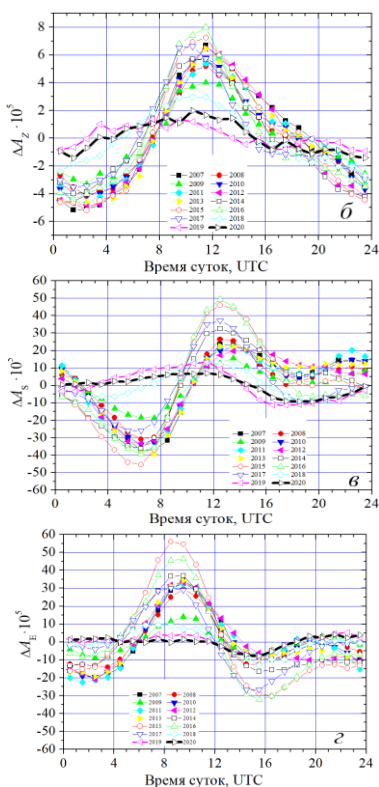


Рис. 5. Среднегодовые отклонения проекций  $A_Z$ ;  $A_S$ ;  $A_E$  вектора локальной анизотропии в течение суток для 2007 – 2020 гг.

среднегодовых отклонений с 2018 по 2020 гг. по сравнению с другими годами, что может быть связано с изменением полярности Солнца, смена которой происходила в период максимума солнечной активности.

Долговременные вариации характеристик потока мюонов, регистрируемых в годоскопическом режиме, были использованы для сопоставления с другими детекторами космических лучей, в частности с нейтронными мониторами, которые имеют более низкие первичные энергии и, соответственно, являются более чувствительными к гелиосферным возмущениям.

На рис. 6 приведены среднемесячные значения скорости счета МГ УРАГАН и монитора в Москве (MOSC), МГ УРАГАН и монитора в Апатитах (АРТУ) (рисунки а и б) и суточные среднеквадратичные отклонения МГ УРАГАН и MOSC, МГ УРАГАН и АРТУ (рисунки в и г) за период с 2007 по 2020 гг.

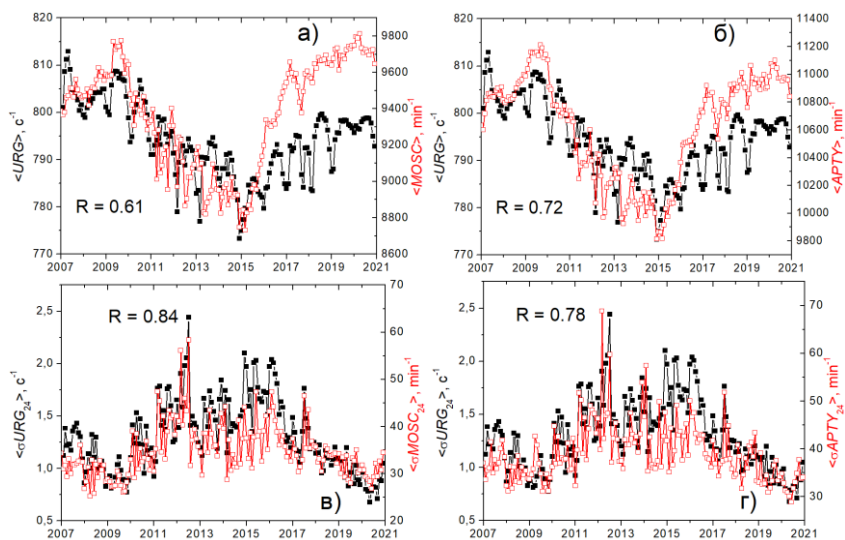


Рис. 6. Среднемесячные значения скорости счета (а, б) и суточные среднеквадратичные отклонения (в, г) данных МГ УРАГАН, MOSC и АРТУ

На рис. 6 (а и б) видно, что корреляции с нейтронным монитором в Апатитах лучше, чем с московским (коэффициенты корреляции 0.72 и 0.61 соответственно), при этом в обоих случаях наблюдаются значительные различия в усреднённой скорости счета, начиная с 2016 года. На рис.6 (в и г) видно, что корреляции среднеквадратичных отклонений больше, чем

корреляции со скоростью счета. Коэффициенты корреляции имеют значения 0.78 и 0.84 для нейтронных мониторов АРТУ и МОСК.

Особый интерес представляет изучение влияния межпланетной среды на анизотропию потока космических лучей. На рис. 7 приведены корреляции среднемесячных значений  $r_h$  со среднемесячными значениями параметров межпланетного магнитного поля и индексами геомагнитной активности в период с 2007 по 2020 гг. Черными точками отмечены значения за 2007 – 2017 гг., синими точками на рисунках отмечены значения за 2018 – 2020 гг.

