

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
«ЯКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И
АЭРОНОМИИ ИМ. Ю.Г. ШАФЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Петухова Анастасия Станиславовна

Модель формирования Форбуш понижения
в электромагнитном поле
магнитного облака

Специальность 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Якутск – 2021

Работа выполнена в Институте космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИКФИА СО РАН).

Научный

руководитель

Петухов Станислав Иванович

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории теории космической плазмы Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные

оппоненты

Струминский Алексей Борисович

доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук

Калегаев Владимир Владимирович

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией космофизических исследований Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

Абунин Артем Анатольевич

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук

Защита состоится «6» апреля 2022 г. в 15 час 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.01 Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: <https://ds.mephi.ru> федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 года.

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



Сергей Евгеньевич Улин

Актуальность

Корональные выбросы массы сильно воздействуют на свойства плазмы солнечного ветра, геомагнитную активность и пространственное распределение космических лучей. Способность откликаться на изменения свойств солнечного ветра делает космические лучи уникальным инструментом для идентификации и определения свойств крупномасштабных структур. Мониторинг космических лучей наземными мировыми сетями нейтронных мониторов и мюонных телескопов позволяет использовать измерения для исследования свойств солнечной активности. Важной практической задачей солнечно-земной физики является корректное восстановление информации о межпланетных возмущениях по данным о космических лучах. Наличие теоретической модели, устанавливающей связь между свойствами магнитных облаков и характеристиками космических лучей, позволит расширить методы прогноза космической погоды.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является исследование формирования спорадических Форбуш понижений в магнитных облаках и установление связи между свойствами магнитных облаков и характеристиками космических лучей. Для достижения обозначенной цели работы были решены следующие задачи:

1. Разработка модели движущейся в межпланетной среде крупномасштабной петли с винтовым магнитным полем, представляющей магнитное облако.
2. Разработка метода решения бесстолкновительного уравнения Больцмана и проведение расчета функции распределения галактических космических лучей.
3. Исследование зависимости характеристик Форбуш понижения от величин параметров и типа магнитного облака.
4. Расчет спектра Форбуш понижения в зависимости от жесткости для набора величин параметров магнитного облака.

5. Определение соответствия разработанной модели и реальных Форбуш понижений в магнитных облаках посредством сопоставления результатов расчета и измерений.

Научная новизна

Предложен новый механизм формирования Форбуш понижения в движущемся магнитном облаке, в котором функция распределения космических лучей определяется потерями энергии в индукционном электрическом поле и квазизахватом в винтовом магнитном поле.

Разработан метод расчета функции распределения космических лучей, основанный на решении бесстолкновительного уравнения Больцмана с использованием обратных траекторий частиц.

Получены соотношения между функцией распределения космических лучей и её тремя моментами, используемыми при сопоставлении результатов расчета и измерений.

Установлено, что амплитуда, компоненты векторной и тензорной анизотропий Форбуш понижения зависят от: 1) величины напряженности винтового магнитного поля и его состояния в большом объеме, скорости и градиента скорости движения магнитного облака, его типа; 2) величины площади поперечного сечения и углового размера облака; 3) ракурсных условий.

Научная и практическая значимость работы

- 1) Разработанная модель позволяет изучать формирование Форбуш понижения и определять зависимость характеристик Форбуш понижения от значений параметров магнитных облаков.
- 2) Установленные зависимости позволяют определять свойства магнитных облаков посредством наземных измерений космических лучей и разрабатывать методы прогноза состояния космической погоды.

Полученные результаты могут быть рекомендованы к применению: 1) в области физики космических лучей и солнечно-земных связей; 2) в исследовании влияния космической погоды на жизнедеятельность человека с целью снижения

рисков возникновения катастрофических явлений, в том числе в медицинской сфере; 3) в научно-методической работе со студентами ВУЗов старших курсов соответствующих специальностей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методы, разработанные для исследования Форбуш понижения в магнитном облаке: 1) модель крупномасштабной петли с винтовым магнитным полем, представляющей движущееся в межпланетном пространстве магнитное облако; 2) метод расчета функции распределения космических лучей, основанного на решении бесстолкновительного уравнения Больцмана с использованием обратных траекторий частиц; 3) метод получения соотношений между функцией распределения космических лучей и её тремя моментами, используемыми при сопоставлении результатов расчета и измерений.
2. Механизм формирования Форбуш понижения в магнитном облаке. Модель формирования Форбуш понижения в магнитном облаке, основанную на новом механизме.
3. Результаты расчета характеристик Форбуш понижения в магнитном облаке.
4. Результаты расчета спектра Форбуш понижения в зависимости от жесткости.
5. Результаты сопоставления рассчитанных характеристик Форбуш понижения с измерениями.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечена тем, что для расчета характеристик космических лучей используются известные физические закономерности, общепринятые представления и методы. Зависимость характеристик космических лучей от свойств электромагнитного поля магнитного облака определяется решением бесстолкновительного кинетического уравнения Больцмана. Возможность пренебрежения рассеяниями космических лучей подтверждается низким уровнем турбулентности магнитного поля в магнитном облаке, установленным прямыми измерениями. Разработан метод решения уравнения

Больцмана, основанного на сохранении функции распределения космических лучей вдоль их траекторий. Сохранение функции распределения является следствием уравнения Больцмана. При расчете используется эквивалентность прямых и обратных траекторий заряженных частиц в электромагнитном поле. При расчете траекторий используется стандартный численный метод Рунге-Кутты 4-го порядка точности. Для сопоставления результатов расчета и измерений получены соотношения между функцией распределения и плотностью, векторной и тензорной анизотропиями космических лучей. Достоверность подтверждается соответствием рассчитанных характеристик космических лучей в магнитном облаке с измерениями, при этом в модели отсутствуют свободные параметры.

Личный вклад автора

1. Автор внес определяющий вклад в установление механизма изменения интенсивности галактических космических лучей в магнитном облаке и его проявлении в наблюдениях наземными детекторами.
2. Автор самостоятельно провел анализ экспериментального материала: поиск событий Форбуш понижений, анализ параметров межпланетной среды в эти периоды, подбор параметров смоделированных магнитных облаков.
3. Автор внес определяющий вклад в написание комплекса программ для моделирования, расчета и сопоставления магнитного поля магнитного облака, расчета характеристик Форбуш понижения в магнитном облаке, сопоставления экспериментальных данных и результатов расчета.
4. Автор принимал участие в написании статей и текстов докладов на русском и английском языках, а также их представлении на конференциях.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

«5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics» (2020, Москва, Россия);

«36 Всероссийская конференция по космическим лучам» (2020, Дубна, Россия);
 «IX Международная конференция по математическому моделированию» (2020, Якутск, Россия);
 «X Юбилейная международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений»» (2019, Паратунка, Россия);
 «16-ая конференция Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике» (2019, Иркутск, Россия);
 «Fifteenth European Space Weather Week» (2018, Leuven, Belgium);
 «IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics» (2018, Москва, Россия);
 «15-ая конференция Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике» (2017, Иркутск, Россия);
 «35th International Cosmic Ray Conference» (2017, Busan, Korea);
 «25th European Cosmic Ray Symposium» (2016, Турин, Италия);
 «34-ая Российская конференция по космическим лучам» (2016, Дубна, Россия);
 «13th Russian-Chinese Conference on Space Weather» (2016, Якутск, Россия).

