

На правах рукописи

АСТАПОВ ИВАН ИВАНОВИЧ

**МЮОННАЯ ДИАГНОСТИКА КОРОНАЛЬНЫХ
ВЫБРОСОВ МАССЫ ПО ДАННЫМ КООРДИНАТНО-
ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА УРАГАН**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

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

Автор:



Москва - 2018

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

Научный руководитель: Яшин Игорь Иванович,
доктор физико-математических наук,
профессор Отделения ядерной физики и
технологий офиса образовательных
программ НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: Калегаев Владимир Владимирович,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией космо-
физических исследований НИИЯФ МГУ

Махмутов Владимир Салимгереевич,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией физики Солнца
и космических лучей ФИАН

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

Защита состоится «27» июня 2018 г. в 17 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.130.07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу:
115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон (499) 324-84-98.

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

Автореферат разослан « » 2018 г.

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

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



С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Проблема непрерывного мониторинга и заблаговременного обнаружения мощных динамических явлений в гелиосфере, влияющих на магнитосферу и атмосферу Земли, в настоящее время приобрела глобальный характер. От ее решения во многом зависит степень уменьшения негативных последствий для функционирования информационных и энергетических сетей, орбитальной спутниковой группировки, здоровья и безопасности людей в трансполярных авиаперелетах. Подобный мониторинг ведется с применением разнообразной аппаратуры, размещаемой как на спутниках, так и на поверхности Земли.

Важное место в данных исследованиях занимает использование космических лучей (КЛ) высоких энергий, состоящих из протонов и ядер различных элементов, для изучения возмущений и процессов в гелиосфере и околоземном пространстве. Поток первичных КЛ может модулироваться активными процессами в гелиосфере, связанными с солнечной активностью, такими, как магнитные поля облаков солнечной плазмы, которые образуются при корональных выбросах масс (КВМ) во время вспышек на Солнце, ударные волны, которые формируются при движении вращающихся вместе с Солнцем высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ) из корональных дыр и другими возмущениями межпланетного магнитного поля (ММП).

Первичные КЛ взаимодействуют с ядрами атомов атмосферы и генерируют вторичные космические лучи, среди которых особое место занимает жесткая компонента, включающая адроны и мюоны. Вариации первичных КЛ вызывают вариации потоков вторичных КЛ, которые могут регистрироваться на поверхности Земли. Традиционно измерения вариаций КЛ на поверхности Земли проводятся с использованием нейтронных мониторов (НМ), которые регистрируют интегральный поток адронов, рожденных первичными КЛ с энергиями до ~ 10 ГэВ, и мюонных телескопов, регистрирующих мюоны, рожденные первичными частицами с энергиями ~ 50 ГэВ. Каждый нейтронный монитор является детектором интегрального типа, чувствителен к околовертикальному потоку вторичных адронов и не может регистрировать угловые вариации потока вторичных КЛ. В то же время мюоны с хорошей точностью сохраняют направление движения первичных частиц, что позволяет проводить пространственно-угловые измерения модуляций космических лучей в межпланетной среде. Многонаправленные мюонные телескопы (ММТ) позволяют оценить анизотропию потока мюонов на поверхности Земли. Но их недостатком является отсутствие информации о треках

мюонов, поэтому регистрируется только темп счета в пределах телесных углов, определяемых апертурой разных направлений ММТ.

Значительный прогресс в изучении анизотропии КЛ в последнее время связан с созданием и развитием мюонных годоскопов (МГ), которые позволяют регистрировать трек каждого мюона и формировать угловые матрицы (мюонографии) любой формы. Это открыло новые возможности в исследованиях процессов модуляции КЛ в гелиосфере и околоземном пространстве. Поэтому исследование этих процессов с помощью наземной регистрации потока мюонов в годоскопическом режиме является актуальной задачей в солнечно-земной физике, а новое направление исследований получило название мюонная диагностика.

Цель работы

Получение новых знаний о процессах развития возмущений в межпланетном пространстве, связанных с солнечной активностью, на основе изучения пространственно-угловых вариаций потока мюонов космических лучей на поверхности Земли, зарегистрированных мюонным годоскопом УРАГАН.

Научная новизна:

- Впервые для изучения вариаций космических лучей, вызванных корональными выбросами масс, применен анализ непрерывных последовательностей матриц-мюонографий углового распределения космических лучей в системе GSE (geocentric solar ecliptic system), регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН в режиме реального времени. На разработанный способ анализа получен патент РФ на изобретение № 2446495.
- Впервые показано, что в годы максимума солнечной активности суточные вариации локальной анизотропии потока мюонов космических лучей увеличиваются более чем в 2 раза по сравнению с периодом минимума активности Солнца.
- Впервые выявлено, что корреляции суточных отклонений проекций вектора локальной анизотропии A_S и A_E имеют циклическую форму, при этом, максимум отклонений относительно среднего значения соответствует северо-восточному направлению в околополуденные часы.
- Впервые предложены критерии и получены оценки вероятности появления геомагнитных возмущений по вариациям пространственно-углового распределения потока мюонов, регистрируемого в годоскопическом режиме.

Достоверность:

Экспериментальные результаты получены на трех независимо работающих однотипных супермодулях мюонного годоскопа УРАГАН,

которые продемонстрировали хорошую идентичность всех наблюдаемых явлений. Мюонный годоскоп УРАГАН прошел метрологические испытания.

Практическая значимость:

Разработанные методы анализа данных по пространственно-угловым вариациям потока мюонов космических лучей во время гелиосферных возмущений будут использованы для мониторинга и прогнозирования развития опасных процессов, происходящих в межпланетном пространстве, а также для оценки их геоэффективности.

Личный вклад:

- Все работы по диссертации были выполнены лично автором, либо при его определяющем участии. Автором реализован оригинальный метод обнаружения гелиосферных возмущений на основе данных мюонного годоскопа УРАГАН, представляющих собой последовательность матриц-мюонограмм верхней небесной полусферы, зарегистрированных в режиме реального времени.
- Автором проведены исследования геоэффективных и негеоэффективных корональных выбросов масс по данным об анизотропии потока мюонов космических лучей, регистрируемых в годоскопическом режиме.
- Автором разработана методика оценки вероятности возникновения геомагнитных возмущений за сутки-трое по данным мюонного годоскопа.
- Автор непосредственно участвовал в создании супермодулей мюонного годоскопа УРАГАН, проведении и обеспечении длительного эксперимента в период 2007 - 2017 гг.
- Автор внес определяющий вклад в оформление результатов в виде публикаций и научных докладов, а также в подготовку и оформление патента.

Автор защищает:

- Среднесуточные вариации параметров вектора локальной анизотропии потока мюонов и их поведение в разные периоды солнечной активности, полученные на основе анализа 11-летних измерений на МГ УРАГАН в период 2007 – 2017 гг. Впервые показано, что амплитуда вариаций в годы максимума увеличиваются более чем в 2 раза по сравнению с периодом минимума.
- Корреляции усредненных суточных отклонений проекций вектора локальной анизотропии A_S и A_E , которые имеют сложную циклическую форму с максимумом отклонений от среднего значения, соответствующим северо-восточному направлению в околополуденные часы.