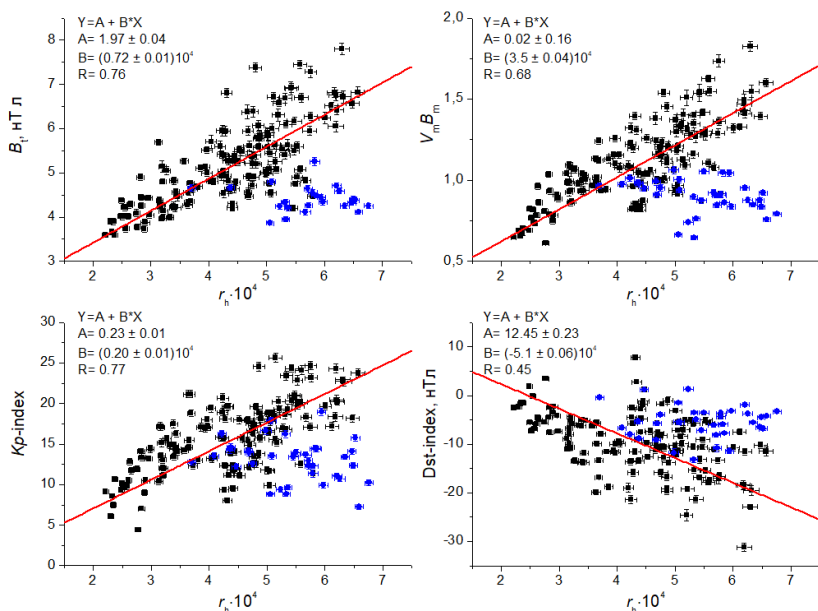


Рис.7. Зависимости между среднемесячными значениями  $r_h$ , среднемесячными значениями параметров межпланетного магнитного поля и индексами геомагнитной активности за 2007 – 2020 гг.

Из рис. 7 видно, что наилучшие корреляции наблюдаются в период с 2007 по 2017 гг.; в 2018 – 2020 гг. в период окончания 24-го солнечного цикла – минимума солнечной активности – наблюдается аномальное поведение зависимостей, что соответствует рис. 5. Аппроксимация показана линейной функцией (красная линия) для данных с 2007 по 2017 гг. Видно, что наилучшие корреляции в этот период наблюдаются между  $r_h$  и вектором магнитной индукции  $B_r$  (коэффициент корреляции

$\approx 0.76$ ), а также между параметром  $r_h$  и индексом геомагнитной активности Кр (коэффициент корреляции  $\approx 0.77$ ). Для параметра  $V_m B_m$  и  $Dst$ -индекса наблюдаются более слабые корреляции (коэффициенты корреляции имеют значения  $\approx 0.68$  и  $\approx 0.45$ ).

В третьей главе рассматривается применение мюнографии для исследований событий типа GLE. События GLE (Ground level enhancement) связаны с крупными солнечными вспышками и проявляются как внезапное увеличение интенсивности космических лучей. Приводятся результаты анализа событий GLE, произошедших в конце 23-го и в 24-м солнечных циклах, а именно: GLE #70, 71 и 72. Отдельное внимание уделяется рассмотрению событий класса sub-GLE.

13 декабря 2006 года в 02:26 UTC произошла вспышка на Солнце, которая сопровождалась мощным солнечным протонным событием GLE#70, вызвавшим резкий рост потока космических лучей как в околоземном пространстве, так и на уровне Земли. Это событие было зарегистрировано сетью нейтронных мониторов на Земле (рис. 8, слева). МГ УРАГАН регистрировал рост интенсивности потока мюонов космических лучей, начиная с 02:54 UTC (рис. 8, справа). Максимальное увеличение наблюдалось в период с 02:59 до 03:01 UTC.

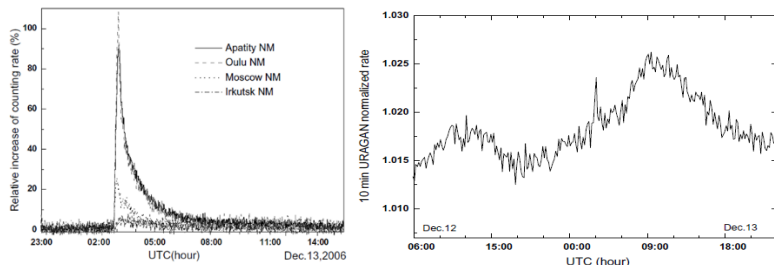


Рис. 8. Событие GLE#70 в одномоментных данных нейтронных мониторов (слева) и суммарная 10-минутная скорость счета двух супермодулей МГ УРАГАН 12.12.2006 – 13.12.2006 (справа)

Помимо интегрального темпа счета для данного события были проанализированы пространственно-угловые характеристики потока мюонов. На рис. 9 представлена последовательность мюнографий в локальной системе координат с 4-минутным временным сдвигом, полученных с использованием среднего значения за 5-минутные интервалы. Цветовая шкала показывает избыток или недостаток мюонов в единицах стандартных отклонений.



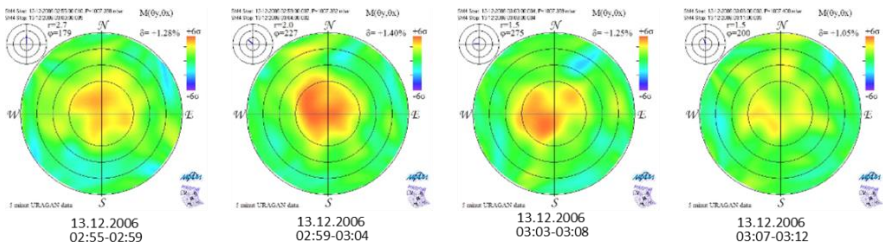


Рис. 9. Последовательность мюнографий в локальной системе координат во время GLE#70

На рис. 10 представлены мюнографии в системе GSE во время события GLE#70. Из мюнографий в системе GSE хорошо видно, что максимальный поток мюонов наблюдается в направлении силовой линии магнитного поля, на которое в утреннее время был направлен конус приема мюонного годоскопа.