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (105 наименований). Ее объем составляет 111 страниц, включая список литературы, 32 рисунка, 2 таблицы.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследования, аргументирована научная новизна, показана научно-практическая значимость и достоверность полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения и их апробация докладами на ряде конференций и публикациями, а также кратко излагается содержание работы.

В **главе 1** представлен обзор современного состояния исследований характеристик Форбуш понижений. В параграфе 1.1 приводятся установленные

свойства корональных выбросов массы (КВМ) и магнитных облаков (МО). Свойства Форбуш понижений и теоретические модели изложены в 1.2 и 1.3.

При определении свойств КВМ, как правило, привлекают локальные измерения на космических аппаратах. Для этого используют также космические лучи (КЛ). Благодаря высокой подвижности КЛ содержат сведения о крупномасштабных свойствах среды, которых нет в локальных измерениях. Результаты многолетних измерений КЛ наземными детекторами с применением методов их обработки используются для решения научных и прикладных задач в гелиофизике. Для решения этих задач необходимы теоретические исследования зависимости характеристик КЛ от свойств структур солнечного ветра.

В главе 2 изложены методы моделирования и расчета, разработанные и использованные в исследованиях формирования Форбуш понижений (ФП) в МО.

Для задания винтового магнитного поля в МО предполагаем [А4]: а) МО в начальный момент времени представляет тор, расположенный вблизи Солнца; б) магнитное поле в торе описывается решением Миллера-Тернера для бессилового поля [1, А6]. Движение МО в межпланетном пространстве в магнитогидродинамическом приближении описывается уравнением движения $\rho d\vec{u}/dt = -\nabla P + \vec{j} \times \vec{B}/c$. Поскольку движение МО сверхзвуковое ($u^2 \gg c_s^2$) и магнитное поле квазибессилое ($\vec{j} \times \vec{B} \ll 1$) из уравнения движения следует $d\vec{u}/dt \simeq 0$, что обозначает инерциальное движение. Здесь $c_s = \sqrt{\gamma P/\rho}$ – скорость звука; u , c – скорость движения плазмы и света; P – тепловое давление; ρ – плотность вещества; $\vec{B}$ – напряженность магнитного поля; $\vec{j}$ – электрический ток; γ – показатель политропы.

Представляем начальный тор в виде множества элементарных объемов, скорости которых не меняются при движении и зависят линейно от расстояния до центра Солнца. Выбираем геометрические параметры тора (радиусы, площади поперечного сечения и направляющей окружности), расстояние между центрами

Солнца и тора, скорость и градиент скорости движения, расположение плоскости направляющей окружности относительно плоскости солнечного экватора, напряженность тороидального магнитного поля и его накрутку (всего 4 варианта). Принятых предположений достаточно для определения формы МО в произвольный момент времени. Магнитное поле в движущемся МО определяется условием вмороженности, которое представляет сохранение магнитного потока через площадки, связанные с элементарными объемами.

В модели принято, что за пределами МО находится паркеровский солнечный ветер, который не взаимодействует с МО. Геометрия силовых линий в движущемся МО изображена на рисунках 1а, 1б. Рисунок 1а представляет для трех моментов времени проекцию одной силовой линии на плоскость XOY гелиоцентрической декартовой системы координат. Рисунок 1б представляет аналогичную проекцию трех силовых линий, расположенных на разных расстояниях от поверхности МО, для одного момента времени. Радиус направляющей окружности первоначального тора располагается в плоскости XOY .

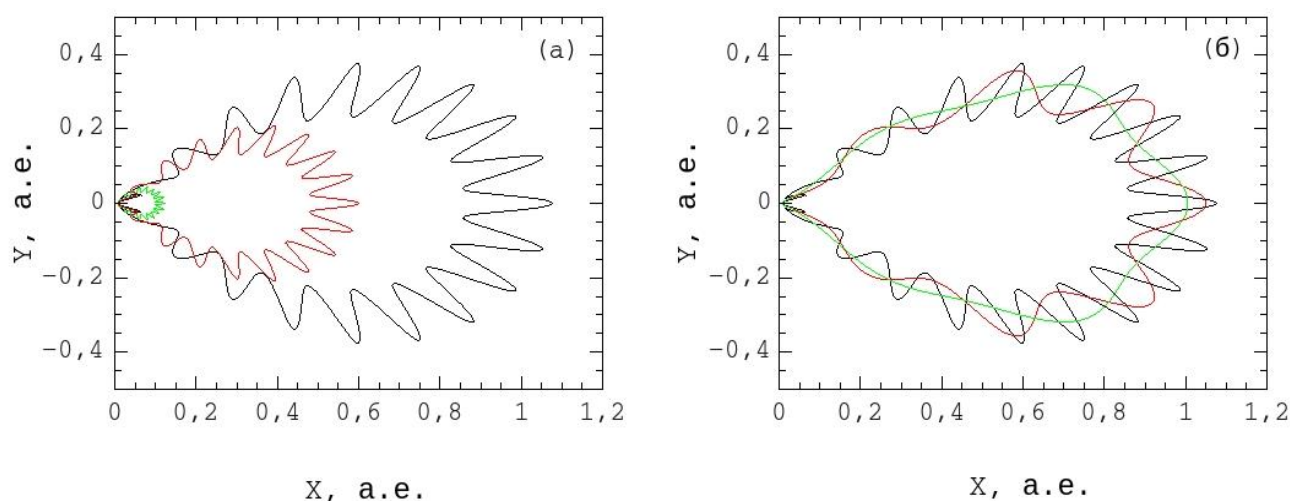


Рис. 1. Проекции магнитных силовых линий на плоскость XOY гелиоцентрической декартовой системы координат. а) одна силовая линия для трех моментов времени; б) три силовые линии магнитного поля, расположенных на разных расстояниях от поверхности МО, в один момент времени. Радиус направляющей окружности лежит в плоскости XOY

Получаемая таким образом геометрия магнитного поля соответствует модели винтового поля МО [2]. Представленная динамическая модель МО и его винтового поля имеет ограниченную область применения. Мы используем модель для расчета характеристик ФП, главным образом, на орбите Земли.

