

На правах рукописи

БАРБАШИНА Наталья Сергеевна

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ В ПОТОКЕ МЮОНОВ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ  
В ГОДСКОПИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Автор:



Москва 2013

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор  
Петрухин Анатолий Афанасьевич,  
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник  
Веселовский Игорь Станиславович,  
НИИЯФ МГУ, г. Москва

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

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

Защита состоится 20 июня 2013 г. в 17 ч. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон (499)324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан \_\_\_ мая 2013 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

Вариации потока космических лучей (КЛ), регистрируемые на поверхности Земли, несут информацию о различных солнечных, гелиосферных и атмосферных явлениях. Поэтому их исследование открывает возможность раннего обнаружения опасных гелиосферных возмущений, способных вызвать геоэффективные события. Одним из ярких примеров влияния солнечной активности на космические лучи является форбуш-эффект (ФЭ), который представляет собой резкое понижение интенсивности КЛ, обусловленное крупномасштабными распространяющимися возмущениями солнечного ветра [1], поэтому его часто называют форбуш-понижением (ФП). Исследования форбуш-понижений на поверхности Земли ведутся в основном с помощью наземных нейтронных мониторов [2]. Этот подход является практически стандартным и чувствителен к вариациям КЛ относительно низких энергий, которым соответствуют большие амплитуды наблюдаемого эффекта. Нейтронные мониторы объединены в единую сеть, которая позволяет проводить глобальную съемку вариаций космических лучей по всему земному шару, но с помощью установок, расположенных в различных географических точках и, соответственно, регистрирующих события в разные моменты времени.

Исследования ФП в потоке мюонов имеют следующие особенности: во-первых, мюоны чувствительны к более высоким, чем нейтроны, энергиям первичных космических лучей (ПКЛ), что открывает возможность изучения гелиосферных возмущений, ответственных за модуляцию высокоэнергичных ПКЛ; во-вторых, что более важно, мюоны сохраняют направление движения первичных частиц, а это позволяет получать пространственно-угловые картины модуляций космических лучей в околоземном пространстве и изучать их динамику в широком диапазоне зенитных и азимутальных углов с помощью одной установки. Такие исследования стали возможны благодаря созданию аппаратуры нового поколения – мюонных годоскопов. Однако исследования ФП в потоке мюонов имеют и некоторую специфику: меньшие амплитуды падения интенсивности КЛ из-за более высоких первичных энергий и необходимость учета влияния температуры атмосферы на поток мюонов. Такая специфика предъявляет более высокие требования к методам их анализа. Поэтому разработка новых подходов к исследованиям ФП в потоке мюонов с использованием новой аппаратуры – мюонных годоскопов – является весьма актуальной задачей.

### **Цель работы**

Разработка и развитие методов исследования форбуш-эффектов в потоке мюонов космических лучей по данным мюонного годоскопа УРАГАН.

### **Научная новизна**

Разработанные методы обработки данных мюонных годоскопов позволили выявить качественно новые закономерности в развитии форбуш-понижений в потоке мюонов космических лучей:

впервые с помощью одной установки и в рамках единого подхода определены интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики форбуш-понижений по данным мюонного годоскопа;

впервые получены мюонографии форбуш-понижений в потоке мюонов (патент на изобретение № 2406919);

впервые введена в методику анализа ФП горизонтальная проекция вектора относительной анизотропии потока мюонов и показано, что ее изменения могут служить предиктором геоэффективных событий;

обнаружены корреляции между проекциями вектора относительной анизотропии потока мюонов на направления север-юг и восток-запад.

### **Достоверность**

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

Амплитуды форбуш-понижений, измеренные на мюонном годоскопе и нейтронном мониторе, находятся в хорошем согласии с коэффициентом корреляции 0.72.

Корректность разработанных методов анализа форбуш-понижений в потоке мюонов подтверждается тем, что всем выявленным ФП с амплитудой выше 0.5% соответствуют гелиосферные возмущения различного типа, зарегистрированные независимыми установками.

Анализ горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии потока мюонов ( $r_n$ ) во время ФП позволил выявить периоды различных нестационарных процессов в гелиосфере с эффективностью около 95%.

### **Практическая значимость**

Разработанные методы комплексного анализа данных по исследованию вариаций потока мюонов космических лучей во время

форбуш-понижений, зарегистрированных мюонным годоскопом, могут быть использованы для анализа форбуш-понижений, регистрируемых другими детекторами.

Полученные энергетические, угловые и временные характеристики форбуш-понижений в потоке мюонов космических лучей существенно расширяют информативность наземных наблюдений и 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.

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

#### **Личный вклад**

Автор участвовал в разработке и создании мюонного годоскопа УРАГАН, проведении и обеспечении длительного эксперимента в период с 2005 года по настоящее время. Автор внес определяющий вклад в разработку методов исследования форбуш-понижений по данным мюонных годоскопов. Автором разработаны алгоритмы для комплекса программ обработки и анализа вариаций потока мюонов во время форбуш-понижений, а также унифицированные формы (паспорта) на исследуемые события. Автором получены интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики форбуш-понижений в потоке мюонов космических лучей в области энергий выше 10 ГэВ, проведен их анализ. Автором проанализированы корреляции между характеристиками ФП и параметрами гелиосферных возмущений в исследуемые периоды и оценен прогностический потенциал данных по анизотропии потока мюонов. Автором подготовлены статьи и представлены доклады по результатам исследований ФП по данным мюонного годоскопа УРАГАН.

#### **Автор защищает**

1. Разработанные методы исследования различных характеристик форбуш-понижений по измерениям потока мюонов в годоскопическом режиме.

2. Интегральные, энергетические, пространственно-угловые и временные характеристики форбуш-понижений, зарегистрированных в потоке мюонов космических лучей на МГ УРАГАН в период с 2006 по 2011 гг.