- Корреляционные зависимости между характеристиками вектора относительной локальной анизотропии потока мюонов и параметрами геблиосферных и магнитосферных возмущений, которые показали сильную (коэффициент корреляции на уровне $\sim 80\%$) зависимость от индукции межпланетного магнитного поля, и менее сильную – от параметров геомагнитного поля ($\sim 65\%$ для K_p и $\sim 50\%$ для Dst индексов).
- Результаты анализа геоэффективных и негеоэффективных корональных выбросов масс в периоды низкой и повышенной солнечной активности, который показал, что основной вклад в формирование анизотропии потока мюонов дают геоэффективные КВМ, при этом наблюдается повышение интенсивности потока КЛ более чем на 3σ с угловым размером областей более 0.5 ср с направления на Солнце на долготах $0^\circ - 45^\circ$, при этом на долготах $0^\circ - -90^\circ$ наблюдается дефицит потока частиц более чем на 3σ .
- Критерии оценки вероятности возникновения геомагнитных возмущений за сутки-трое по данным мюонного годоскопа УРАГАН, которые обеспечивают среднюю вероятность наблюдения магнитного возмущения на уровне $\sim 60\%$ для бурь с $K_p \geq 5$ и $\sim 64\%$ для бурь с $K_p \geq 6$.

Апробация

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: Международной молодежной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (2012, 2013), Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика" (2012), Научной сессии НИЯУ МИФИ (2012, 2014, 2015), Европейском симпозиуме по космическим лучам (ECRS 2012, 2016), Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ 2012, 2014, 2016), Научной ассамблее COSPAR (2014), Международной конференции по физике частиц и астрофизике (ICPPA 2015, 2016), Международном симпозиуме по космическим лучам и астрофизике (ISCRA 2017), Международной конференции CODATA 2017 "Global challenges and data-driven science" и Международной конференции по космическим лучам (ICRC 2013, 2015), опубликованы в их трудах, а также в статьях в журналах: «Известия РАН. Серия физическая», «Геомагнетизм и аэрономия», «Journal of Physics: Conference Series», «Advances in Space Research», «Proceedings of Science».

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 104 страницы, 91 рисунок, 10 таблиц, 56 наименований источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** приведено описание существующей проблемы исследования возмущений в межпланетном пространстве, источником которых является Солнце. Приведено описание существующих методов исследования корональных выбросов масс, а также основных методов, которые применяются в данной области исследования с использованием космических лучей. Отражена цель работы, научная новизна и актуальность.

В **разделе 1** приводится описание мюонного годоскопа УРАГАН и получаемых экспериментальных данных об угловом распределении потока мюонов, приводятся основные положения мюонной диагностики - нового направления в системе наблюдений солнечно-земных связей. Подробно описывается формат данных МГ УРАГАН и метод построения мюонографий в географической системе координат и в GSE-системе, приводится метод изучения параметров вариаций плотности космических лучей с помощью анализа характеристик локальной анизотропии матриц углового распределения мюонов на поверхности земли, а также их долговременных вариаций за 11-й летний период работы детектора.

Мюонный годоскоп УРАГАН представляет собой широкоапертурный координатно-трековый детектор большой площади (46 м^2), обладающий высоким угловым и пространственным разрешением, способный в режиме реального времени регистрировать пространственно-угловые характеристики потока мюонов одновременно со всех направлений верхней полусферы. Годоскоп разработан и создан в НИЯУ МИФИ и работает в режиме непрерывной экспозиции с 2007 года.

Годоскоп состоит из четырех независимых супермодулей (СМ), представляющих собой восемь слоев газоразрядных трубок, продуваемых газовой смесью и оснащенных внешней двухкоординатной считывающей системой на основе алюминиевых полосок-стрипов. В одном слое находится 20 камер, каждая из которых состоит из 16 трубок с

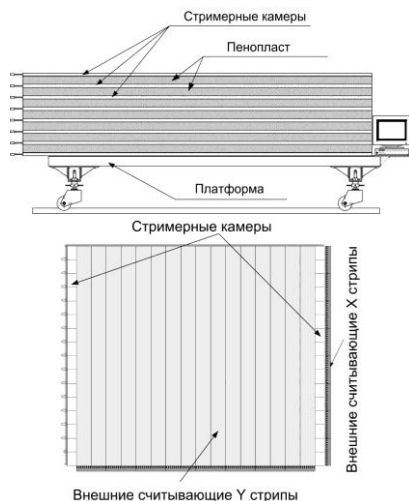


Рис. 1. Схема супермодуля мюонного годоскопа УРАГАН.

находится 20 камер, каждая из которых состоит из 16 трубок с

внутренним размером $9 \times 9 \times 350 \text{ мм}^3$. Стримерный режим работы трубок обеспечивается подбором высокого напряжения и составом газовой смеси ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{n-пентан}$). На рис. 1 представлены схема взаимного расположения камер стримерных трубок и считывающих стрипов, а также схема расположения плоскостей годоскопа.

При прохождении заряженной частицы через объем трубки формируется локальный разряд, который индуцирует электрический импульс на стрипах, считываемый регистрирующей системой годоскопа. Синхронизация всех СМ обеспечивается с помощью модулей GLONASS/GPS. Темп счета реконструированных треков мюонов $\sim 1400 \text{ с}^{-1}$. Энергетический порог регистрации мюонов зависит от зенитного угла и варьируется от 200 до 400 МэВ в зависимости от толщины вещества стен и крыши, окружающих разные супермодули. На рис. 2 приведен пример отклика одного из супермодулей при прохождении одиночного мюона. Параметры трека, а именно два проекционных угла θ_x и θ_y , восстанавливаются в режиме реального времени с помощью программного обеспечения. Алгоритм реконструкции основан на методе гистограммирования в проекционных плоскостях XZ и YZ.

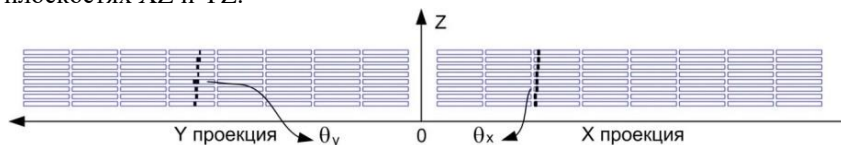


Рис. 2. Отклик супермодуля годоскопа на прохождение одиночного мюона.