Уравнение непрерывности плотности функции распределения частиц $f(\vec{r}, \vec{p}, t)$ в фазовом пространстве $(\vec{r}, \vec{p})$ в случае непрерывного изменения параметров имеет вид

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \left(f \frac{d\vec{r}}{dt} \right) + \frac{\partial}{\partial \vec{p}} \left(f \frac{d\vec{p}}{dt} \right) = 0,$$

где $\vec{r}$, $\vec{p}$ – радиус вектор и импульс частиц являются независимыми переменными. С учетом силы Лоренца для релятивистских частиц в электромагнитном поле $\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}/c)$ и тождества $\partial/\partial \vec{p} (\vec{p} \times \vec{B}/\sqrt{1 + (p/mc)^2}) = -\vec{p} (\vec{p} \times \vec{B})/(1 + (p/mc)^2)^{3/2} = 0$ уравнение можно записать в двух формах

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{d\vec{r}}{dt} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + \frac{d\vec{p}}{dt} \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} \equiv \frac{df}{dt} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}/c) \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = 0$$

В дальнейшем изложении плотность функции распределения будем называть функцией распределения. Первая форма есть равная нулю полная производная вдоль характеристики уравнения. Вторая форма совпадает с кинетическим уравнением Больцмана без учета рассеяния частиц. Отсюда следует, что решение бесстолкновительного уравнения Больцмана эквивалентно сохранению функции распределения вдоль характеристик, являющихся траекториями частиц.

При расчете функции распределения в МО рассеянием КЛ пренебрегаем. Возможность пренебрежения подтверждается низким уровнем турбулентности магнитного поля в МО, установленным прямыми измерениями (см., например [3]).

Функция распределения в произвольной точке пространства представляет набор траекторий КЛ, заполняющих все направления движения. Для определения траекторий численно решается система уравнений движения релятивистских частиц

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}/c), \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \vec{p} = \Gamma m \vec{v}, \vec{v}/c = \frac{\vec{p}/mc}{\sqrt{1+(p/mc)^2}}, \vec{E} = -\vec{u} \times \vec{B}/c.$$

Здесь e , m – элементарный заряд и масса частицы; $\vec{u}$, $\vec{v}$, c – скорости движения среды, частицы и света; $\Gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ – лоренц-фактор; $\vec{E}$, $\vec{B}$ – напряженности электрического и магнитного полей. Траектории движения частиц бывают прямые и обратные [4]. Реализовать предложенный метод решения уравнения Больцмана можно только с использованием обратных траекторий.

В теории рассчитывают функцию распределения КЛ. Из результатов измерений определяют плотность числа КЛ, а также одно- и двунаправленную анизотропии. Для сопоставления результатов расчета и измерений получены соотношения, связывающие функцию распределения с тремя ее моментами [A5]. Нулевой момент — плотность числа КЛ — $f_0 = \int f d\Omega/4\pi$, где $d\Omega$ – дифференциал телесного угла. Первый момент – однонаправленная (векторная) анизотропия $\vec{A} = -(\vec{b}/f_0)$, где $\vec{b}/f_0 = (f_{\max} - f_{\min})/(f_{\max} + f_{\min})$, $f_{\max}, f_{\min}$ – максимальное и минимальное значения функции распределения в зависимости от угла. Второй момент – двунаправленная (тензорная) анизотропия, которую можно представить в виде эллипсоида. Форму эллипсоида определяют отношения собственных чисел, а его ориентацию в пространстве задают собственные вектора. Собственные числа и собственные вектора удовлетворяют системе алгебраических уравнений $(\hat{f} - \lambda \hat{E})\vec{r} = 0$, где $\hat{f}$ – операторная запись тензора функции распределения; $\hat{E}$ – единичный тензор; $\lambda, \vec{r}$ – собственные числа и собственные вектора.

В главе 3 представлен электромагнитный механизм формирования ФП в МО. Характеристики ФП в зависимости от параметров МО изложены в параграфе 3.2. Зависимость характеристик ФП от типа МО приведена в 3.3. Свойства жесткостного спектра ФП изложены в 3.4.

При движении плазмы в магнитном поле возникает индукционное электрическое поле, в результате воздействия которого меняется энергия заряженных частиц. Расчет траектории положительно заряженной частицы в винтовом магнитном поле движущегося МО показывает монотонное уменьшение

энергии. Величина потерь энергии зависит от скорости движения МО и напряженности неоднородного магнитного поля. Винтовое магнитное поле приводит к квазизахвату КЛ, результатом чего является накопление потерь энергии [A4]. В демонстрационном расчете выбраны значения геометрических параметров начального тора, скорости и градиента скорости, напряженности магнитного поля. Плоскость направляющей окружности тора располагается в плоскости солнечного экватора. Передняя граница МО пересекает Землю через 81 час, а задняя граница через 104 часа после начала движения. Продолжительность пересечения МО составляет 23 часа (Рисунок 2). Максимальная величина напряженности магнитного поля в поперечном сечении МО равна 11.6 нТл. Градиент скорости и расстояние между границами зависят от времени: в начале пересечения градиент и расстояние равны 512 км/с/ а.е. и 0.217 а.е., в конце пересечения – 398 км/с/ а.е. и 0.276 а.е. Среднее расстояние между границами равно 0.246 а.е. Принятые параметры МО соответствуют значениям параметров, наблюдаемых КВМ с МО [3].

В расчете кинетическая энергия КЛ равна 10 ГэВ (~10 ГВ), тип МО south-west-north (SWN) согласно обозначениям, введенным Ботхмер и Швенн [5].