3. Результаты анализа полученных характеристик: амплитуд ФП, показателей степени энергетической зависимости амплитуды падения интенсивности космических лучей в области энергий 10-30 ГэВ, их временной зависимости на разных фазах развития ФП, горизонтальных проекций вектора относительной анизотропии потока мюонов во время ФП и корреляционных зависимостей между его проекциями на направления север-юг и восток-запад.

4. Результаты сопоставления характеристик вариаций потока мюонов, регистрируемых в годоскопическом режиме, с различными параметрами состояния околоземного пространства до и во время ФП.

#### **Апробация**

Результаты работы были доложены на 22 международных и российских конференциях: Международной конференции по космическим лучам (ICRC 2005, 2007, 2009, 2011), Европейском симпозиуме по космическим лучам (ECRS 2006, 2008, 2010, 2012), Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ 2006, 2008, 2010, 2012), Баксанской молодежной школе экспериментальной и теоретической физики (2007, 2008, 2009, 2010), Научной сессии НИЯУ МИФИ (2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012), опубликованы в их трудах, а также в девяти статьях в журналах из перечня ВАК: "Приборы и техника эксперимента", "Известия РАН. Серия физическая", "Краткие сообщения по физике" и "Journal of Physics: Conference Series".

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

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем диссертации: 133 страницы, 100 рисунков, 12 таблиц, 55 наименований цитируемой литературы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

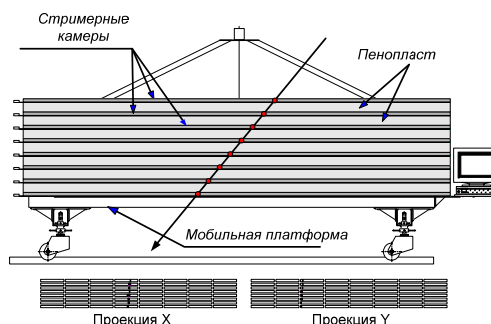
**Во введении** рассмотрены результаты исследований ФП в разных компонентах космических лучей с помощью различных детекторов, их преимущества и недостатки, а также особенности исследования ФП в потоке мюонов, регистрируемых в годоскопическом режиме.

**В главе 1** описываются аппаратура, экспериментальные данные, способы учета барометрического и температурного эффектов, а также процедура выявления периодов падения темпа счета по данным нейтронных мониторов.

Мюонный годоскоп УРАГАН представляет собой широкоапертурную установку модульного типа, состоящую из четырех

отдельных супермодулей (рис.1), которые работают как автономные координатно-трековые детекторы. Каждый супермодуль (СМ) состоит из восьми плоскостей камер стримерных трубок, оснащенных системой внешних считывающих пластин (стрипов). Одна плоскость супермодуля содержит 20 камер и  $320X+288Y$  каналов регистрации. Такая структура позволяет с высокой степенью достоверности и надежности отсекал случайные срабатывания, прохождение каскадных ливней и т.п. явления. Площадь супермодуля составляет  $\sim 11.5 \text{ м}^2$ , при этом обеспечивается высокая пространственная и угловая точность регистрации мюонов (соответственно 1 см и 1 градус) в широком диапазоне зенитных углов от 0 до 80 градусов.

Рис.1. Схема СМ мюонного годоскопа УРАГАН (сверху) и отклик супермодуля годоскопа на прохождение одиночного мюона (внизу)



Каждую минуту один супермодуль мюонного годоскопа УРАГАН регистрирует и записывает в двумерные угловые матрицы (рис.2) информацию об около 80 тысячах мюонов, которые представляют собой исходный материал для дальнейшего анализа. Для решения различных задач данные могут объединяться как по времени, так и по угловым ячейкам, но при этом исходная информация сохраняется. При анализе ФП размер угловой ячейки составляет 1 на 4 градуса (для зенитно-азимутальной сетки).

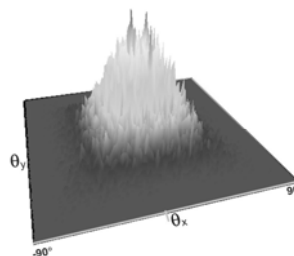


Рис.2. Одноминутная матрица данных в проекциях зенитного угла

Рассматриваемая в диссертации методика исследования форбуш-эффектов в потоке мюонов была разработана на основе экспериментальных данных мюонного годоскопа УРАГАН за 2006 – 2011 гг. Полная длительность измерений составила 2095 дн., или 50280 ч. На рис.3 приведен темп счета реконструированных событий трех супермодулей за анализируемый

период, который свидетельствует о высокой степени идентичности этих супермодулей.

Изменения состояния атмосферы приводят к модуляциям потока

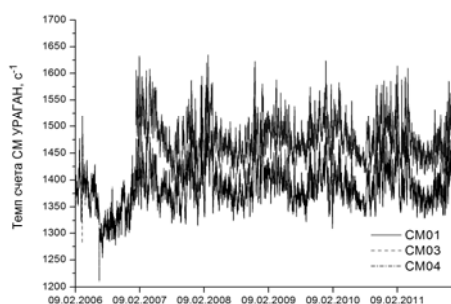


Рис.3. Темп счета реконструированных событий трех СМ МГ УРАГАН в период с 9 февраля 2006 г. по 31 декабря 2011 г.

мюонов на поверхности Земли. Из атмосферных эффектов наибольшее влияние на поток мюонов оказывают барометрический и температурный эффекты [3].