Угловые распределения треков, зарегистрированных в течение 1-минутных интервалов, накапливаются в трех типах двоичных массивов-матриц с размерами 90×90 ячеек: $M_a \equiv [\theta_i, \phi_i]$ по зенитным и азимутальным углам, $M_{pa} \equiv [\theta_{xi}, \theta_{yi}]$ по проекционным углам, $M_{tg} \equiv [tg\theta_{xi}, tg\theta_{yi}]$ по тангенсам проекционных углов. Каждая матрица представляет собой угловое распределение мюонов, измеренное в течение 1-минутного интервала. На рис. 3 (слева) приведено графическое представление (мюонография) матрицы изменений в единицах статистических погрешностей углового распределения событий за последний час экспозиции МГ УРАГАН (текущая матрица) по отношению к нормировочной матрице, полученной по данным за предшествующие 24 часа. Статистическая обеспеченность матрицы $\sim 5 \times 10^6$ событий. Тонкими линиями указаны направления север-юг и запад-восток; кругами выделены зенитные углы 30° , 45° , 60° и 75° . Шкала показывает масштаб отклонений от среднего в сигмах. Дополнительно для каждой матрицы выводится служебная информация:

номера SM, по которым суммируются матрицы, начало и конец кадра, среднее атмосферное давление в анализируемый интервал времени.

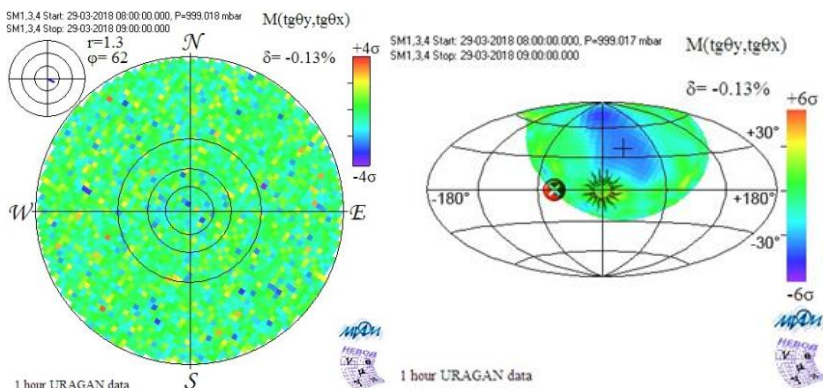


Рис. 3. Мюнография 60-минутной матрицы по тангенсам проекционных углов в лабораторной системе координат (слева) и в GSE-системе (справа)

Для преобразования мюнографий потока мюонов на уровне наблюдений в угловое распределение родительских протонов на границе магнитопаузы разработана процедура трансформации матриц вариаций углового распределения мюонов из лабораторной системы координат, наблюдаемого на уровне детектора, на границу магнитопаузы в систему координат GSE (рис. 3, справа). При этом предполагается, что мюоны сохраняют направления родивших их космических лучей. С этой целью для каждой угловой ячейки матрицы были рассчитаны асимптотические направления частиц с учетом средней пороговой энергии (~ 0.3 ГэВ) и направлений треков мюонов в детекторе и энергий протонов в зоне генерации.

Мюонный годоскоп УРАГАН позволяет регистрировать одновременно мюоны, приходящие с любого направления верхней полусферы в пределах его апертуры. Это позволяет изучать угловые вариации потока мюонов в режиме реального времени с помощью одного детектора. Локальная анизотропия углового распределения потока мюонов может быть описана с помощью вектора $\vec{A}$, который представляет собой сумму единичных векторов реконструированных треков отдельных мюонов, нормированную на их число, и указывает среднее направление прихода мюонов за выбранный промежуток времени.

В работе приводится анализ данных мюонного годоскопа УРАГАН с 2007 по 2017 год. На рис. 4 представлены суточные изменения

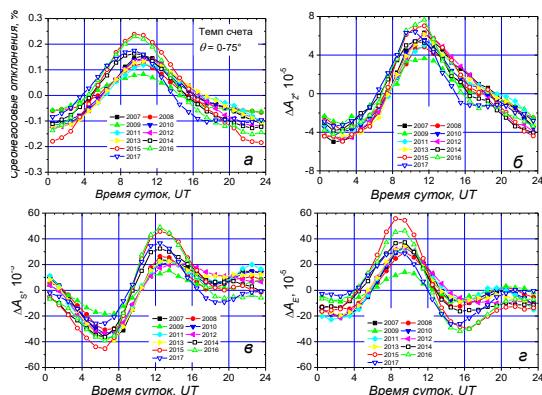


Рис. 4. Среднегодовые отклонения темпа счета и проекций вектора локальной анизотропии в течение суток для 2007–2017 гг.: а – темп счета; б – A_z ; в – A_s ; г – A_E .

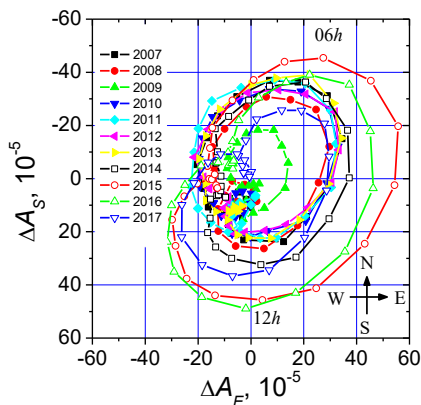


Рис. 5. Корреляции среднегодовых суточных отклонений проекций A_s и A_E вектора локальной анизотропии за 2007–2017 гг.

суточные изменения значений проекций A_s и A_E сильно коррелируют между собой, а кольцообразная форма корреляций стабильна и сохранялась на протяжении 2007–2017 гг. Размах среднегодовых суточных вариаций проекций A_s и A_E в годы повышенной солнечной

проекций вектора локальной анизотропии и темпа счета относительно их средних значений за год. Статистическая погрешность определена на основе годовых данных и находится в пределах размеров указанных на графиках символов. Видно, что суточные изменения темпа счета и A_z подобны и синфазны в отличие от их годовых изменений, а характер суточных изменений проекций вектора $\vec{A}$ (A_E и A_s) сильно отличается от вариаций темпа счета и A_z . Стоит отметить уменьшение магнитуды суточных отклонений в 2009 г., соответствующее минимуму солнечной активности.

На рис. 5 представлены годографы взаимной корреляции между среднегодовыми суточными отклонениями проекций A_s и A_E вектора локальной анизотропии. Видно, что

активности (2012-2016) увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с годами минимума активности (2009).

Направление вектора анизотропии $\vec{A}$ очень близко к вертикали. Поэтому для изучения отклонений от среднего направления удобнее использовать вектор относительной анизотропии $\vec{r}$, который представляет собой разницу между вектором $\vec{A}$ в текущий момент времени и вектором $\vec{A}^N$, вычисленным за длительный промежуток времени: $\vec{r} = \vec{A} - \vec{A}^N$. Для исследования «бокового» воздействия на поток КЛ используется горизонтальная проекция вектора относительной анизотропии, которая вычисляется по формуле: $r_h = \sqrt{r_s^2 + r_e^2}$. Величина параметров относительной анизотропии зависит от состояния окружающего межпланетного пространства и имеет значения $10^{-4} - 10^{-5}$. Поэтому для оценки значимости вариаций горизонтальной проекции вектора относительной анизотропии удобнее использовать значения, деленные на соответствующие величины среднеквадратичного отклонения, т.е. r_s/σ_{rs} , r_e/σ_{re} , r_h/σ_{rh} . В результате проведенного статистического анализа долговременных корреляций были выбраны пороговые значения для поиска отклика, при которых вероятности случайного выброса определенного параметра будут менее 5% вне зависимости от года наблюдения. Порог для $r_s/\sigma_{rs} = \pm 1.97$, для $r_e/\sigma_{re} = \pm 1.83$ и для $r_h/\sigma_{rh} = 4.5$.