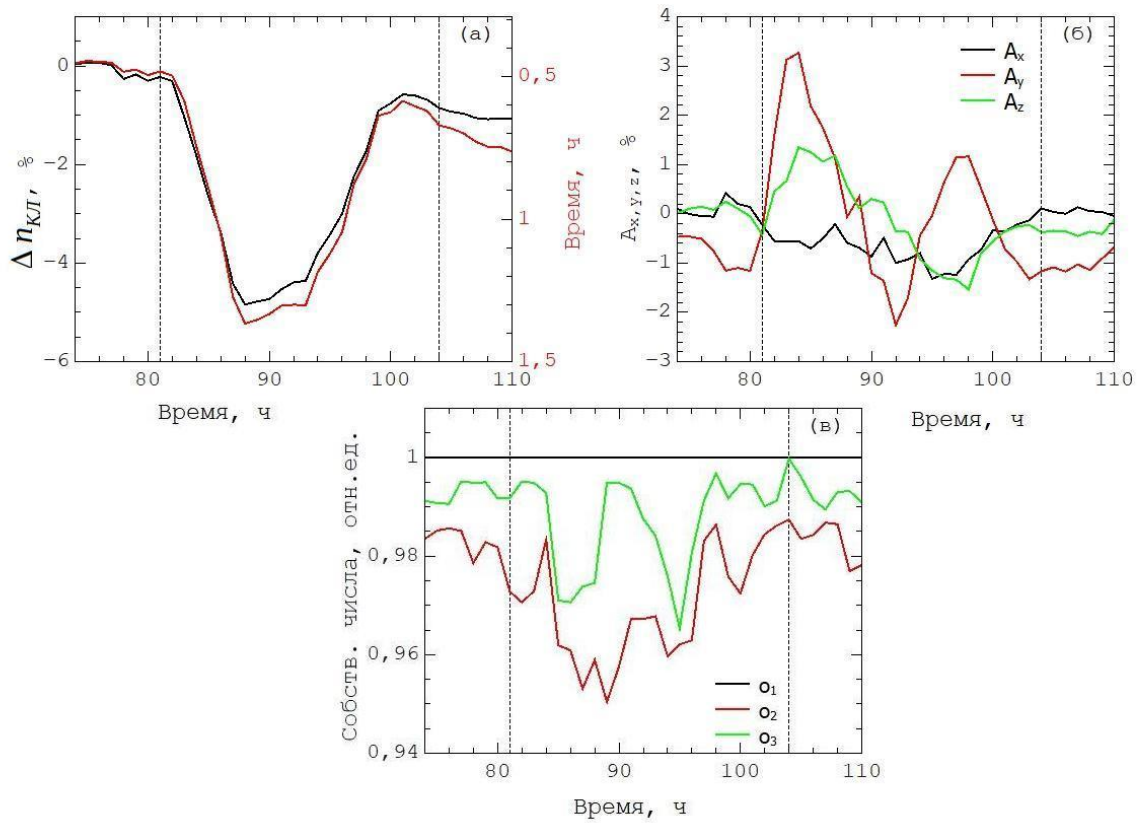


Рис. 2. Характеристики ФП в зависимости от времени. а) Δn_{KL} – черная линия (шкала слева) и величина среднего времени перехода КЛ из внешнего пространства в МО – красная линия (шкала справа); б) компоненты векторной анизотропии A_x , A_y , A_z . $B_m = 11.6$ нТл – максимальная величина напряженности магнитного поля при пересечении МО Землей; в) относительные величины собственных чисел; o_1 – максимальное собственное число, равное 1; o_2 – среднее число; o_3 – меньшее число. Штриховые вертикальные линии на всех рисунках – передняя и задняя граница МО

На рисунке 2а приведена зависимость относительной плотности числа КЛ Δn_{KL} от времени. По определению $\Delta n_{KL}(p_f, r) = \left((n(p_f, r) - n_u(p_f)) / n_u(p_f) \right) \times 100\%$, где $n(p_f, r) = \int p_f^2 f(p_f, r) d\Omega$ – плотность числа КЛ с импульсом p_f в фазовом пространстве; $n_u(p_f)$ – аналогичная плотность на орбите Земли без МО.

Согласно бесстолкновительному уравнению Больцмана в электромагнитном поле без учета рассеяний частиц $f(p_f, r) = f_0(p_s)$, где f_0 – функция распределения в источнике. Решая систему уравнений движения частиц, определяем величину импульса p_s при выбранном p_f . С учетом степенного спектра функции распределения КЛ в источнике $f_0(p_s) = f_0(p_f)(p_s/p_f)^{-\gamma}$, отсюда следует $n(p_f, r) = p_f^2 f_0(p_f) \int (p_s/p_f)^{-\gamma} d\Omega$ и аналогично $n_u(p_f)$. В результате получаем $\Delta n_{\text{КЛ}} = \left[\int \left(\frac{p_s}{p_f} \right)^{-\gamma} d\Omega / 4\pi - 1 \right] \times 100\%$. В расчетах использовано $\gamma = 4.7$. Рисунок 2а показывает, что амплитуда ФП $A_{\text{ФП}} = 4.8\%$.

Амплитудой ФП называют модуль величины максимального понижения плотности КЛ $A_{\text{ФП}} = |\Delta n_{\text{КЛ}, \text{max}}|$. При этом быстрые фаза уменьшения и фаза восстановления второй ступени ФП (интервал времени между 81 час и 100 час) симметричны относительно центра МО, что наблюдается в событиях [6, 7]. Симметрия обусловлена винтовой структурой магнитного поля МО. Из рисунка видно, что после выхода из МО плотность числа КЛ не восстанавливается до невозмущенного уровня. Мы рассчитали $\Delta n_{\text{КЛ}}$ в МО, имеющем форму сегмента тора [A5, A7, A8]. Было установлено, что восстановление $\Delta n_{\text{КЛ}}$ наступает в момент времени, при котором через местоположение детектора начинают проходить силовые линии межпланетного магнитного поля не пересекающие МО. В модели силовые линии в области за МО не продолжают в межпланетное пространство, поэтому $\Delta n_{\text{КЛ}}$ не восстанавливается. Для описания стадии восстановления ФП необходимо учитывать реалистичную структуру магнитного поля в задней части области KBM.

В каждом единичном объеме внутри МО находятся КЛ, имеющие все направления импульса. Из расчета системы уравнений движения частиц методом обратных траекторий можно определить время перехода из внешнего пространства в МО частиц с каждым направлением импульса $t(p, \Omega, r, t)$. Соответствующее среднее время перехода $\langle t(p, r, t) \rangle = \int t(p, \Omega, r, t) d\Omega / 4\pi$.

Пространственно-временная зависимость $\langle t(p, r, t) \rangle$ при движении МО относительно неподвижного детектора преобразуется во временную зависимость, которую на рисунке 2а изображает красная линия. Кривые $\Delta n_{\text{кл}}$ и $\langle t(p, r, t) \rangle$ подобные. Отсюда можно заключить, что физическим механизмом формирования ФП являются потери энергии КЛ, величина которых зависит от времени их перехода из внешнего пространства в МО.

На рисунке 2б линии разного цвета представляют компоненты векторной (однонаправленной) анизотропии в зависимости от времени. При входе в МО анизотропия значительно возрастает, что обычно наблюдается в событиях [6]. Временное поведение компонент анизотропии зависит от ориентации МО относительно плоскости солнечного экватора и магнитного поля МО.

В событиях экваториальная компонента анизотропии, составленная из A_x , A_y -компонент, показывает вращение и изменение вращения [6]. Такое поведение возникает при изменении величины и знака одной из компонент. Рисунок 2б показывает, что такими свойствами рассчитанные компоненты анизотропии обладают. Анизотропия является информативной характеристикой ФП, ее можно использовать при определении типа МО, параметров МО, его ориентации в межпланетном пространстве и траектории пересечения Земли МО [А3].