Поправка на барометрический эффект вводится достаточно просто:

$$\Delta N_p(E_{\text{мин}}, X, \theta) / N_0(E_{\text{мин}}, X, \theta) = \beta(E_{\text{мин}}, X, \theta) \times (P - P_0) / 100\%, \quad (1)$$

где  $P$  и  $P_0$  – текущее и среднее за длительный период значения давления на уровне регистрации;  $\beta$  – барометрический коэффициент;  $N_0(E_{\text{мин}}, X, \theta)$  – невозмущенный поток мюонов в точке наблюдения на глубине  $X$  для зенитного угла  $\theta$  и пороговой энергии  $E_{\text{мин}}$ .

Точно учесть температурный эффект введением поправки на приземную температуру невозможно. Необходимо знать дифференциальные температурные коэффициенты (ДТК), позволяющие вносить поправку в темп счета с учетом изменения температуры на всех высотах атмосферы. При изменении высотного хода температуры на  $\Delta T(h)$ , где  $h$  – глубина в атм., поток мюонов изменится на  $\Delta N_T(E_{\text{мин}}, X, \theta)$  и относительное отклонение можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta N_T(E_{\text{мин}}, X, \theta) / N_0(E_{\text{мин}}, X, \theta) \cdot 100\% &= \int_0^X W_T(E_{\text{мин}}, X, h, \theta) \Delta T(h) dh \approx \\ &\approx \sum_i W_T(E_{\text{мин}}, X, h_i, \theta) \Delta T(h_i) \Delta h_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где функция  $W_T(E_{\text{мин}}, X, h, \theta)$  и есть ДТК, которые для мюонных годоскопов были рассчитаны в работе [4].

Исследования ФП проводились на основе объединенных данных трех супермодулей МГ УРАГАН, скорректированных на барометрический и температурный эффекты. Для учета температурного эффекта использовались данные измерений температуры атмосферы,



проводимых Центральной аэрологической обсерваторией, которая расположена в г. Долгопрудном (Московская область) [5].

Из-за более высоких энергий первичных частиц падение темпа счета мюонного годоскопа УРАГАН меньше, чем изменения интенсивности КЛ, регистрируемые нейтронными мониторами, поэтому первоначальный поиск периодов ФП был проведен по данным нейтронных мониторов, которые имели различные асимптотические направления прихода частиц и располагались на различных геомагнитных широтах.

В главе 2 приводится описание методов и результатов анализа ФП в интегральном потоке мюонов.

На основе выбранных критериев выявления ФП в потоке мюонов, с учетом периодов корректной работы мюонного годоскопа УРАГАН и наличия данных о температурном разрезе в период с 2006 по 2011 гг., для дальнейшего анализа было отобрано 33 ФП с амплитудой более или порядка 0.5%. К сожалению, измерения проводились, в основном, в период минимума солнечной активности, что и объясняет относительно небольшую статистику.

Для анализа интегрального темпа счета использовался метод определения основных характеристик фобуш-понижений, основанный на последовательных усреднениях темпа счета до и после ФП за различные интервалы времени с учетом различных трендов (рис.4).

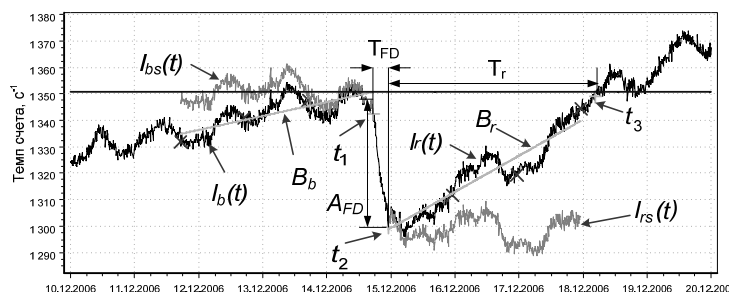


Рис.4. Параметры, характеризующие ФП

С помощью разработанного метода по интегральному темпу счета мюонов МГ УРАГАН были определены основные характеристики 33 ФП. Аналогичным образом (с учетом наличия данных) были проанализированы временные ряды многонаправленного мюонного телескопа (МТ) Нагоя [6] (15 ФП) и Московского нейтронного монитора (МНМ) [7] (28 ФП). Анализ полученных характеристик показал, что, в основном, ФП, зарегистрированные МГ УРАГАН и МТ Нагоя, имеют амплитуду падения  $\sim 1\%$ , а по данным МНМ средняя амплитуда падения

составила около 1.5%. Были изучены взаимные корреляции как между характеристиками для каждого детектора, так и между основными характеристиками ФП, полученными по данным разных установок (рис.5).

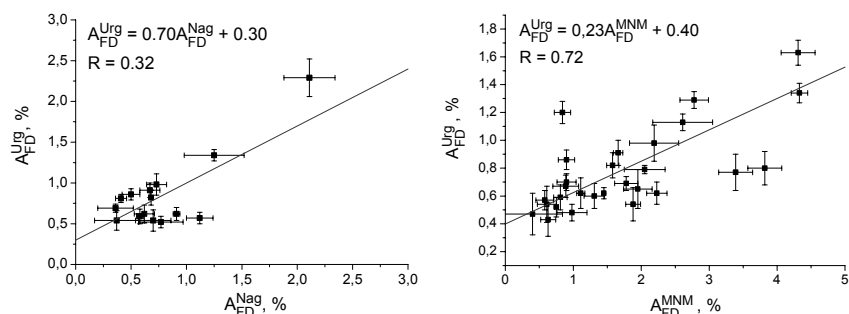


Рис.5. Корреляционные зависимости между амплитудами падения МГ УРАГАН и МТ Нагоя (слева), МГ УРАГАН и МНМ (справа)

Как видно, амплитуда падения темпа счета, регистрируемого МГ УРАГАН, в 2-3 раза меньше, чем МНМ.