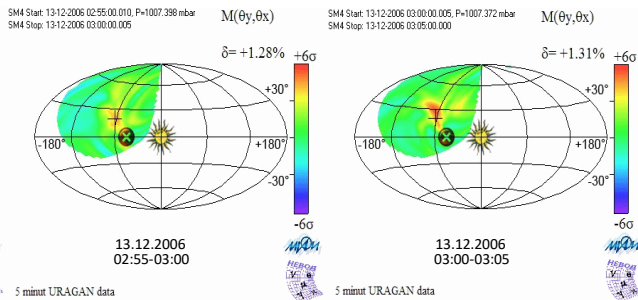


Рис. 10. Мюнографии в системе GSE во время события GLE#70

Таким образом, можно сделать вывод, что годоскоп УРАГАН зарегистрировал высококоллимированный короткоживущий сгусток релятивистских солнечных протонов, а также что впервые непосредственно наблюдались мюнографии угловой динамики этого сгустка.

События GLE#71 и GLE#72 менее ярко проявились как по данным нейтронных мониторов, так и по данным МГ УРАГАН, так как область приема детектора была далека от магнитной силовой линии.

События типа sub-GLE характеризуются небольшим повышением потока протонов. По данным нейтронных мониторов скорость счёта возрастает менее чем на 10%. Проведенный анализ событий в период с 2007 по 2020 гг., показал, что мюнографии с использованием системы координат GSE позволяют выявлять события sub-GLE, которые не проявляются в интегральных характеристиках потока мюонов

космических лучей. Однако возможность регистрации событий такого класса зависит от направления апертуры мюонного годоскопа.

Таким образом, впервые была продемонстрирована возможность исследования событий GLE с помощью мюонографии, однако необходимым условием их регистрации является совпадение направления конуса приема мюонного годоскопа с направлением магнитной силовой линии или их близость.

В четвертой главе рассматривается применение мюонографий для исследований форбуш-понижений. Приводятся результаты исследований пространственно-угловых и энергетических характеристик форбуш-понижений в период с 2007 по 2018 гг.

Под форбуш-эффектом или форбуш-понижением (ФП) обычно понимают резкое уменьшение интенсивности космических лучей, обусловленное крупномасштабными распространяющимися возмущениями солнечного ветра. Мюонографии позволяют исследовать закономерности в изменениях анизотропии потока мюонов во время ФП по азимутальным направлениям. На рис. 11 представлен пример мюонографий ФП, зарегистрированного 23 июня 2013 года.

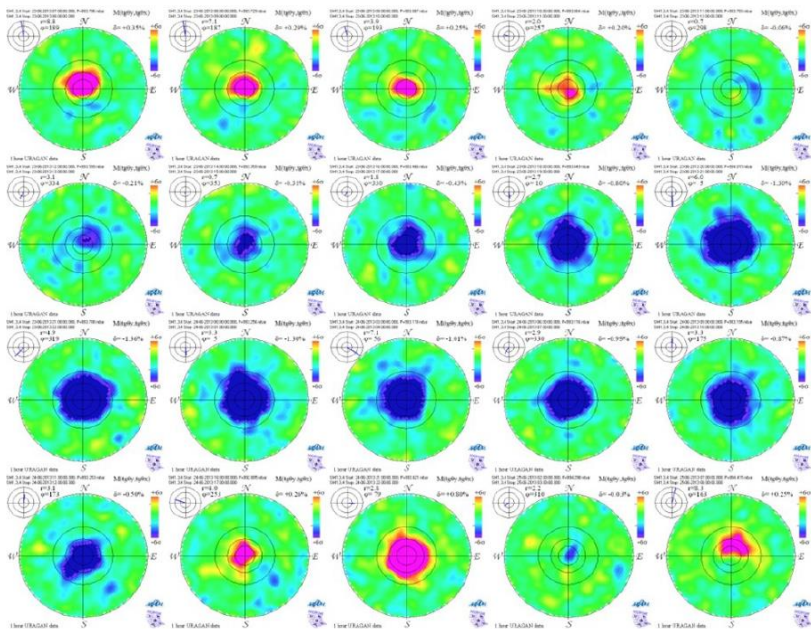


Рис. 11. Мюонографии ФП, зарегистрированного 23 июня 2013 года

На рис. 11 каждый ряд снимков соответствует разной фазе развития ФП: первый ряд отражает период до начала форбуш-понижения; второй – фазу падения; третий – фазу минимума; четвертый ряд соответствует фазе восстановления. Это событие также характеризуется повышением скорости счета потока мюонов космических лучей до начала ФП. На фазах падения и минимума наблюдается уменьшение потока мюонов в околоразвертикальном направлении.

С целью анализа изменения анизотропии потока мюонов по азимутальным направлениям для ФП использовались корреляции между проекциями вектора относительной анизотропии на географический юг и восток. На рис. 12 представлены такие корреляции для ФП, зарегистрированного 23 июня 2013 года. Рисунок наглядно иллюстрирует изменение анизотропии потока мюонов во время различных фаз развития форбуш-понижения.