Относительные значения собственных чисел показаны на рисунке 2в. Отношения собственных чисел задают форму эллипсоида анизотропии. Для каждого момента времени на рисунке 2в приведены два собственных числа по отношению к максимальному собственному числу, величина которого принята за единицу. Рисунок 2в показывает, что эллипсоид в течение пяти часов был трехосным, в остальное время он был двуосным. В разные моменты времени близкими по величине были либо две большие, либо малые оси. Максимальная разница между осями составляла 5%, которая образовалась в момент максимума амплитуды ФП (около 90 часа).

Расчеты выявили зависимости характеристик ФП (амплитуды ФП и векторной анизотропии) от величины физических параметров МО и

геометрических параметров МО: а) при увеличении напряженности винтового магнитного поля величины характеристик ФП увеличиваются; б) при увеличении градиента скорости и скорости движения МО увеличиваются величины характеристик ФП; в) при увеличении площади поперечного сечения и углового размера по долготе МО величины характеристик ФП увеличиваются; г) при увеличении углового расстояния по долготе траектории пересечения от лобовой точки МО величины характеристик ФП уменьшаются.

При пересечении Землей движущегося МО пространственное распределение магнитного поля преобразуется во временное изменение. В соответствии с изменением компонент магнитного поля различают восемь типов МО [5]. В зависимости от того меняет знак B_z компонента поля МО называют биполярным (SEN, NES, SWN, NWS) или униполярным (WNE, ENW, WSE, ESW). Относительная плотность числа КЛ в зависимости от времени представлены на рисунке 4. Плотность КЛ не зависит, а векторная анизотропия сильно зависит от типа МО. На рисунках 3а-3г приведены компоненты напряженности магнитного поля, а на рисунках 3д-3з компоненты векторной анизотропии в зависимости от времени. Компоненты векторов определены в GSE системе координат. Равенство нулю B_x компоненты поля получается из-за принятого предположения о расположении траектории пересечения в плоскости XOY . Рисунки показывают, что в МО анизотропия существенно возрастает, а A_y , A_z компоненты становятся знакопеременными вдоль траектории пересечения. Рисунки показывают, что между компонентами напряженности поля и анизотропии существует связь: A_z зависит от B_y и A_y зависит от B_z . К примеру, рисунки 3а и 3б показывают зеркальную симметрию между компонентами поля. Похожую зеркальную симметрию имеют компоненты анизотропии (рисунки 3д, 3е). Аналогичные соотношения получаются для других типов МО. Полученные соотношения могут использоваться для определения типа МО по измерениям КЛ наземными детекторами в дополнение к прямым измерениям [A2].

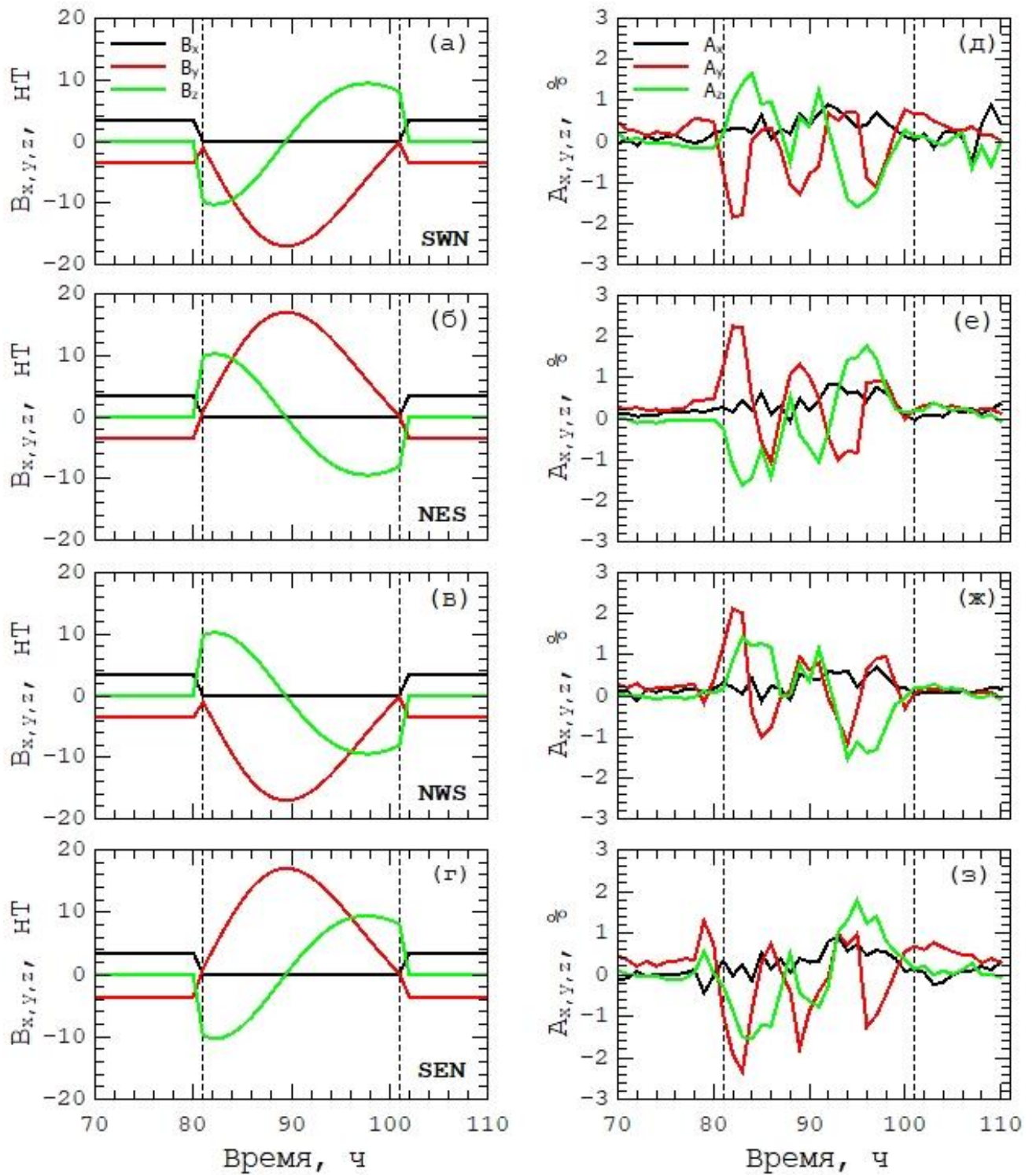


Рис. 3. а-г) Компоненты напряженности магнитного поля, д-з) соответствующие компоненты анизотропии в зависимости от времени для четырех типов биполярных МО. Время отсчитывается от момента начала движения МО

На рисунке 4 приведена зависимость относительной плотности КЛ разных энергий от времени. Расчет проведен для энергий КЛ 1–50 ГэВ и стандартных значений параметров МО. Рисунок показывает, что зависимость $\Delta n_{\text{КЛ}}$ от энергии КЛ обратная: чем больше энергия, тем меньше $\Delta n_{\text{КЛ}}$. Электромагнитный механизм формирования ФП объясняет зависимость следующим образом: чем больше энергия КЛ, тем быстрее они переходят из внешнего источника частиц в МО, поэтому меньше теряют энергии и, соответственно, меньше плотность. Рисунок показывает, что максимальное понижение плотности КЛ разных энергий наступает одновременно как в измерениях [А1].