В разделе 2 приведено описание отбора корональных выбросов масс для дальнейшего анализа. Приводится описание данных OMNI, используемых для выделения возмущений в околоземном пространстве и магнитосфере Земли, представлена методика выделения геоэффективных и негеоэффективных событий.

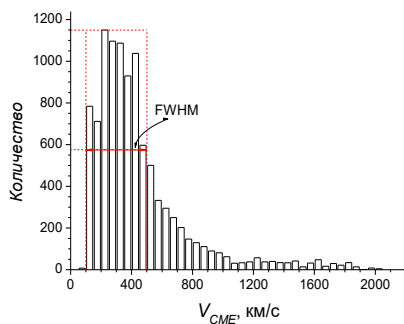


Рис. 6. Распределение средней скорости КВМ.

Для отбора событий была использована информация из базы данных CACTus (Computer Aided CME Tracking software), которая формируется на основе анализа изображений солнечной короны, поступающих с коронографов LASCO (космический аппарат SOHO). На рис. 6 представлено распределение значений средней скорости КВМ, произошедших в период с 2007 по 2017 год, по данным коронографов LASCO. За

данный период времени по данным САСТus произошло более 10 тысяч событий. Для исследования отклика миоонного годоскопа были выбраны 2761 KBM, средняя скорость которых превышает правую границу FWHM распределения скоростей выбросов, т.е. более 500 км/с. Время между двумя последовательными выбросами для 90 % рассматриваемых KBM менее 24 часов. Разделить влияние каждого выброса, произошедшего в течение одних суток, на межпланетное магнитное поле и магнитосферу Земли практически невозможно. Поэтому для исследования таких событий была разработана методика, с помощью которой события, время начала которых отличается менее чем на 12 часов, объединялись в группу и рассматривались как единое событие. Всего для анализа за период 2007 – 2017 гг. было выделено 1234 события.

Одним из наиболее важных вопросов в изучении солнечно-земных связей и космической погоды в целом является вопрос геоэффективности исследуемых событий. Геоэффективные события – события, оказывающие непосредственное влияние на радиационную, геомагнитную и электромагнитную обстановку в околоземном пространстве. Для оценки влияния исследуемых событий на околоземное пространство были выбраны индукция межпланетного магнитного поля (ММП) и скорость солнечного ветра (СВ); для оценки геомагнитной обстановки были выбраны индексы геомагнитной активности Kp и Dst . В результате проведенного статистического анализа этих данных за 2007 – 2017 гг. были определены следующие критерии для идентификации геоэффективности KBM:

$$\langle B_{\Delta t} \rangle > 6.2 \text{ нТл}, \langle V_{sw_{\Delta t}} \rangle > 460 \text{ км/с}, Kp_{\max} \geq 4, Dst_{\min} \leq -30 \text{ нТл}. \quad (1)$$

Оценка геоэффективности корональных выбросов масс проводилась следующим образом. Для всех рассматриваемых событий вычисляются средние значения параметров B , V_{sw} , максимальное значение Kp -индекса и минимальное значение Dst -индекса за определенный промежуток времени. В качестве опорных периодов времени рассматривались промежутки, определенные по средней скорости, за которые KBM (или группа KBM) пройдет расстояния, равные одной, двум и трем астрономическим единицам. Определялся факт возникновения геомагнитного возмущения за эти промежутки времени. В результате проведенного анализа оптимальным промежутком времени был выбран период $\Delta t_{0.5-2a.e.}$, за который KBM может пройти расстояние 2 а.е., при этом из расчета исключаются соответствующие параметры в течение времени, за которое KBM проходит первые 0.5 а.е. На рис. 7 приведён пример трех событий в марте 2013 года. Квадратами отмечены произошедшие KBM, кругами – рассматриваемые события после объединения их в группы. Горизонтальными линиями отмечены

соответствующие значения параметров $\langle V_{sw} \rangle$, $\langle B_t \rangle$, Kp_{max} и Dst_{min} , вычислялись в выбранный промежуток времени после начала КВМ.

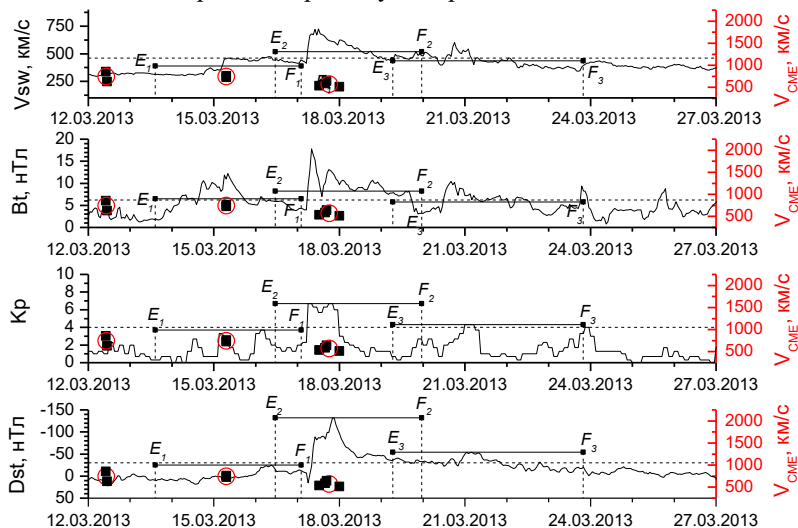


Рис. 7. Изменения параметров межпланетной среды с 12 по 27 марта 2013 года. Сверху вниз: скорости СВ, индукции ММП, Kp - и Dst -индексов. На правой шкале отмечена скорость КВМ.

В таблице 1 представлена классификация групп КВМ в зависимости от рассматриваемых критериев.

Табл. 1. Классификация воздействия КВМ на околоземное пространство

Параметр	Параметры межпланетной среды			Индексы геомагнитной индукции			Тип
	$\langle B_{\Delta t} \rangle > 6.2$ нТл	$\langle V_{sw_{\Delta t}} \rangle > 460$ км/с		$Kp_{max} \geq 4$	$Dst_{min} \leq -30$ нТл		
Удовлетворяет ли критерию?	Да	и	Да	Да	и/или	Да	1 тип
	Да	или	Да	Да	и/или	Да	2 тип
	Нет	Нет		Да	и/или	Да	3 тип
	Любой один из критериев выполняется						4 тип
	Нет	Нет		Нет	Нет		5 тип

События 1-го и 2-го типов были классифицированы как геоэффективные, события 4-го и 5-го типов как негеоэффективные. Для событий 3-го типа не все так однозначно, поэтому был введен дополнительный критерий, а именно, чтобы максимальные значения параметров B_t и V_{sw} были больше указанных границ. В результате

события 3 типа были разделены на геоэффективные и негеоэффективные. В таблице 2 представлены полученные результаты.