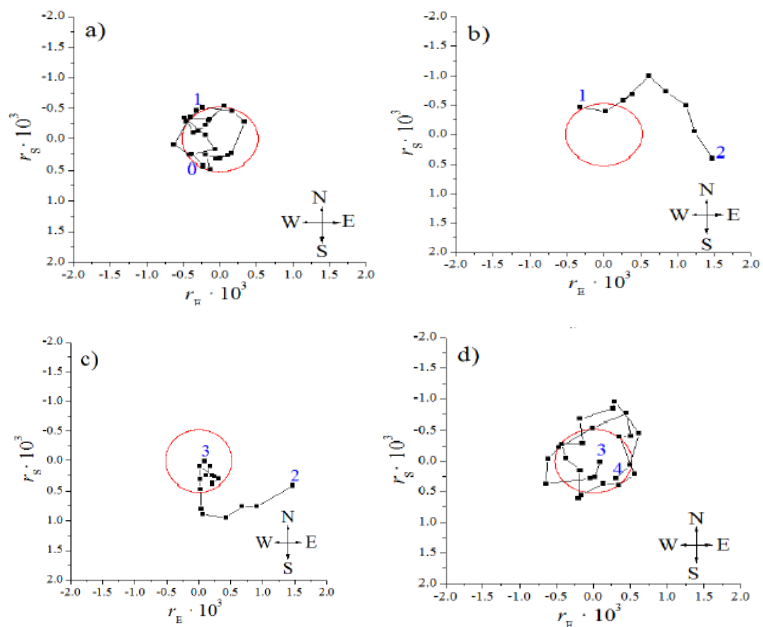


Рис. 12. Корреляции между  $r_S$  и  $r_E$  для ФП, зарегистрированного 23 июня 2013 года, во время четырех фаз развития события. Моменты времени: 0 – 22.06.2013 12:00 UTC; 1 – 23.06.2013 12:00 UTC; 2 – 23.06.2013 20:00 UTC; 3 – 24.06.2013 11:00 UTC; 4 – 25.06.2013 11:00 UTC

Анализ форбуш-понижений, зарегистрированных в период с 2007 по 2018 гг. в годоскопическом режиме, показал, что изменения относительной анизотропии вариаций потока мюонов наблюдаются в основном на фазах падения и минимума и в среднем соответствуют восточно-западной анизотропии первичных космических лучей.

В пятой главе рассматривается применение мюонографий для исследований корональных выбросов масс (КВМ) и возмущений высокоскоростного солнечного ветра, источником которых являются корональные дыры на Солнце. Приводятся результаты применения метода мюонографии при исследовании геоэффективных и негеоэффективных КВМ, рассматривается возможность заблаговременного обнаружения возмущений в околоземном пространстве, в том числе в магнитосфере Земли.

Исследование КВМ основывается на анализе последовательности мюонографий в GSE. Для этого была выработана методика выделения областей, в которых наблюдается понижение и/или повышение интенсивности космических лучей на величину более  $\pm 3\sigma$ , т.е. наблюдаются деформации углового распределения потока космических лучей. На рис. 13 представлен пример выделения области деформации углового распределения мюонов (с повышенной интенсивностью) в локальной системе координат и в GSE-системе. Для каждой выделенной области рассчитывается положение, размер области (телесный угол в стерadiansах) и амплитуда изменения интенсивности космических лучей (в значениях  $\sigma$ ), после чего формируется временная последовательность таких деформаций углового распределения.

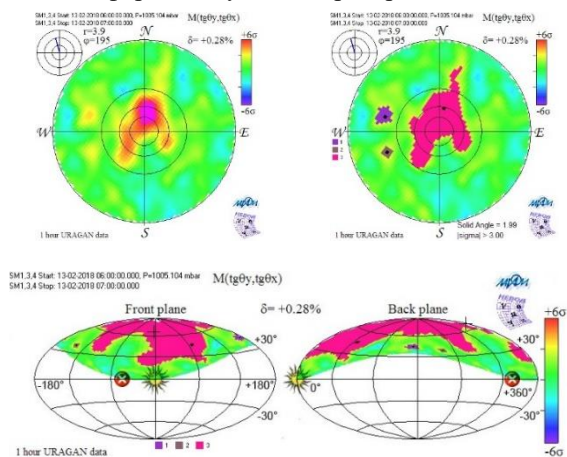
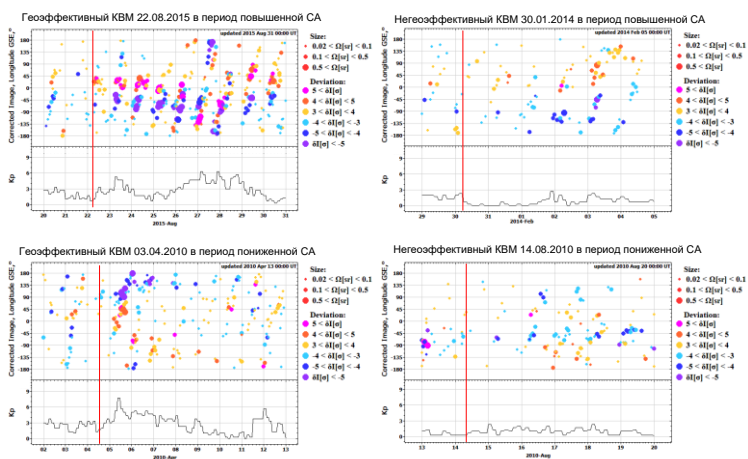


Рис. 13. Исходная мюонография (слева, сверху), мюонография с выделенными областями деформации углового потока (справа, сверху) и часовая мюонография в GSE-системе с выделенными областями деформации углового потока (снизу)

На основе данного метода был проведен анализ КВМ в период с 2007 по 2020 гг. На рис. 14 представлены примеры поведения деформаций мюнографий в GSE-системе во время геоэффективных и негеоэффективных КВМ в различные периоды солнечной активности. В ходе анализа таких событий был выявлен ряд закономерностей. Во-первых, в периоды низкой солнечной активности отклик мюонного годоскопа на геоэффективные события оказался наиболее выражен, количество отклонений повышено в коротком интервале (2 суток), повышения и понижения разделены по долготам. Во-вторых, в периоды высокой солнечной активности для геоэффективных событий отклонения потока от среднего не имеют четко выраженного распределения по долготам, количество отклонений повышено в широком интервале (4 – 6 суток), отклики на следующие друг за другом события сложно отделить друг от друга. В-третьих, отклик на негеоэффективные КВМ как в периоды низкой, так и в периоды высокой солнечной активности имеет широкое распределение по времени, а именно: 4 – 6 суток. Количество областей деформации меньше, чем у геоэффективных событий.