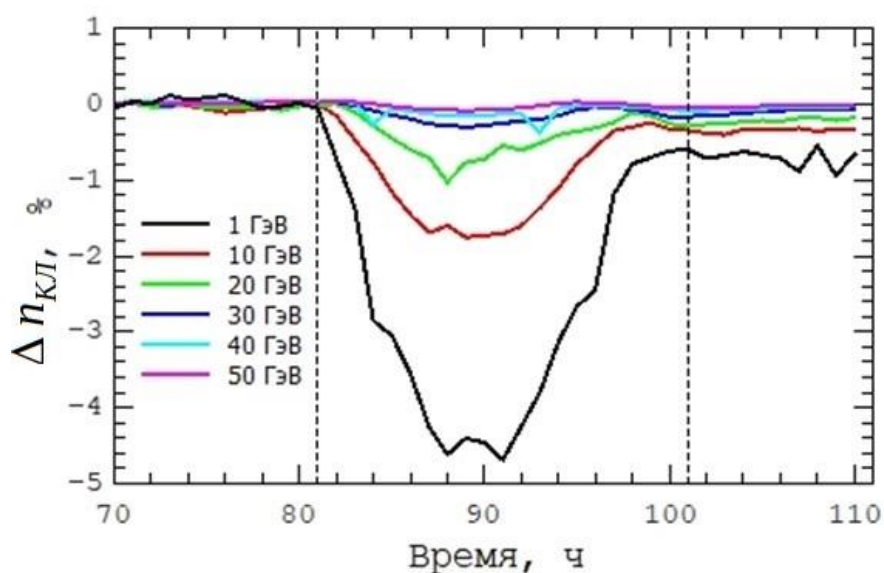


Рис. 4. Зависимость относительной плотности КЛ в МО от времени для КЛ различных энергий

Рисунок 5 представляет рассчитанный спектр ФП в зависимости от жесткости для трех вариантов величин параметров МО, отмеченных соответствующими цифрами. Спектр показывает эффективность механизма формирования ФП в широком диапазоне жесткостей. Значения величин параметров МО стандартный. Первый и второй варианты различаются величиной B_{max} : в первом варианте $B_{\text{max}}=20$ нТл, во втором варианте $B_{\text{max}}=40$ нТл. В третьем варианте $B_{\text{max}}=40$ нТл, больше скорость движения МО и больше угловой размер по долготе. Здесь B_{max} — максимальная величина напряженности магнитного поля.

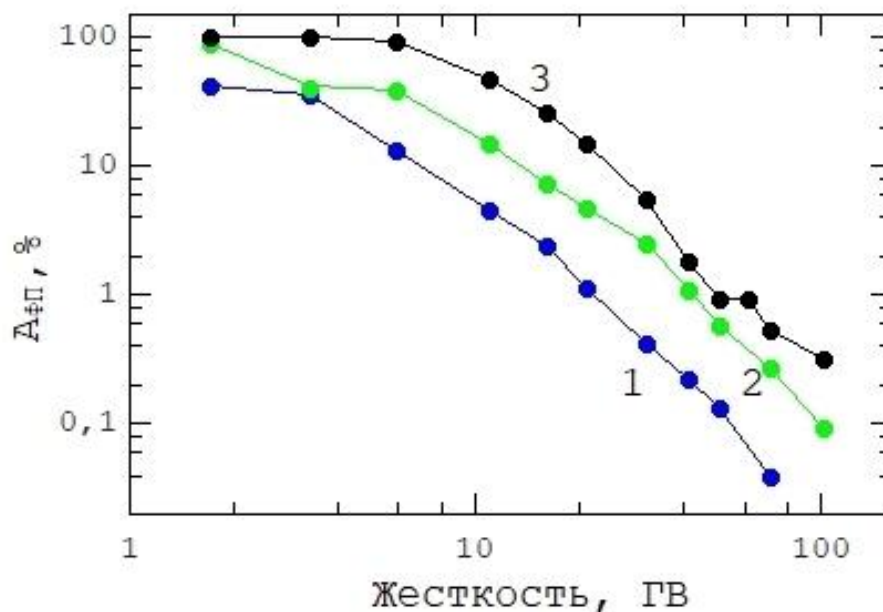


Рис. 5. Спектр ФП в зависимости от жесткости. Черная, зеленая и синяя кривые представляют спектр ФП для трех вариантов набора параметров МО

Из рисунка 5 видно, что формы спектра различаются. Рассчитанные спектры, начиная с некоторой величины жесткости, отклоняются от степенной зависимости с одним показателем и тем больше, чем больше жесткость. Изменение формы спектра объясняется влиянием размера МО. ФП в МО формируется при выполнении геометрического условия $r_L \ll d$, где r_L – ларморовский радиус частицы, d – размер поперечного сечения МО. При $r_L/1 \text{ а. е.} = 0.2 * (\varepsilon/10 \text{ ГэВ}) / (B_{max}/1 \text{ нТл})$ и $d/1 \text{ а. е.} \simeq 0.2$ для КЛ больших энергий геометрическое условие нарушается.

При малой жесткости ($P \sim (2 - 4) \text{ ГВ}$) $A_{ФП} \simeq (40 - 100)\%$. Это обозначает, что КЛ малых энергий ($\varepsilon \sim 2 \text{ ГэВ}$) сравнительно мало в окрестности оси МО. Большая величина $A_{ФП}$ обусловлена появлением значительного количества запрещенных траекторий частиц. Траекторию называем запрещенной в том случае, когда ее источник расположен на Солнце.

Запрещенные траектории, по-видимому, являются следствием использованной в расчете структуры магнитного поля в МО, согласно которой весь объем МО занят винтовым полем.

В главе 4 приводится сопоставление результатов расчетов со статистическим исследованием, основанным на экспериментальных данных, а также сопоставление для двух реальных событий [A2].

Использованная модель МО ограничивает возможность сопоставления рассчитанных характеристик ФП с измерениями. Сопоставление возможно с измерениями в МО, в котором: 1) максимальная величина напряженности винтового магнитного поля располагается внутри МО; 2) скорость движения плазмы при пересечении МО уменьшается монотонно со временем.