Полученные характеристики вариаций потока мюонов были сопоставлены с параметрами солнечного ветра (СВ): скоростью ( $V$ ), плотностью ( $P$ ) и температурой ( $T$ ); межпланетного магнитного поля (ММП): вектором магнитной индукции ( $B$ ) и его проекцией на ось  $Z$  ( $B_z$ ); индексами геомагнитной активности ( $Dst$  и  $AE$ ), которые определялись по базе данных OMNI2 [8]. В результате были получены корреляционные зависимости, описывающие связь амплитуды

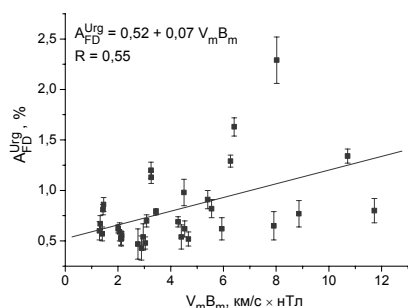


Рис.6. Корреляционная зависимость между  $A_{FD}^{Urg}$  и параметром  $V_m B_m$

падения темпа счета МГ УРАГАН и параметров СВ, ММП и магнитного поля Земли (МПЗ).

Показано, что наибольшая корреляция наблюдается с величиной  $V_m B_m$ , характеризующей возмущенность СВ (рис.6). Сходная зависимость была ранее получена для нейтронного монитора [9].

**Глава 3** посвящена методам и результатам анализа энергетических характеристик форбуш-понижений по результатам регистрации изменений потока мюонов в различных зенитно-угловых интервалах.

С помощью разработанного подхода к определению основных характеристик ФП они были получены для пяти зенитно-угловых интервалов:  $[0^\circ-17^\circ)$ ,  $[17^\circ-26^\circ)$ ,  $[26^\circ-34^\circ)$ ,  $[34^\circ-44^\circ)$  и более  $44^\circ$ , выбранных исходя из равной статистической обеспеченности. Этим диапазонам зенитных углов соответствуют среднелогарифмические энергии первичных протонов, дающих вклад в изменения темпа счета мюонного годоскопа УРАГАН во время ФП ( $E_{ln}$ ): 14.7, 15.5, 17.5, 19.7 и 25.3 ГэВ, которые были рассчитаны с помощью пакета CORSIKA в работе [10]. Анализ энергетического спектра модуляций космических лучей во время ФП проводился на основе зависимостей  $A_{FD}$  от  $E_{ln}$ . Эти зависимости фитировались степенной функцией  $E^\alpha$ .

Для 33 ФП по данным МГ УРАГАН были оценены показатели спектра амплитуд  $\alpha$ . Их распределение, характеризуется средним значением  $\alpha = -0.97 \pm 0.41$  (указан среднеквадратичный разброс), которое, в среднем, согласуется со степенным характером модуляций энергетического спектра первичных космических лучей с показателем  $-1$  [11].

Исследование временных изменений показателя спектра амплитуд на разных фазах развития события  $\alpha(\tau)$ : падения, минимума и восстановления, которые соответствуют различным фазам влияния гелиосферного возмущения на поток КЛ, было проведено ранее в работе [12] для одного ФП с использованием данных трех нейтронных мониторов и мюонного телескопа. Хорошее временное и угловое разрешение МГ УРАГАН

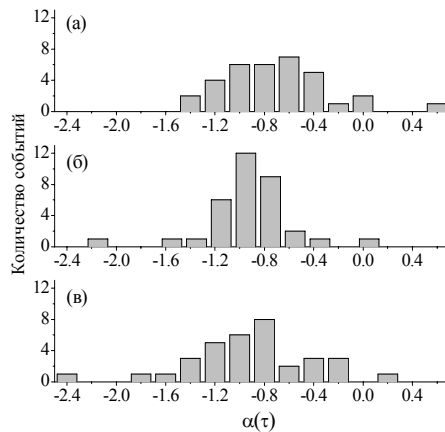


Рис.7. Распределение средневзвешенных значений  $\alpha(\tau)$  для 33 ФП на различных фазах: падения (а), минимума (б), восстановления (в)

разрешение МГ УРАГАН позволяет проводить такие исследования с помощью одной установки. Для этого показатель спектра понижений темпа счета УРАГАН оценивался с шагом в 40 - 60 мин. В результате впервые с помощью одной установки была исследована динамика показателя спектра амплитуд на разных фазах развития ФП. Распределения средневзвешенных значений  $\alpha(\tau)$ , рассчитанных для 33 ФП на каждой фазе, представлены на рис.7. Среднее значение  $\alpha(\tau)$  для фазы падения составило

$-0.72 \pm 0.43$ , для фазы минимума  $-0.91 \pm 0.36$  и для фазы восстановления  $-0.90 \pm 0.51$  (указаны среднеквадратичные отклонения). Из полученных распределений можно сделать вывод, что существенного изменения  $\alpha(\tau)$  на разных фазах не наблюдается. Этот результат не подтверждает выводы работы [12] о зависимости параметра  $\alpha$  от времени.

Сопоставление временных изменений показателя спектра амплитуд и параметров СВ, ММП и МПЗ во время 33 ФП не выявило каких-либо закономерностей в поведении  $\alpha(\tau)$ , а результаты анализа его поведения на всех фазах развития для различных групп ФП показали, что величина  $\alpha(\tau)$  не является хорошим индикатором для разделения возмущений СВ, ММП и МПЗ.

**В главе 4** рассмотрены методы и результаты анализа ФП по пространственно-угловым характеристикам потока мюонов, регистрируемых в годоскопическом режиме.

Исследование анизотропии потока мюонов проводилось для 28 ФП, зарегистрированных тремя СМ МГ УРАГАН (с 2007 по 2011 гг.). Зенитно-азимутальное распределение потока мюонов можно описывать вектором локальной анизотропии  $\vec{A}$ , который является нормированной на число событий суммой единичных векторов, каждый из которых имеет направление, полученное при реконструкции трека отдельного мюона. Суммарный вектор указывает среднее направление потока мюонов.