Табл. 2. Статистика геоэффективных и негеоэффективных событий с 2007 по 2017 гг.

Годы	Геоэффективные события					Негеоэффективные события					Всего шт.
	1 тип	2 тип	3 тип а	Всего		3 тип б	4 тип	5 тип	Всего		
				шт.	%				шт.	%	
2007	1	12	3	16	34	1	9	21	31	66	47
2008	2	8	3	13	30	1	8	22	31	70	44
2009	0	4	2	6	13	2	0	37	39	87	45
2010	0	6	6	12	19	6	6	40	52	81	64
2011	6	34	19	59	38	13	21	64	98	62	157
2012	14	49	19	82	42	30	13	68	111	58	193
2013	10	43	22	75	43	16	6	79	101	57	176
2014	18	43	11	72	39	14	24	75	113	61	185
2015	26	75	12	113	68	8	22	23	53	32	166
2016	16	36	7	59	58	6	15	22	43	42	102
2017	7	23	6	36	65	1	3	15	19	35	55
Всего	100	333	110	543	44	98	127	466	691	56	1234

В разделе 3 приведен сравнительный и корреляционный анализ данных о локальной анизотропии потока мюонов, регистрируемых мюонным годоскопом УРАГАН, с различными параметрами межпланетной среды. Рассмотрены отдельные события, поведение углового распределения потока мюонов во время геоэффективных и негеоэффективных корональных выбросов масс. Приводится описание метода оценки вероятности возникновения геомагнитных возмущений по динамике изменения параметров локальной анизотропии космических лучей.

На рис. 8 представлены корреляции между среднемесячными значениями проекции вектора относительной анизотропии на горизонтальную плоскость r_h и индукцией межпланетного магнитного поля и скоростью СВ. Из рисунка видно, что между r_h и B_t наблюдается хорошая корреляция (коэффициент корреляции ≈ 0.80), что свидетельствует о прямой связи данных параметров. Между среднемесячными значениями r_h и V_{sw} корреляции хуже ($R \approx 0.33$). Прямых корреляций между параметрами r_s и r_E не наблюдается, однако наблюдаются хорошие корреляции между среднеквадратичными месячными отклонениями данных параметров. На рис. 9 представлены соответствующие корреляции со средними значениями индукции B_t межпланетного магнитного поля (коэффициенты корреляции $R \approx 0.81$ и 0.82).

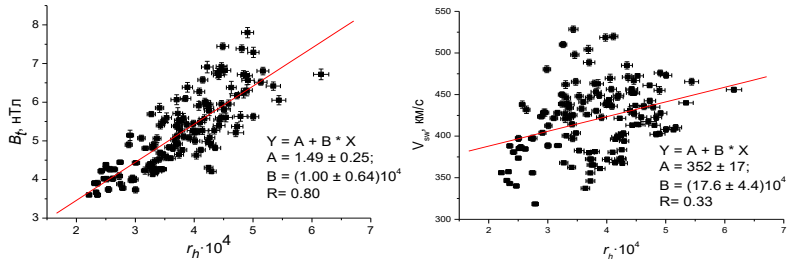


Рис. 8. Корреляционная зависимость среднемесячных значений индукции МПП (слева) и скорости СВ (справа) со среднемесячными значениями параметрами r_h за 2007-2017 гг.

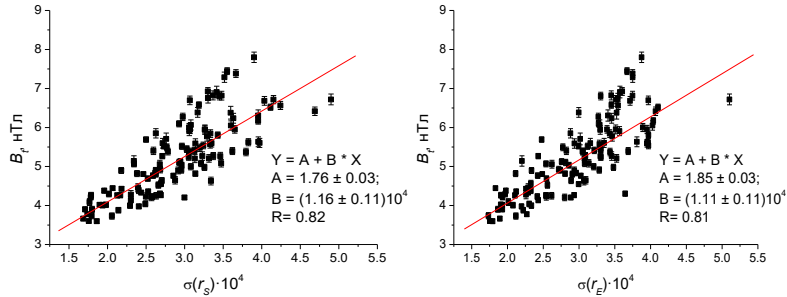


Рис. 9. Корреляционные зависимости среднемесячных значений индукции МПП со среднемесячными значениями параметров $\sigma(r_s)$ и $\sigma(r_E)$ за 2007-2017 гг.

Таким образом, исходя из результатов корреляционного анализа, был сделан вывод, что рассматриваемые параметры локальной анизотропии потока мюонов могут использоваться как предикторы геоэффективных событий, связанных с распространением КВМ.

Мюонный годоскоп УРАГАН был введен в режим экспозиции в период пониженной активности в конце 23-го солнечного цикла. Период с 2008 по 2010 годы уникален с точки зрения рассмотрения событий разного класса, поскольку в этот период можно было наблюдать достаточное количество так называемых «чистых» событий, которые не пересекались с другими крупномасштабными процессами в межпланетном пространстве.

На рис. 10 приведены данные о КВМ, который произошёл в 00:48 7 марта 2008 года, средняя скорость составила ≈ 766 км/с. Период времени $\Delta t_{0.5-2a.e.}$ начинается 8 марта в 3:55 UT и заканчивается 11 марта в 13:17 UT. На рисунке представлены изменения параметров B_t , V_{sw} , Kp и Dst согласно базе данных OMNI (слева) и параметры локальной анизотропии r_s/σ_{r_s} , r_E/σ_{r_E} , r_h/σ_{r_h} (справа). Горизонтальными линиями отмечены

соответствующие средние и максимальные (минимальные) значения для заданных критериев (1). Данное событие было классифицировано как геоэффективное. Из рисунка видно, что в первую очередь реагируют проекции вектора относительной анизотропии на юг и на восток. Первое превышение пороговых значений наблюдается 8 марта в 08:00 для r_E/σ_{rE} , и в 12:00 для r_S/σ_{rS} . Необходимо отметить, что вариации r_S/σ_{rS} усиливаются как в южном (положительные значения), так и в северном (отрицательные значения) направлении, а параметр r_E/σ_{rE} – только в восточном направлении. Максимальное значение $r_h/\sigma_{rh} = 8.1$ достигнуто в 05:00 9 марта, следующий пик возникает в 23:00, последний пик – 10 марта в 12:00 имеет значение, равное ≈ 5.0 .