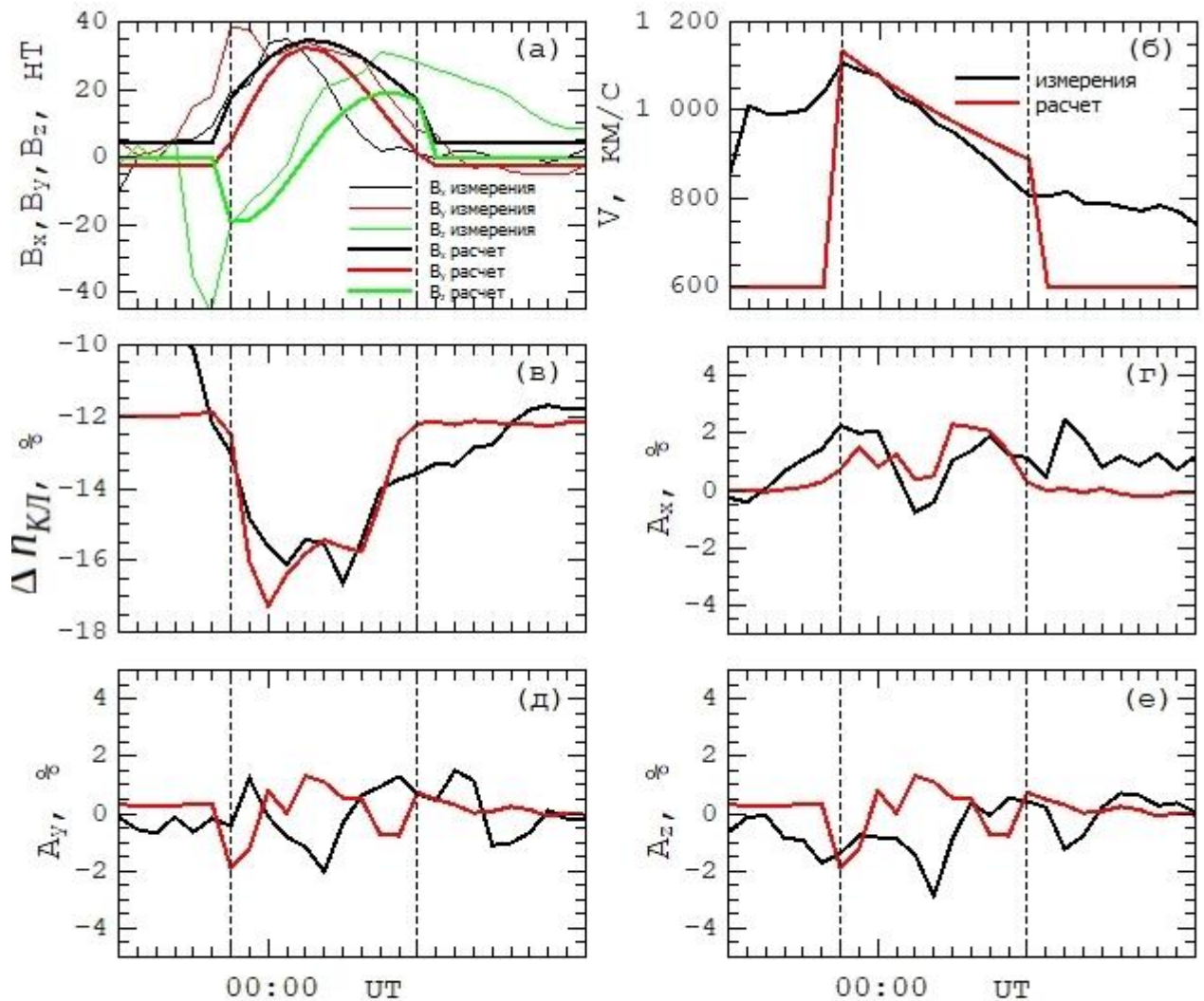
Скорость потока и компоненты напряженности магнитного поля в МО приведены в базе данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>). Результаты измерений КЛ мировой сети нейтронных мониторов приведены в World Data Center for Cosmic Rays (<http://cidas.isee.nagoya-u.ac.jp/WDCCR>). Плотность числа КЛ и компоненты векторной анизотропии получены методом глобальной съемки (GSM), разработанной и реализованной в Якутске [8].

Событие 16 июля 2000

На рисунке 6в показана относительная плотность числа КЛ и на рисунках 6г-е показаны компоненты векторной анизотропии в системе координат GSE. Магнитное поле и скорость модельного расчета (рисунки 6а, 6б) удовлетворительно согласуются с измерениями. Тип МО – SEN. Сжатие потока (рисунок 6б), по-видимому, определяет высокие значения компонент магнитного поля B_y в течение трех часов до прихода передней границы МО (рисунок 6а). Отметим, что компонента B_x направлена вдоль, а B_y , B_z – поперек скорости плазмы в этой области МО. Из рисунков видно, что рассчитанная плотность числа КЛ количественно соответствует измерениям (рисунок 6в), а компоненты анизотропии – качественно (рисунки 6г-6е). ФП в KBM состоит из трех стадий: первая стадия формируется в турбулентной области, вторая стадия формируется в

эжекте и МО, третья стадия начинается после выхода из эжекты. На зависимость $\Delta n_{\text{КЛ}}$ от времени могут оказывать влияние все области возмущения, расположенные за пределами МО. При этом влияние будет слабым на $\Delta n_{\text{КЛ}}$ (изотропная характеристика) и более сильным на анизотропию (угловая характеристика), что подтверждает сопоставление. В измерениях стадии ФП различаются темпом изменения $\Delta n_{\text{КЛ}}$: во время первой стадии темп меньше, чем во время второй стадии при пересечении МО. Рисунок 6в показывает, что за два часа до пересечения задней границы МО вторую стадию ФП сменяет третья стадия – восстановление интенсивности КЛ. Это объясняет разницу амплитуд спектра в этом интервале времени. Размер области, в которой происходит смена, равен $4.5r_L$.

Рисунок 6в показывает, что рассчитанная плотность числа КЛ восстанавливается до невозмущенного значения сразу после выхода из МО. Это объясняется тем, что КЛ, заполняющие область между Солнцем и МО, проходят мимо МО. Отсюда следует, что МО не оказывает влияния на восстановление плотности КЛ. Восстановление определяется, главным образом, турбулентной областью и эжектой, а также расположением траектории пересечения МО Землей.