*Рис. 14. Примеры последовательности деформаций углового распределения в GSE-системе для геоэффективных (слева) и негеоэффективных (справа) КВМ в различные периоды солнечной активности (повышенной – сверху, пониженной – внизу). Вертикальными красными линиями обозначено время вылета КВМ с поверхности Солнца.*

В периоды, когда солнечная активность понижена, одной из причин возмущений межпланетного магнитного поля является высокоскоростной солнечный ветер, генерируемый в корональных дырах на Солнце.

Как правило, такие процессы являются основными источниками магнитных возмущений на Земле в периоды низкой солнечной активности.

На рис. 15 представлено сопоставление параметров межпланетной среды, индекса геомагнитной активности с появлениями крупных областей деформаций потока КЛ по данным МГ УРАГАН. На верхнем графике видно, что возмущение индукции межпланетного магнитного поля  $B_i$  началось утром 30 августа 2019 года в 05:00 UTC после прихода корональной дыры в геоэффективные долготы. Начало возмущения скорости солнечного ветра  $V_{sw}$  (средний график) было зарегистрировано 30 августа в 20:00 UTC. На нижнем графике приведен индекс геомагнитной активности  $Kp$ . Магнитная буря ( $Kp > 4$ ) на Земле началась 31.08.2019 в 02:00 UTC. Максимального значения индекс геомагнитной активности достиг 31.08.2019 в 13:00 UTC. Синими точками на графиках отмечены области понижения потока КЛ, оранжевыми – его повышение на  $4\sigma$ . Сверху приведены примеры мунографий. Первое понижение потока КЛ было зарегистрировано 30.08.2019 в 03:00 UTC. Повышение потока КЛ было зафиксировано 30.08.2019 в 10:00 UTC. На протяжении двух последующих суток в потоке КЛ присутствовали области повышения и понижения интенсивности потока больше  $3\sigma$ .

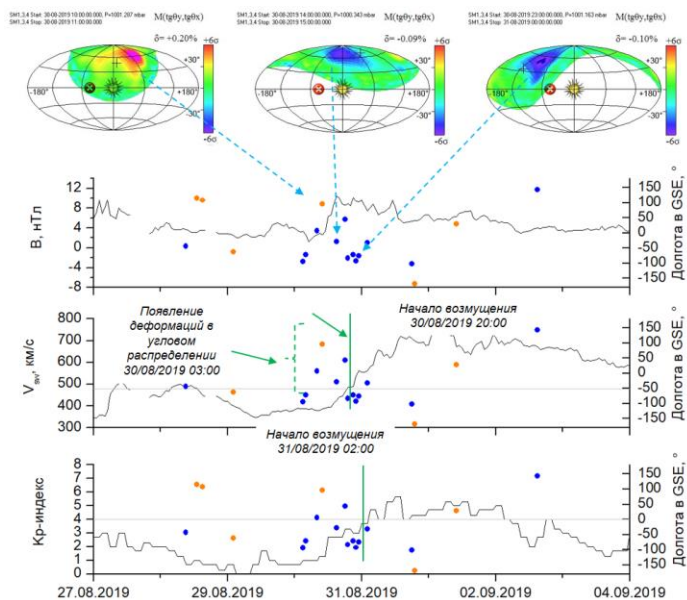


Рис. 15. Сопоставление параметров межпланетной среды, индекса геомагнитной активности с появлениями крупных областей деформаций потока КЛ по данным МГ УРАГАН

На рис. 15 видно, что первая зарегистрированная область понижения потока КЛ соответствовала долготе в  $50^\circ$ , а первая зарегистрированная область повышения потока КЛ приходилось на долготу  $105^\circ$ . Область с максимальным отклонением была зарегистрирована 30.08.2019 в 22:00 UTC. Отклонение составило  $-5.3\sigma$  и соответствовало долготе  $73^\circ$ . Первая область понижения потока была зарегистрирована за 23 часа до начала магнитной бури.

Для изучения прогностического потенциала и определения критериев раннего прогнозирования геомагнитных возмущений, вызванных корональными дырами, в периоды пониженной активности Солнца, приходящиеся на 2008 – 2010 гг. и 2017 – 2019 гг., было выявлено 112 магнитных бурь. В результате показано, что в 81 случае ( $72 \pm 4\%$ ) выделялась область повышенного потока мюонов. В среднем первая область деформации по данным МГ УРАГАН была зарегистрирована раньше на ( $18 \pm 4$ ) часа, чем началась магнитная буря.

В **шестой главе** рассматривается применение мюонографий для исследований в атмосфере Земли. Приводятся результаты исследований крупномасштабных барических образований (циклонов, фронтов и др.), проходящих над Москвой. Рассматривается сравнение мюонографий с данными доплеровского метеорадара DMRL-C, полученными во время грозных явлений.

Исследование крупномасштабных барических образований (циклоны и антициклоны), проходивших над Москвой в основном с западного направления, показало, что при приближении антициклона проекция вектора анизотропии в восточном направлении  $A_E$  увеличивается из-за уменьшения потока мюонов с западного направления, следовательно, вектор анизотропии отклоняется в противоположном (восточном) направлении. При приближении циклона происходит обратный процесс. При этом проекция на южное направление  $A_S$  остается неизменной (видна только суточная вариация), так как в этом направлении поток мюонов практически не меняется.