Направление вектора анизотропии, естественно, очень близко к вертикальному. Поэтому для исследования отклонений от среднего направления удобно использовать вектор относительной анизотропии  $\vec{r}$ , представляющий собой разницу между текущим вектором  $\vec{A}$  и средним вектором анизотропии  $\langle \vec{A} \rangle$  за длительный промежуток времени:

$$\vec{r} = \vec{A} - \langle \vec{A} \rangle. \quad (3)$$

Особый интерес представляет длина горизонтальной проекции этого вектора  $r_h$ , которая характеризует величину бокового воздействия на угловое распределение потока мюонов:

$$r_h = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}. \quad (4)$$

Для надежного и достоверного выявления периодов изменений анизотропии потока мюонов, вызванных развитием различных нестационарных процессов в околоземном пространстве, были получены статистические характеристики проекций вектора анизотропии, которые позволяют выявлять периоды увеличения анизотропии потока мюонов,

вызванные развитием различных нестационарных процессов в гелиосфере, с эффективностью около 95%. Для фиксации времени начала изменений  $r_h$  удобно использовать скорость ее изменения за выбранный интервал времени (1 ч.) –  $\Delta r_h$ .

Для анализа вариаций интенсивности потока мюонов во время ФП используются часовые матрицы, усредненные по трем СМ МГ УРАГАН (до 2007 года использовались матрицы для каждого СМ отдельно). Каждая матрица (рис.8, а) нормируется на среднюю матрицу, которая получается усреднением минутных матриц за последние сутки (рис.8, б). В результате получается матрица (рис.8, в), в каждой ячейке которой содержатся отклонения от среднего значения, выраженные в единицах их среднеквадратичной величины ( $\sigma$ ). Для сглаживания резких флуктуационных выбросов в отдельных ячейках, все значения матрицы сглаживаются с помощью гауссовского фильтра низких частот (рис.8, з). Учитывая, что в углах матрицы статистика мала, целесообразно представлять ее в виде круга, ограниченного зенитным углом  $75^\circ$  (рис.8, д). Тонкими линиями на рис.8 д показаны направления север-юг и восток-запад, окружностями – зенитные углы  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $75^\circ$ , а шкала в правом верхнем углу дает отклонения от среднего в сигмах. Статистическая обеспеченность такой матрицы около 5 млн событий.

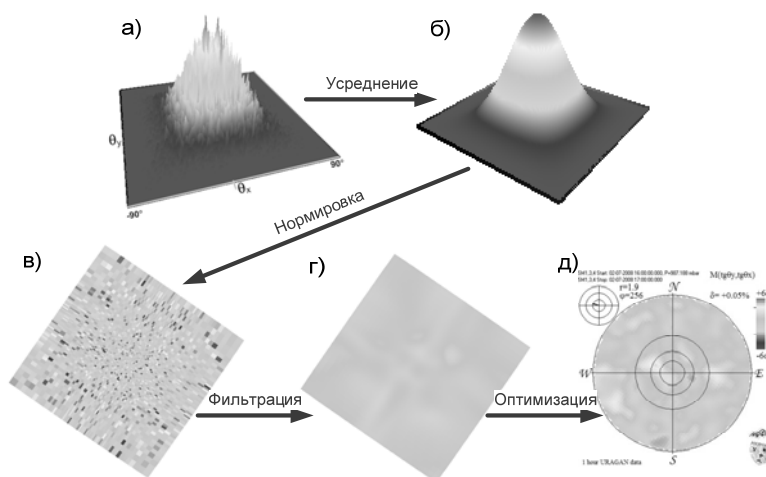


Рис.8. Угловое распределение мюонов, зарегистрированных в течение 1 мин (матрица проекционных углов): а) исходная матрица; б) после усреднения; в) после нормировки; г) сглаженная матрица; д) результирующая матрица

На рис.9 представлена двумерная динамика потока мюонов во время ФП 18 февраля 2011 г.

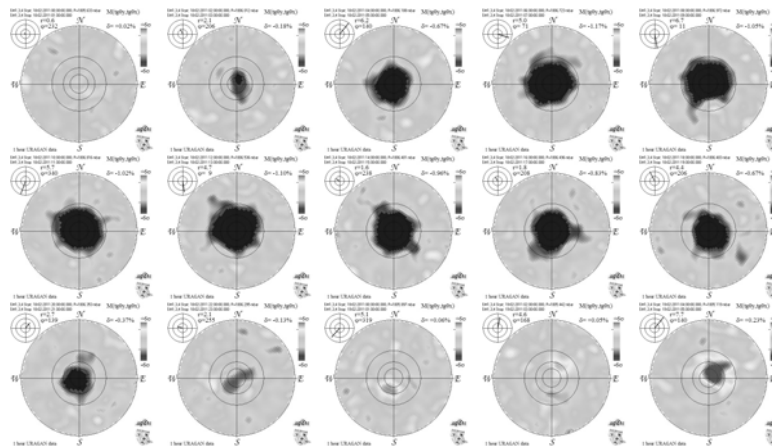


Рис.9. Двумерная динамика среднечасового потока мюонов во время ФП 18 февраля 2011 г. с интервалом 60 мин (с 18/02/2011 00:00 до 19/02/2011 05:00 UT)

Такие мюонные снимки (мюонографии) были получены для всех 28 ФП, зарегистрированных в период с 2007 по 2011 гг. Они дают хорошее наглядное описание изменений углового распределения потока мюонов во время этих событий в режиме реального времени. Однако при больших ФП, когда поток довольно сильно подавляется во всем диапазоне углов, такие изображения дают лишь качественную информацию. Поэтому для получения количественных оценок целесообразно использовать проекции вектора относительной анизотропии потока мюонов на юг и на восток ( $r_S$  и  $r_E$  соответственно). Анизотропия на стадии падения, превышающая изменения в спокойные периоды, наблюдалась в 19 из 28 ФП. На рис.10 представлены корреляции между проекциями векторов  $r_E$  и  $r_S$  во время фазы падения ( $t_1$  – начало падения,  $t_2$  – окончание падения) для шести ФП 2011 г. с разными  $A_{FD}$  (%). Из рис.10 видно, что величина анизотропии на стадии падения не зависит от амплитуды ФП, а характер ее изменений, скорее всего, связан с различием в гелиосферных возмущениях.