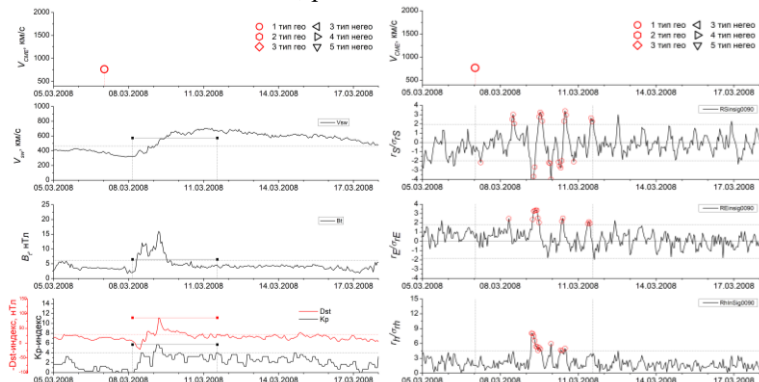


Рис. 10. Данные OMNI и МГ УРАКАН в период с 5 по 19 марта 2008 года.

На рис. 11 приведены мюнограммы в географической и GSE системах в момент появления отклика в параметре r_h . В данный момент времени наблюдается максимальный уровень анизотропии.

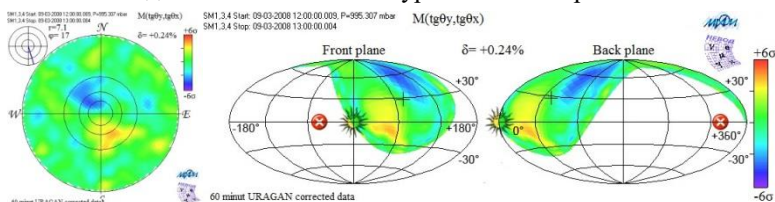


Рис. 11. Мюнограммы в лабораторной и GSE системах координат для КВМ 7 марта 2008 года (мюнограммы показаны для момента времени 09.03.2008 12:00).

Для анализа динамики областей анизотропии КЛ, проявляющихся на мюнограммах, разработан метод, позволяющий выделять зоны повышения/понижения интенсивности КЛ, что позволяет изучать деформации углового распределения. В результате выделяется угловой

размер областей (в стерadians) и уровень вариаций интенсивности δI относительно усреднённого по области значения (в σ). Для данного события такая последовательность приведена на рис. 12 сверху, а снизу приведено изменение Kp-индекса. При углах $0^\circ - 90^\circ$ наблюдается характерное увеличение интенсивности на $+4\sigma - +5\sigma$, при этом в угловом диапазоне более 90° наблюдается понижение до $-3\sigma - -5\sigma$, причем такое понижение коррелирует с увеличением геомагнитного возмущения. После 13 марта наблюдается распределение «пятен», характерное для периода, когда выбросы отсутствуют.

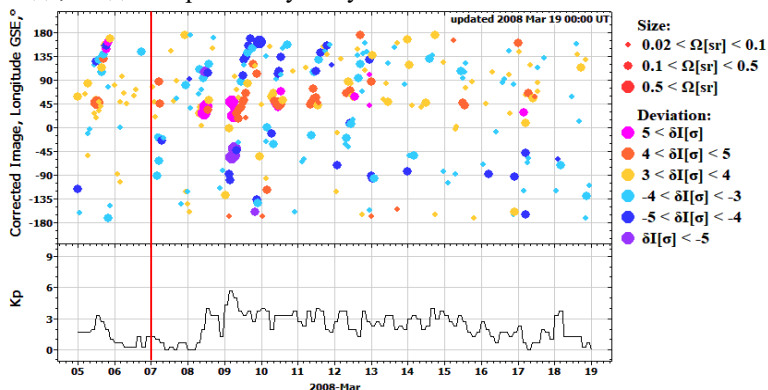


Рис. 12. Последовательность деформаций углового распределения для мюнографий в GSE-системе в период с 7 по 20 марта 2008 года (вертикальной линией отмечено время начала KBM).

В периоды максимума солнечной активности с 2012 по 2015 гг. наблюдаются достаточно длительные промежутки времени, когда присутствуют области, в которых доминируют либо геоэффективные, либо негеоэффективные события. На рис. 13 приведен пример периода с 1 августа по 15 сентября 2015, в который наблюдались геоэффективные выбросы. Из рисунка видно, что для геоэффективных событий характерна анизотропия в восточном направлении (для параметра r_E преобладают положительные превышения установленного порога), отклик длительностью более 3 часов параметра r_h наблюдается 07.08.2015, с 23.08.2015 по 27.08.2015 и 07.09.2015, отклик длительностью 1 – 2 часа наблюдается 11.08.2015, 31.08.2015, 01.09.2015 и 04.09.2015. На рис. 14 представлены временные распределения соответствующих зон деформации углового распределения для этого периода времени. На основе анализа последовательностей было получено, что для геоэффективной серии событий наблюдается характерное увеличение вариаций космических лучей по направлению на

Солнце в угловом диапазоне $+0^\circ - +90^\circ$. На средней долготе $-45^\circ - -90^\circ$ периоды времени, когда присутствует геомагнитное возмущение ($Kp \geq 4$), доминируют области пониженного потока космических лучей, причем в моменты максимумов наблюдаются вариации более $\pm 5\sigma$ по всем угловым ячейкам мюнографий в GSE системе. Для негеоэффективных событий наблюдаются более слабые деформации углового распределения, характерные в основном для спокойных периодов времени.

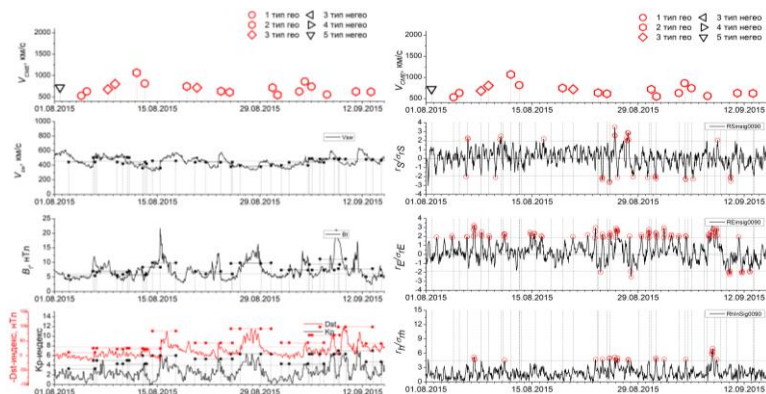


Рис. 13. Данные OMNI и МГ УРАГАН в период с 1 августа по 15 сентября 2015.