Важным этапом в развитии метода мюонографии атмосферы явилось использование данных метеорологических доплеровских радаров, развернутых в Московском регионе. Пространственные и угловые параметры потока мюонов, регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН во время гроз в Московском регионе, прошедших в 2014 – 2016 гг., анализировались в сопоставлении с данными доплеровского метеорадара DMRL-C. Для визуального сопоставления доплеровских карт с мюонографиями изображения были центрированы по МКАД и, соответственно, масштабированы по размеру. На рис. 16 представлен

пример сравнения доплеровской карты с мюнографией. На рисунке видно, что гроза, которая была зарегистрирована доплеровским радаром и двигалась со стороны г. Подольска к югу и юго-западу г. Москвы (красный цвет), соответствует минимуму (синий цвет) потока мюонов, зарегистрированного в это же время мюонным годоскопом УРАГАН.

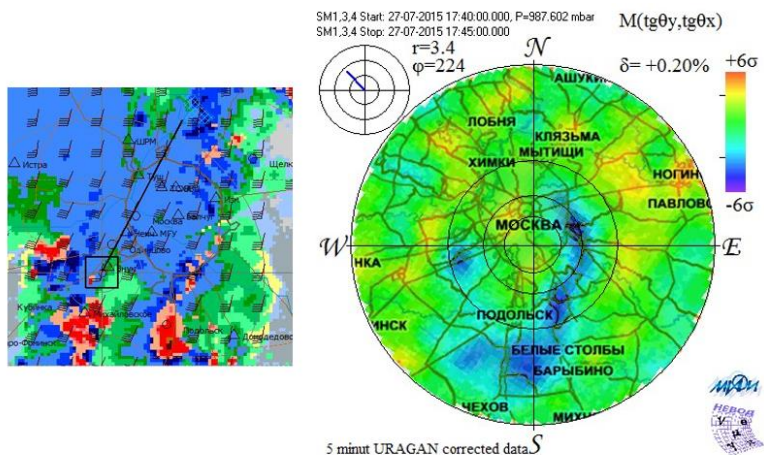


Рис. 16. Пример сопоставления доплеровской метеокарты DMRL-C с мюнографией во время грозы 27 мая 2015 года

Сопоставление доплеровских метеокарт DMRL-C и мюнографий было проведено для 64 грозных явлений. При их анализе особое внимание обращалось на то, как изменения характеристик потока мюонов при различных метеорологических параметрах грозных явлений, влияли на оценку эффективности регистрации этих явлений мюонным годоскопом УРАГАН. В результате было показано, что более чувствительными к атмосферным возмущениям являются параметры анизотропии потока мюонов, которые в целом позволяют идентифицировать грозные ячейки с эффективностью около 70%, а при сопровождении грозных явлений теплыми и холодными фронтами – более 80%.

На рис. 17 представлены результаты корреляционного анализа горизонтальной проекции вектора анизотропии потока мюонов и высоты тропопаузы, определенные по данным доплеровского радара.



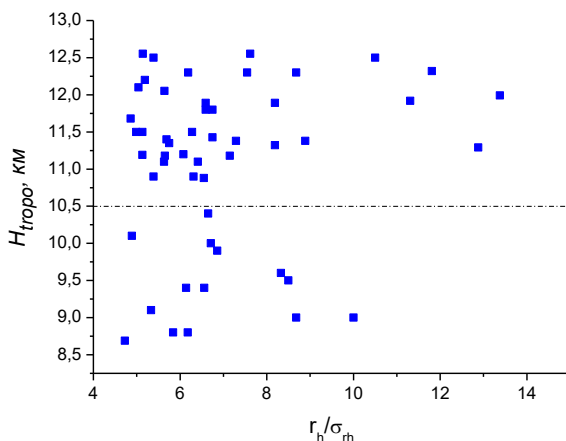


Рис. 17. Корреляционные зависимости величины горизонтальной проекции вектора анизотропии потока мюонов от высоты тропопаузы

Из рис. 17 следует, что в основном анизотропия потока мюонов наблюдается при высотах тропопаузы больше 10,5 км, что хорошо согласуется с высотой генерации мюонов в атмосфере (от 10 до 20 км).

**В приложении** приводится описание перспектив дальнейшего развития метода мюонографии.

Основной сложностью при применении метода мюонографии для изучения различных событий является наложение возмущений в гелиосфере, магнитосфере и атмосфере, которые могут происходить одновременно. В настоящее время для их разделения используется разница в длительности анализируемых событий: сутки и часы для гелиосферных и магнитосферных; часы и минуты – для атмосферных. Однако, для более надежного разделения возмущений необходимо наличие нескольких мюонных годоскопов в различных географических точках, расстояния между которыми определяют характером решаемых задач.

Для исследования гелиосферных и магнитосферных событий необходимо размещать годоскопы на расстояниях в тысячи километров друг от друга. Атмосферные условия в этих точках будут разными, а гелиосферные возмущения практически одинаковыми, с учетом временного сдвига, что позволит легко разделять такие события. Поэтому для дальнейшего развития метода мюонографии необходимо создание сети мюонных годоскопов, аналогичной сети нейтронных мониторов. Пример такой сети для проведения гелиосферных исследований на



$E_{cp} = 63 \text{ ГэВ}$

*Рис. 18. Контуры  
асимптотических направлений  
протонов с энергией 63 ГэВ.*

территории России представлен на рис. 18. Контуры соответствуют областям асимптотических направлений протонов первичных космических лучей с энергией 63 ГэВ, генерирующих положительные мюоны, которые регистрируются в мюонных годоскопах под зенитным углом  $17^\circ$ . Видно, что такая сеть покрывает практически всю территорию Российской Федерации.