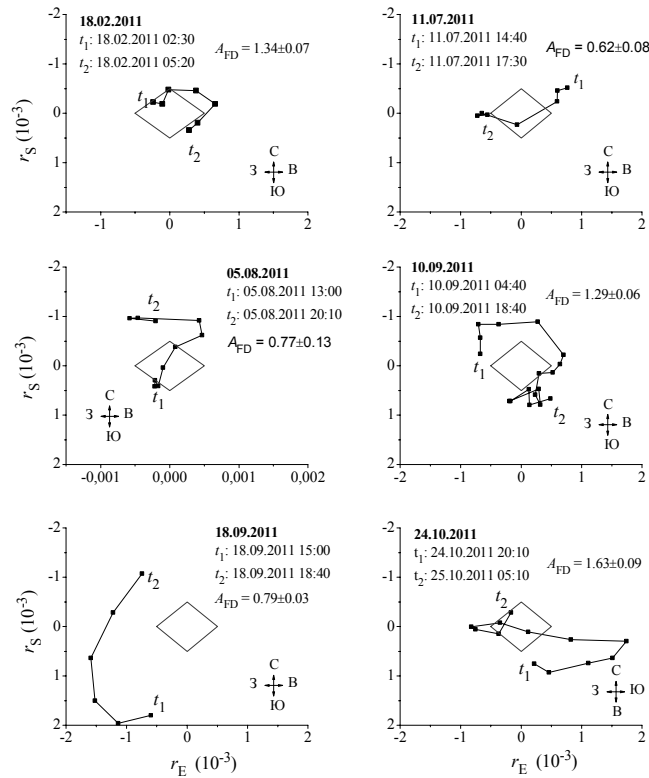


Рис.10. Корреляции между проекциями  $r_E$  и  $r_S$  во время фазы падения ФП (ромб соответствует области изменений для спокойного периода)

Сопоставление характеристик анизотропии потока мюонов и параметров околоземного пространства во время 28 ФП проводилось на основе как корреляционного анализа полученных характеристик, так и их временных изменений. Результаты корреляционного анализа показали, что характеристики темпа счета и анизотропии потока мюонов по-разному коррелируют с параметрами околоземного пространства:  $A_{FD}$  лучше коррелирует с модулем вектора магнитной индукции  $B$  (коэффициент корреляции  $R = 0.57$ ) и с величиной  $V_m B_m$  ( $R = 0.55$ ), а  $r_h^{max}$  лучше коррелирует с индексами геомагнитной активности  $Dst$  ( $R = -0.52$ ) и  $AE$  ( $R = 0.50$ ). Таким образом, параметры  $A_{FD}$  и  $r_h^{max}$  хорошо дополняют друг друга.

С целью оценки предсказательных возможностей было проведено сопоставление времени начала возмущений параметров ММП, СВ и МПЗ и возрастания  $r_h$ . Для этого было отобрано 13 ФП, к которым с большой долей вероятности можно было отнести соответствующие возмущения СВ, ММП и магнитосферы Земли. Была рассчитана разница между

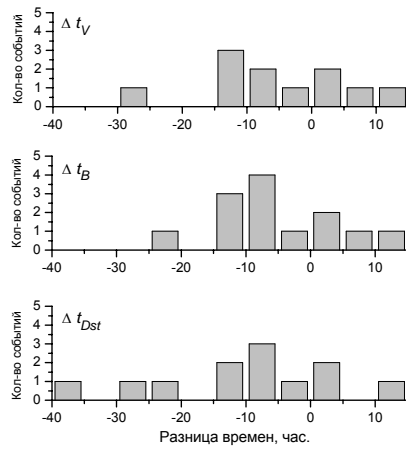


Рис.11. Распределение разницы времен  $\Delta t_V$ ,  $\Delta t_B$  и  $\Delta t_{Dst}$ .

временами начала возмущения в  $r_h$  ( $\Delta r_h$  превышающим  $2.3\sigma$ ) и начала возмущений скорости солнечного ветра ( $\Delta t_V$ ), значения модуля вектора магнитной индукции  $B$  ( $\Delta t_B$ ) и индекса  $Dst$  (момент возрастания SSC или момент падения индекса,  $\Delta t_{Dst}$ ). Соответствующие распределения представлены на рис.11. Из полученных распределений следует, что, в среднем, возмущения в  $r_h$  опережают изменения в параметрах солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и магнитосферы Земли на 10-12 ч.

### В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Разработаны методы исследования характеристик форбуш-понижений по измерениям потока мюонов в годоскопическом режиме, которые имеют универсальный характер, сводят к минимуму субъективный фактор при определении основных параметров форбуш-понижений и дают дополнительную информацию для их изучения:

- метод определения характеристик ФП по интегральному темпу счета и для различных диапазонов зенитных углов;
- метод анализа энергетических характеристик ФП по зенитно-угловому изменению потока мюонов;
- метод анализа пространственно-угловых характеристик потока мюонов во время ФП.
- апробирование способа получения мюонографий форбуш-понижений.