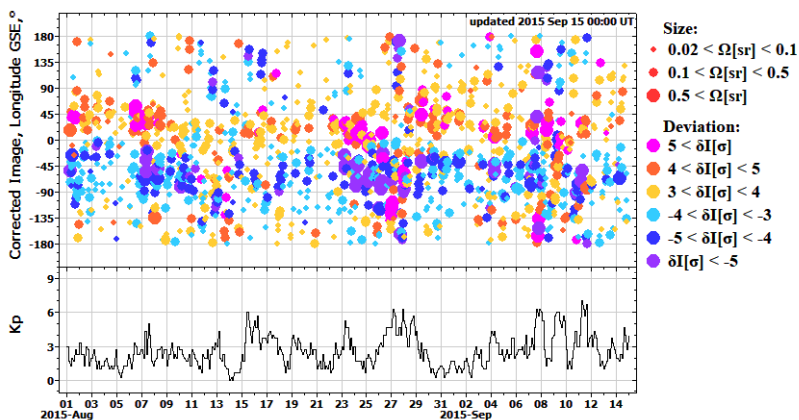


Рис. 14. Последовательность деформаций углового распределения для мюнографий в GSE-системе в период с 1 августа по 15 сентября 2015.

Для всех отобранных 1234 событий был проанализирован отклик мюонного годоскопа. Обязательным условием отбора был выход

значений параметра r_h/σ_{rh} за пределы установленного порога в промежутки времени $\Delta t_{2a.e.}$. В итоге было получено, что в 73% случаев (395 событий из 543) наблюдается отклик длительностью ≥ 1 часа для геоэффективных групп КВМ и в 53% случаев (289 событий из 543) – длительностью более 3 часов. Для негеоэффективных событий отклик МГ УРАГАН наблюдается в 51% случаев (350 событий из 691) длительностью ≥ 1 часа и в 26% случаев (182 событий из 691) отклик ≥ 3 часов.

Для разработки метода оценки вероятности возникновения геоэффективных возмущений в магнитосфере Земли были изучены параметры локальной анизотропии с 2007 по 2013 гг. в 5-суточных интервалах, которые с гарантией превышают время прохождения КВМ от Солнца к Земле (1 – 3 суток). Интервалы выбраны таким образом, что в первые четверо суток не наблюдается возмущений, а в последние сутки

присутствует геомагнитное возмущение с $Kp \geq 4$. В результате было получено 130 интервалов времени, для которых был проведён анализ параметров r_h , r_s , r_E , а также их среднеквадратичных отклонений $\sigma_{r_{S24}}$, $\sigma_{r_{E24}}$, $\sigma_{r_{h24}}$ за предыдущие сутки, включая текущий час мониторинга. На рис. 15 приведен пример поведения данных параметров для геомагнитной бури 10 сентября 2011 года.

В результате проведенного анализа получено, что $\sigma_{r_{S24}}$, $\sigma_{r_{E24}}$, $\sigma_{r_{h24}}$ наилучшим способом подходят для прогнозирования геомагнитных возмущений. В качестве предиктора выбран параметр $\Delta\sigma_{i24}$ (i – соответствует индексам

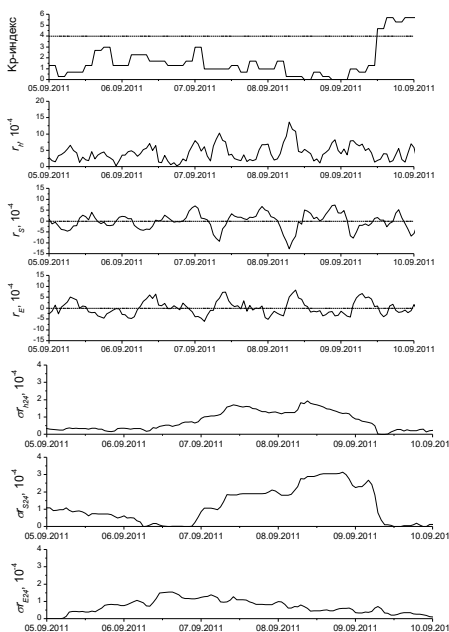


Рис. 15. Отклик на магнитную бурю

проекции r_s , r_E , r_h), который показывает разницу между значением в конце окна σ_{i24} (текущее значение) и минимальным значением $\min_{48}(\sigma_{i24})$ (во всем окне). Если значение параметров больше определенной пороговой величины, то предиктор срабатывает. В

результате формируются таблицы соответствия значений производных величин $\Delta\sigma_{S24}$, $\Delta\sigma_{E24}$, $\Delta\sigma_{h24}$ и вероятностей наблюдения геомагнитного возмущения с определенным Kp . С помощью такой таблицы в каждый момент времени формируются оценки вероятности наблюдения возмущения с $Kp \geq 4$ в трёх временных интервалах после текущего часа: за сутки, двое, трое. Затем на основе этих временных рядов оценок вероятностей для каждого момента времени и рассматриваемого интервала формируется ряд из максимальных значений вероятности, приведённый на рис. 16 и формируется пролонгированный ряд, который выводится на web-сайт в режиме онлайн.

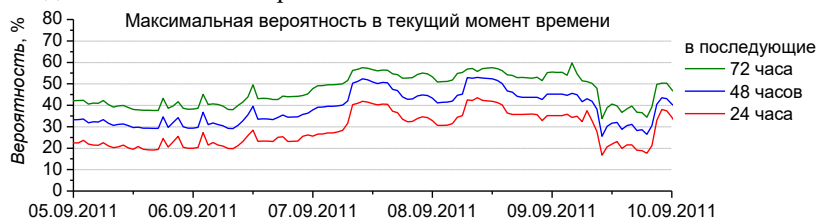


Рис. 16. Временные ряды максимальной оценки вероятностей наблюдения геомагнитного возмущения.

Апробация разработанного метода прогнозирования геомагнитных возмущений осуществлялась на основе анализа данных в период с 2014 по 2017 гг. На рис. 17 приведены распределения максимальной вероятности во временном интервале 0 - 72 часа перед магнитными бурями с $Kp \geq 5$ и $Kp \geq 6$. Из 265 геомагнитных возмущений с $Kp \geq 5$ отобрано 114 событий и с $Kp \geq 6$ отобрано 35 событий. Из распределений следует, что в трехсуточном интервале до начала возмущений максимальная вероятность в среднем составила $\sim 60\%$ для бурь с $Kp \geq 5$ и $\sim 64\%$ для бурь $Kp \geq 6$.