Использование метода мюонографии для раннего обнаружения и прогнозирования дальнейшего развития атмосферных возмущений требует более плотного расположения мюонных годоскопов. В качестве примера на рис. 19 представлен проект размещения мюонных годоскопов в Московском регионе. Из рисунка видно, что подобное расположение мюонных годоскопов представляет собой «фронтальную антенну» для регистрации возмущений, идущих, как правило, с западного направления. Это позволит контролировать состояние атмосферы над регионом и своевременно обнаруживать опасные процессы и явления.



*Рис. 19. Проекция областей, генерирующих мюоны на высоте 16 км в интервале зенитных углов  $0^\circ - 70^\circ$ , на карте Подмосковья.*

В заключении сформулированы основные результаты работы:

## 1. Метод мюнографии

- 1.1 Разработан способ получения мюнографий по данным мюонных годоскопов для изучения возмущений, вызванных солнечной активностью, в космическом и околоземном пространстве и прослеживания динамики их развития.
- 1.2. Предложены количественные параметры, описывающие мюнографии: вектор локальной анизотропии потока мюонов космических лучей и его проекции, вектор относительной анизотропии, его горизонтальная проекция  $r_h$  и проекции на географический юг  $r_s$  и восток  $r_e$ , указывающие на анизотропию потока мюонов по азимутальным направлениям.
- 1.3. Разработан метод перехода от мюнографий в аппаратной системе координат к мюнографиям в системе GSE (Geocentric Solar Ecliptic System) и способ обнаружения по мюнографиям в этой системе гелиосферных возмущений, вызванных воздействиями неоднородностей межпланетного магнитного поля на поток заряженных первичных космических лучей.

## 2. Эксперимент на мюонном годоскопе УРАГАН

Получены мюнографии, содержащие  $\sim 1.5$  триллиона зарегистрированных мюонов, для которых:

- 2.1. Проведено сопоставление данных по вариациям скорости счета МГ УРАГАН и нейтронных мониторов, в том числе во время гелиосферных и магнитосферных возмущений. При сопоставлении было показано, что среднемесячные значения суточных среднеквадратичных отклонений данных мюонного годоскопа УРАГАН и нейтронных мониторов MOSC и ARTY коррелируют с коэффициентами 0.84 и 0.78 соответственно.
- 2.2. Впервые изучены долговременные вариации проекций вектора локальной анизотропии в период с 2007 по 2020 гг. Показано, что в вариациях вектора локальной анизотропии в диапазоне зенитных углов  $25^\circ \leq \theta < 76^\circ$  присутствуют все известные периоды, обусловленные вращательными движениями Земли, Луны и Солнца. Установлены устойчивые среднегодовые суточные корреляции между проекциями на ось юг-север  $A_S$  и на ось восток-запад  $A_E$ .
- 2.3. Получены корреляции среднемесячных значений проекции вектора относительной анизотропии  $r_h$  со среднемесячными значениями параметров межпланетного магнитного поля  $B_i$  и индексами

геомагнитной активности  $Kp$ . Выявлено, что наилучшие корреляции наблюдаются в период с 2007 по 2017 гг. между параметрами  $r_h$  и  $B_r$  (коэффициент корреляции составляет  $\sim 0.76$ ), а также между параметрами  $r_h$  и  $Kp$  (коэффициент корреляции составляет  $\sim 0.77$ ). В период с 2018 по 2020 гг. проявляется аномальное поведение корреляционных зависимостей.

### 3. Основные результаты применения метода мюнографии:

- 3.1. Впервые получены мюнографии GLE (ground-level enhancements) в локальной и GSE-системах, позволяющие прямым методом исследовать угловые изображения коллимированного сгустка релятивистских солнечных протонов, выброшенных из Солнца.
- 3.2. Показано, что изменения относительной анизотропии вариаций потока мюонов ( $r_S$  и  $r_E$ ) во время форбуш-понижений наблюдаются в основном на фазах падения и минимума ФП и в среднем соответствуют восточно-западной вариации анизотропии первичных космических лучей.
- 3.3. Впервые получены GSE-отображения деформаций углового распределения космических лучей на основе анализа последовательностей мюнографий, для гелиосферных возмущений, вызванных корональными выбросами масс, выявлены особенности регистрации геоэффективных и негеоэффективных КВМ в различные периоды солнечной активности.
- 3.4. Установлено, что в периоды минимумов солнечной активности (2008 – 2010 гг., 2017 – 2019 гг.) в  $(72 \pm 4)\%$  возмущений, вызванных высокоскоростным солнечным ветром, наблюдалось повышение потока космических лучей в среднем за  $(18 \pm 4)$  часов до начала магнитного возмущения на Земле.
- 3.5. Впервые проведено сопоставление мюнографий с картами доплеровского радиолокатора во время грозových явлений (ГЯ). Выявлено, что более чувствительными к атмосферным возмущениям являются параметры анизотропии потока мюонов, которые позволяют идентифицировать ГЯ с вероятностью около 70%, а при сопровождении ГЯ теплым и холодным фронтами – с эффективностью более 80%, также выявлено, что в основном анизотропия потока мюонов наблюдается при высотах тропопаузы, составляющих больше 10.5 км, и высотах верхней границы облачности более 9.5 км, что хорошо согласуется с данными о высоте генерации мюонов в атмосфере (10 – 20 км).