2. Впервые с помощью одной установки и в рамках единого подхода к определению интегральных, энергетических, пространственно-угловых и временных характеристик форбуш-понижений по данным мюонного годоскопа УРАГАН за 2006 – 2011 гг. получены:

- основные параметры форбуш-понижений по интегральному темпу счета и для пяти зенитно-угловых интервалов:  $0 - 17^\circ$ ,  $17 - 26^\circ$ ,  $26 - 34^\circ$ ,  $34 - 44^\circ$  и более  $44^\circ$ , которые соответствуют среднегеометрическим энергиям первичных частиц, дающих вклад в изменение темпа счета мюонного годоскопа во время ФП, в диапазоне 10 – 30 ГэВ;
- показатели степени энергетической зависимости амплитуды падения интенсивности космических лучей в указанном диапазоне энергий;
- временные зависимости показателей энергетических спектров форбуш-понижений на разных фазах их развития;
- уникальные мюонные снимки (мюонографии) форбуш-понижений;
- значения горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии потока мюонов ( $r_h$ ), характеризующей величину бокового смещения углового распределения потока мюонов;
- корреляции между проекциями вектора относительной анизотропии потока мюонов на направления север-юг и восток-запад.

3. Исследование полученных характеристик форбуш-понижений, зарегистрированных на МГ УРАГАН в период с 2006 по 2011 гг., показало, что:

- зависимости амплитуды падения интенсивности потока мюонов от энергии первичных частиц в области 10-30 ГэВ согласуются со степенным характером энергетического спектра модуляции первичных космических лучей со средним показателем  $\alpha = -0.97 \pm 0.41$  (среднеквадратичный разброс);
- не наблюдается существенных изменений в поведении показателя энергетического спектра форбуш-понижений на разных фазах их развития;
- мюонографии ФП дают хорошее качественное описание изменений пространственно-углового распределения потока мюонов во время этих событий в режиме реального времени;
- горизонтальная проекция вектора относительной анизотропии потока мюонов ( $r_h$ ) во время ФП позволяет выявлять периоды

увеличения анизотропии потока мюонов, вызванные развитием различных нестационарных процессов в гелиосфере с эффективностью около 95%.

4. Сопоставление полученных характеристик вариаций потока мюонов, регистрируемых в годоскопическом режиме, с различными параметрами состояния околоземного пространства до и во время ФП показало, что:

- наибольшие корреляции наблюдаются между амплитудой падения ФП и параметрами  $B$  ( $R = 0.57$ ) и  $V_m B_m$  ( $R = 0.55$ ) и между  $r_h$  и  $Dst$  ( $R = -0.52$ ) и  $AE$  ( $R = 0.50$ );
- для прогностического применения разработанных методов целесообразно использовать скорость изменения  $r_h$  за выбранный интервал времени;
- изменения величины горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии потока мюонов для 13 изученных ФП, в среднем, опережают изменения в характеристиках солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и магнитосферы Земли на 10-12 ч. и могут быть использованы для прогнозирования времени прихода гелиосферного возмущения в околоземное пространство.

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

1. Barbashina N.S., Borog V.V., Dmitrieva A.N. et al. Studies of magnetosphere perturbations by means of wavelet analysis of atmospheric muon data. Proc. 29th ICRC, Pune, India. 2005. V. 2. P. 377-380.
2. Barbashina N.S., Borog V.V., Dmitrieva A.N. et al. Study of Forbush effects by means of muon hodoscopes. Presented at 20th ECRS, Lisbon, Portugal, September 2006. Preprint astro-ph/0701288.
3. Timashkov D.A., Barbashina N.S., Borog V.V. et al. Muon diagnostics of the Earth's atmosphere, near-terrestrial space and heliosphere: first results and perspectives. Proc. 30th ICRC, Merida, Mexico. 2007. V. 1. P. 685 - 688.
4. Timashkov D.A., Barbashina N.S., Borog V.V. et al. Investigation of Forbush effects in muon flux measured in integral and hodoscopic modes. Proc. 30th ICRC, Merida, Mexico. 2007. V. 1. P. 315 - 318.
5. Барбашина Н.С., Кокоулин Р.П., Компаниец К.Г. и др. Широкоапертурный мюонный детектор для диагностики атмосферы и магнитосферы Земли // Известия РАН. Серия физическая. Т. 71. № 7. 2007. С. 1072-1074.

6. Барбашина Н.С., Борог В.В., Дмитриева А.Н. и др. Мюонная диагностика атмосферы и магнитосферы Земли // Известия РАН. Серия физическая. Т. 71. № 7. 2007. С. 1069-1071.
7. Барбашина Н.С. Изучение форбуш-эффектов с помощью мюонных годоскопов. Труды 8-й Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики. Т. 2. М.: МИФИ, 2008. с. 16-26.
8. Барбашина Н.С., Кокоулин Р.П., Компаниец К.Г. и др. Широкоапертурный мюонный годоскоп большой площади УРАГАН // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 2. С. 26-32.
9. Timashkov D.A., Barbashina N.S., Kompaniets K.G. et al. Observation of heliospheric disturbances in muon component of cosmic rays at ground level. Proc. 21st ECRS, Koshice, Slovakia. 2008. P. 338-341.
10. Barbashina N.S., Dmitrieva A.N., Kompaniets K.G. et al. The features of the study of Forbush effects in the flux of muons. Proc. 21st ECRS, Koshice, Slovakia. 2008. P. 335-337.
11. Шутенко В.В., Барбашина Н.С., Компаниец К.Г. и др. Наблюдение гелиосферных возмущений в мюонной компоненте космических лучей // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73. № 3. С. 364-367.
12. Барбашина Н.С. Особенности исследования форбуш-эффектов в потоке мюонов. Труды 9-й БМШ ЭТФ. Т. 2 / Под ред. А.А.Петрухина, М.Х.Хоконова. М.: МИФИ, 2009. с. 55 – 64.
13. Барбашина Н.С., Дмитриева А.Н., Компаниец К.Г. и др. Особенности исследования форбуш-эффектов в потоке мюонов // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73. № 3. С. 360-363.
14. Barbashina N.S., Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P. et al. Analysis of Forbush decreases detected by muon detectors DECOR and URAGAN. Proc. 31st ICRC, Lodz, Poland, 2009. Paper ID 0887. Available at <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html/>.
15. Timashkov D.A., Barbashina N.S., Chernov D.V. et al. Analysis of heliospheric disturbances during solar minimum using data of muon hodoscope URAGAN. Proc. 31st ICRC, Lodz, Poland, 2009. Paper ID 0891. Available at <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html/>.
16. Барбашина Н.С., Борог В.В., Кокоулин Р.П., Компаниец К.Г., Петрухин А.А., Тимашков Д.А., Шутенко В.В., Яшин И.И. Способ и устройство для получения мюонографий / Патент на изобретение РФ № 2406919 от 20.12.2010.