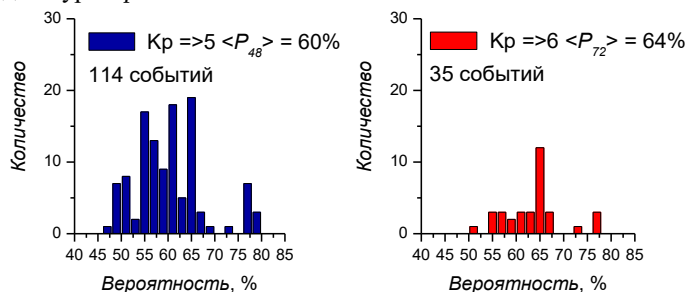


Рис. 17. Распределение максимальной вероятности для геомагнитных событий с $Kp \geq 5$ и $Kp \geq 6$ в 2014 – 2017 гг.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. На основе проведенных исследований долговременных пространственно-угловых вариаций потока мюонов космических лучей, зарегистрированных мюонным годоскопом УРАГАН на поверхности Земли за 11-летний период работы установки с 2007 по 2017 гг., показано, что:

- в годы максимума солнечной активности суточные вариации локальной анизотропии потока мюонов космических лучей увеличиваются более чем в 2 раза по сравнению с периодом минимума активности Солнца;
- корреляции среднегодовых суточных отклонений проекций вектора локальной анизотропии A_S и A_E имеют циклическую форму, при этом максимум отклонений соответствует северо-восточному направлению в околополуденные часы;
- для выбранных пороговых значений проекций вектора относительной локальной анизотропии $r_h/\sigma_{r_h} = 4.5$, $r_S/\sigma_{r_S} = \pm 1.97$ и $r_E/\sigma_{r_E} = \pm 1.87$ вероятность случайного выброса значений этих проекций составляет менее 5% вне зависимости от года наблюдения.

2. Осуществлён анализ и систематизация данных для корональных выбросов массы с использованием базы данных CACTus за 2007 – 2017 гг. со средней скоростью выбросов более 500 км/с, в результате которого:

- разработана методика объединения КВМ, у которых время вылета отличается менее чем на 12 часов, что позволило уменьшить рассматриваемую статистику с 2761 до 1234 событий;
- разработан способ определения геоэффективности событий на основе анализа базы данных OMNI о состоянии околоземного пространства и магнитосферы Земли в промежутке времени, определённом по средней скорости групп КВМ, за который ими может быть пройдено расстояние от 0.5 до 2 астрономических единиц после выброса плазмы Солнцем, в результате чего 691 событие было классифицировано как негеоэффективное, а 543 события как геоэффективные.

3. В результате сопоставления параметров локальной анизотропии потока мюонов с уровнем солнечной активности выявлены корреляции между горизонтальной проекцией вектора относительной анизотропии r_h и индукцией магнитного поля B_t (коэффициент корреляции ~ 0.80), а также с K_p и Dst -индексами (коэффициенты корреляции ~ 0.66 и ~ 0.49 соответственно). Кроме того, выявлены корреляции между среднеквадратичными суточными отклонениями $\sigma_{r_{S24}}$ и $\sigma_{r_{E24}}$ и индукцией

магнитного поля B_z (коэффициенты корреляции ~ 0.82 и ~ 0.81 соответственно).

4. Проведен анализ вариаций пространственно-углового распределения мюонов космических лучей во время геоэффективных и негеоэффективных корональных выбросов масс методом мюонной диагностики гелиосферных возмущений с помощью последовательностей мюонографий в GSE-системе (патент РФ на изобретение № 2446495), при этом:

- показано, что во время геоэффективных событий наблюдается повышение интенсивности потока частиц более чем на $+3\sigma$ с угловым размером ячеек более 0.5 стерадиан с направления на Солнце на долготах $0^\circ - 45^\circ$, при этом на долготах $0^\circ - -90^\circ$ наблюдается уменьшение потока частиц более чем на 3σ ; для негеоэффективных событий таких вариаций, как правило, не наблюдается;
- получено, что отклик мюонного годоскопа УРАГАН длительностью более одного часа, определенный по значениям проекций вектора относительной анизотропии, наблюдается для геоэффективных событий в 73 % случаев, а для негеоэффективных в 51 % случаев; для откликов длительностью более 3 часов – соответственно в 53 % и 26 % случаев.

5. Разработан метод заблаговременного обнаружения геоэффективных событий (геомагнитных возмущений) по изменениям локальной анизотропии потока мюонов, с применением которого:

- показано на основе данных за 2007 – 2013 гг., что для прогноза геомагнитных возмущений в качестве предикторов наиболее подходящими параметрами являются среднеквадратичные отклонения $\sigma_{I_{h24}}$, $\sigma_{I_{S24}}$, $\sigma_{I_{E24}}$;
- получены зависимости оценок вероятностей возникновения магнитных возмущений от значений рассматриваемых критериев;
- осуществлена апробация метода на данных 2014-2017 гг. и получено, что оценка вероятности наблюдения во временном интервале 0-72 часа до начала магнитного возмущения составила $\sim 60\%$ для бурь с $Kp \geq 5$ и $\sim 64\%$ для бурь с $Kp \geq 6$;
- создана web-страница онлайн-мониторинга геомагнитных возмущений на предстоящие временные интервалы длительностью 24, 48 и 72 часа.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева и др. Анализ анизотропии потока мюонов по данным мюонного годоскопа УРАГАН во время гелиосферных возмущений. Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77, № 5, с. 593-595. DOI: 10.7868/S0367676513050062.
- [2] И.И. Яшин, Н.В. Ампилогов, И.И. Астапов и др. Мюонная диагностика: современный статус. Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77, № 5, с. 621-624. ISSN: 0367-6765. DOI: 10.7868/S0367676513050542.
- [3] В.В. Шутенко, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина и др. Долговременные вариации углового распределения потока мюонов. Геомагнетизм и аэрномия. 2013. Т. 53, № 5, с. 611-619. DOI: 10.7868/S0016794013050155
- [4] I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.N. Dmitrieva et al. Study of heliospheric disturbances on the basis of cosmic ray muon flux anisotropy. Journal of Physics: Conference Series. 2013. V. 409, 012196, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012196.
- [5] I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.N. Dmitrieva et al.. Local anisotropy of muon flux - the basis of the method of muon diagnostics of extra-terrestrial space. Advances in Space Research. 2015. V. 56, issue 12, p. 2713–2718. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.039.
- [6] I.I. Yashin, I.I. Astapov, N.S. Barbashina et al. Real-time data of muon hodoscope URAGAN. Advances in Space Research. 2015. V.56, issue 12, p. 2693–2705. doi:10.1016/j.asr.2015.06.003
- [7] N.S. Barbashina, I.I. Astapov, N.V. Osetrova et al. Non-geoeffective interplanetary distrurbances observed by muon hodoscope URAGAN. Proceedings of Science. V. 30, article number 134. 34th ICRC 2015; Code 123460
- [8] I.I. Astapov, N.S. Barbashina, A.A. Petrukhin et al. Powerful non-geoeffective interplanetary disturbance of July 2012 observed by muon hodoscope URAGAN. Advances in Space Research. 2015. Volume 56, Issue 12, Pages 2833–2838. DOI:10.1016/j.asr.2015.03.002
- [9] V.V. Shutenko, I.I. Astapov, N.S. Barbashina et al. Search of predictors of geoeffective heliospheric events by means of muon hodoscope URAGAN. Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 675, 032033, 4 p. doi:10.1088/1742-6596/675/3/032033
- [10] И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, В.В. Борог и др. Исследование геоэффективных и негеоэффективных КВМ по данным МГ УРАГАН. Известия РАН. Серия физическая. 2017, Т. 81, № 2, с. 202–205. DOI: 10.7868/S0367676517020041.

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

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