Таким образом, в результате выполнения диссертационной работы разработан и реализован новый метод дистанционного исследования космического и околоземного пространства в потоке мюонов космических лучей – метод мюонографии, позволяющий качественно и количественно изучать возмущения в межпланетном и околоземном пространстве и проследивать динамику их развития. Применение этого метода с целью анализа результатов длительного эксперимента (2007 – 2020 гг.), проводимого на мюонном годоскопе УРАГАН, позволило получить целый ряд новых научных результатов в физике космических лучей и солнечно-земных связей. Полученные результаты лягут в основу развития сети мюонных годоскопов для непрерывного наблюдения за солнечными событиями, возмущениями в магнитном поле и атмосфере Земли.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих основных работах:**

1. N.S. Barbashina, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko. Method of muonography and prospects of its further development. *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. Vol. 84, iss. 6, pp. 1182-1194. DOI: 10.1134/S1063778821130044 (Scopus, WoS).
2. Н.В. Осетрова, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Ю. Коновалова, В.В. Шутенко. Исследование связи параметров вариаций космических лучей, регистрируемых на земле, с корональными дырами на Солнце. *Известия РАН. Серия физическая*. 2021. Т. 85, № 11, с. 1608–1610. DOI: 10.31857/S0367676521110284 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85, no. 11, pp. 1269-1271) (BAK, Scopus).
3. N.V. Osetrova, I.I. Astapov, N.S. Barbashina and A.Y. Konovalova. Criteria for early prediction of geomagnetic disturbances caused by coronal holes during periods of low solar activity based on muon flux variations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1690, 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1690/1/012019 (Scopus).
4. A.Yu. Konovalova, I.I. Astapov, N.S. Barbashina, N.V. Osetrova, Y.N. Mishutina, et al. Analysis of muon flux variations caused by high-speed solar wind during periods of low solar activity. *Physics of Atomic Nuclei*. 2019. Vol. 82, №. 6, pp. 909–915. DOI: 10.1134/S1063778819660311 (Scopus, WoS).
5. I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.N. Dmitrieva, I.A. Melnikova, N.V. Osetrova, et al. Investigation of local deformations of muon flux angular distribution during CME with GSE-mapping technique. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1390, 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/1390/1/012067 (Scopus, WoS).
6. И.И. Яшин, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, К.Г. Компаниец и др. GSE-отображение деформаций углового распределения потока мюонов, регистрируемого годоскопом УРАГАН, в режиме реального времени. *Известия РАН. Серия физическая*. 2019. Т. 83, № 5, с. 631–634. DOI: 10.1134/S0367676519050405 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. Vol. 83, no. 5, pp. 572-575) (BAK, Scopus).
7. Н.С. Барбашина, И.И. Астапов, Т.А. Белякова, А.Н. Дмитриева, А.В. Козырев и др. Изучение вариаций потока мюонов, зарегистрированных МГ УРАГАН во время гроз. *Известия РАН. Серия физическая*. 2017. Т. 81, № 2, с. 250–253. DOI: 10.7868/S0367676517020065 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. Vol. 81, no. 2, pp 230-233) (BAK, Scopus).
8. Н.С. Барбашина, И.И. Астапов, В.В. Борог, А.Н. Дмитриева, Р.П. Кокоулин и др. Изменения относительной анизотропии потока мюонов во

время форбуш-понижений по данным МГ УРАГАН. Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, № 5, с. 688–690 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. Vol. 79, no. 5, pp. 634-636) (BAK, Scopus).

9. N. Barbashina, N. Ampilogov, I. Astapov, V. Borog, A. Dmitrieva, et al. Local anisotropy of muon flux during Forbush decreases from URAGAN data. 2015. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 632, 012049. DOI:10.1088/1742-6596/632/1/012049 (Scopus, WoS).

10. I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.N. Dmitrieva, R.P. Kokoulin, A.A. Petrukhin, et al. Local anisotropy of muon flux - the basis of the method of muon diagnostics of extra-terrestrial space. Advances in Space Research. 2015. Vol. 56, iss. 12, pp. 2713–2718. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.039 (Scopus, WoS).

11. I.I. Yashin, I.I. Astapov, N.S. Barbashina, V.V. Borog, A.N. Dmitrieva, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, E.I. Yakovleva. Real-time data of muon hodoscope URAGAN. Advances in Space Research. 2015. Vol. 56, iss. 12, pp. 2693–2705. DOI: 10.1016/j.asr.2015.06.003 (Scopus, WoS).

12. N.S. Barbashina, I.I. Astapov, A.N. Dmitrieva, A.Yu. Konovalova, K.G. Kompaniets, et al. Comparison of muon hodoscope URAGAN and neutron monitors' data for 2008 – 2014. Proceedings of Science. 2015. PoS(ICRC2015)130 (Scopus).

13. В.В. Шутенко, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, Р.П. Кокоулин и др. Долговременные вариации углового распределения потока мюонов. Геомагнетизм и аэрномия. 2013. Т. 53. № 5. с. 611-619. DOI: 10.7868/S0016794013050155. (Geomagnetism and Aeronomy. 2013. Vol. 53, no. 5, pp. 571-579) (BAK, Scopus, WoS).

14. А.С. Михайленко, Н.В. Ампилогов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, К.Г. Компаниец и др. Изучение вариаций потока мюонов на поверхности Земли по данным мюонного годоскопа во время нестационарных атмосферных процессов. Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75, № 6, с. 877–880 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2011. Vol. 75, no. 6, pp. 827-830) (BAK, Scopus).

15. D.A. Timashkov, Yu.V. Balabin, N.S. Barbashina, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, et al. Ground level enhancement of December 13, 2006 observed by means of muon hodoscope. Astroparticle Physics. 2008. Vol. 30, pp. 117–123. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2008.07.008 (Scopus).

Подписано в печать \_\_. \_\_.20\_\_. Объем \_\_ п.л. Тираж 100 экз. Заказ \_\_

---

Типография НИЯУ МИФИ. 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31