17. Барбашина Н.С. Анализ форбуш-эффектов, зарегистрированных мюонным годоскопом УРАГАН. Труды Всероссийской конференции «10-я Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики». БМШ ЭТФ – 2009. Т. 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 59-67.
18. Барбашина Н.С., Астапов И.И., Дмитриева А.Н. и др. Исследование временных изменений показателя спектра амплитуд форбуш-понижений по данным мюонного годоскопа УРАГАН. Труды Научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. Т. 4. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 153-156.
19. Барбашина Н.С., Дмитриева А.Н., Компаниец К.Г. и др. Исследование динамики глобальных возмущений магнитосферы Земли с помощью мюонных детекторов. Краткие сообщения по физике. ФИАН. 2010, № 6, С. 3–5.
20. Barbashina N.S., Astapov I.I., Dmitrieva A.N. et al. Study of temporal changes of the Forbush decrease amplitude spectrum exponent by means of muon hodoscope URAGAN. 22nd ECRS, Abstracts, 2010. P. 121-122.
21. Барбашина Н.С., Астапов И.И., Борог В.В. и др. Исследование энергетических, угловых и временных характеристик форбуш-эффектов, зарегистрированных мюонным годоскопом УРАГАН // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 6. С. 863-866.
22. Barbashina N.S. , Astapov I.I. , Borog V.V. et al. Analysis of Forbush decrease of 18 February 2011 in muon flux. SH2.6. ID 0293. Proc. 32nd ICRC, Beijing, China. 2011. V. 10. P. 279-282.
23. Shutenko V.V. , Barbashina N.S. , Bogdanov A.G. et al. Study of disturbances in the IMF and magnetosphere of the Earth by muon hodoscope data. SH4.1. ID 0058. Proc. 32nd ICRC, Beijing, China. 2011. V. 11, P. 276-279.
24. Barbashina N.S., Astapov I.I., Borog V.V. et al. Study of characteristics of Forbush decreases detected in 2006 – 2011 by means of muon hodoscope URAGAN. Proc. 23 ECRS, Moscow. 2012. Paper SH 574.
25. Barbashina N.S., Astapov I.I., Borog V.V. et al. Study of characteristics of Forbush decreases detected in 2006 – 2011 by means of muon hodoscope URAGAN. 2013. J. Phys.: Conf. Ser. 409. Paper 012189 (<http://iopscience.iop.org/1742-6596/409/1/012189>).
26. Барбашина Н.С., Астапов И.И., Борог В.В. и др. Форбуш-эффекты, зарегистрированные мюонным годоскопом УРАГАН в 2006-2011 гг. // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 5. С. 596-598.

### Список цитируемой литературы

1. Белов А.В. и др. Чем обусловлены и с чем связаны форбуш-эффекты? // Известия РАН. Серия физическая. 2001. Т.65. №3. С.373.
2. Белов А.В. и др. Выделение анизотропии космических лучей в реальном времени // Труды 28 Всероссийской конференции по космическим лучам, [Электрон. ресурс]. М: МИФИ. 2008.
3. Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972.
4. Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P., Petrukhin A.A., Timashkov D.A. Corrections for temperature effect for ground-based muon hodoscopes // Astroparticle Physics. 2011. V. 34. № 6. P.401-411.
5. Центральная аэрологическая обсерватория (Россия, Долгопрудный), <http://www.cao-rhms.ru/index.html>.
6. Fuji Z., Sakakibara S., Fujimoto K., Ueno H. Multi-directional cosmic ray intensities, Nagoya, 1986-1988. // Report of cosmic-ray research laboratory. Nagoya university. Nagoya. Japan. 1990.
7. IZMIRAN: <http://cr0.izmiran.rssi.ru/mosc/main.htm>.
8. База данных OMNI2: [http://ftpbrowser.gsfc.nasa.gov/ace\\_merge.html](http://ftpbrowser.gsfc.nasa.gov/ace_merge.html).
9. Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В. и др. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом. // Геомагнетизм и аэрономия, 2012. Т. 52. № 3. С. 313-320.
10. Яковлева Е.И., Богданов А.Г., Дмитриева А.Н. и др. Функции связи для мюонных годоскопов. // Известия РАН. Серия физическая, 2009. Т. 73. № 3. С. 375-378.
11. Дорман Л.И. Вариации космических лучей и исследования космоса / М.: Изд. АН СССР. 1963.
12. Wawrzynczak A., Alania M.V. Modeling and data analysis of a Forbush decrease. // Advances in Space Research. 2010. V.45. P. 622–631.

Подписано в печать 14.05.2013. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ

---

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