16 июля 2000 год

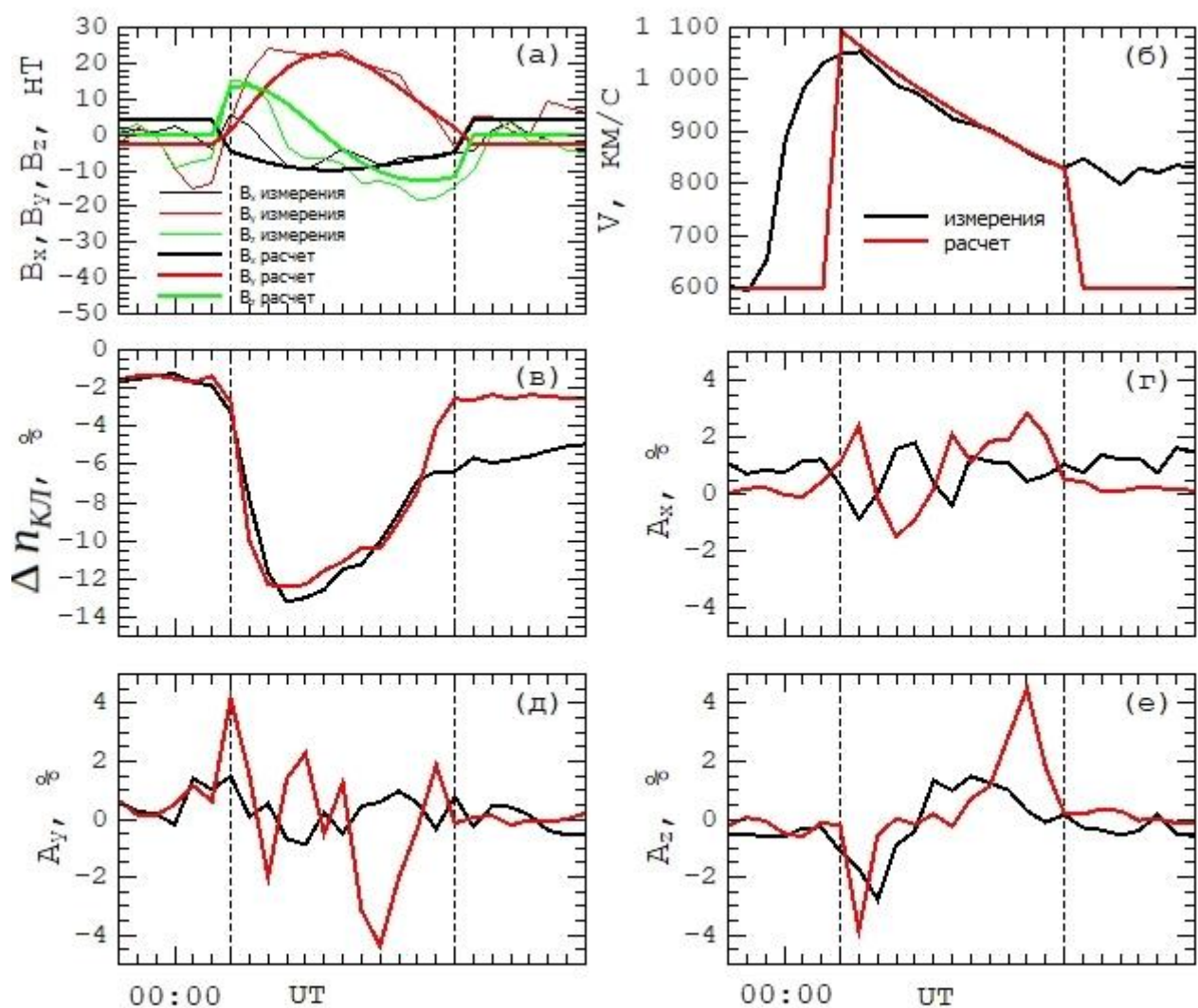
Рис. 6. а) Компоненты магнитного поля в зависимости от мирового времени. Линии черного, красного и зеленого цветов изображают компоненты магнитного поля B_x, B_y, B_z . Тонкие линии – измерения, представленные в базе данных OMNI, толстые линии соответствующих цветов – расчеты. б) Скорость плазмы. в) Относительная плотность числа КЛ. (г-е) A_x, A_y, A_z компоненты векторной анизотропии. На рисунках б-е) черные линии представляют измерения, красные линии – расчет. Длинный штрих обозначает начало суток, интервал между штрихами – один час. Вертикальные штриховые линии - границы МО. Компоненты магнитного поля и векторной анизотропии определены относительно GSE системы координат

Событие 27 июля 2004

Рисунок 7а показывает компоненты магнитного поля, а рисунок 7б – скорость МО в зависимости от мирового времени (UT). На рисунках 7г-7е черные кривые – измерения; красные кривые – расчеты. На рисунке 7в показана относительная плотность числа КЛ, а на рисунках 7г-7е – компоненты векторной анизотропии в системе координат GSE. Магнитное поле модели и скорость плазмы (рисунки 7а, 7б) согласуются с измерениями. Тип МО – NES. Рисунки показывают, что рассчитанная амплитуда ФП количественно соответствует измерениям (рисунок 7в), а компоненты анизотропии – качественно (рисунки 7г-7е). Рисунок 7в показывает, что в этом событие также за два часа до пересечения задней границы МО вторую стадию ФП сменяет третья стадия.

Абунин и др. [7] и Белов и др. [6] приводят анализ интенсивности КЛ и векторной анизотропии для частиц с жесткостью 10 ГВ (9 ГэВ). Они исследовали характеристики ФП в 99-и событиях, содержащих МО и зарегистрированных в период 1996-2010 гг. События являются очень разнообразными по величине магнитного поля и его пространственному распределению, скорости и градиенту скорости МО. Тем не менее, выявлены общие характеристики ФП в МО: 1. $A_{\text{ФП}}$ составляет (1–12)%; 2. при входе в МО и выходе из него анизотропия существенно изменяется; 3. анизотропия систематически изменяется в МО; 4. северо-южная компонента часто меняет знак в центре МО. 5. экваториальная компонента, как правило, испытывает вращение. 6. амплитуда ФП меняется внутри МО, показывая симметричную форму, с минимумом плотности КЛ в центре МО.

Наблюдаемое поведение плотности КЛ и векторной анизотропии в МО, в целом, согласуется с представленными расчетами.



27 июля 2004 год

Рис. 7. а) Компоненты магнитного поля в UT. Черные, красные и зеленые кривые представляют компоненты магнитного поля B_x , B_y , B_z . Тонкие линии – измерения, представленные в базе данных OMNI, толстые линии соответствующих цветов – расчеты. б) Скорость плазмы. в) Относительная плотность КЛ. д-е) Компоненты векторной анизотропии A_x , A_y , A_z . На рисунках б-е) черные кривые – измерения; красные кривые – расчеты. Длинный штрих обозначает начало суток, интервал между штрихами – один час. Вертикальные штриховые линии - границы МО. Компоненты магнитного поля и векторной анизотропии определены относительно GSE системы координат

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Разработаны методы для исследования Форбуш понижения в магнитном облаке: 1) модель крупномасштабной петли с винтовым магнитным полем, представляющей движущееся в межпланетном пространстве магнитное облако; 2) метод расчета функции распределения космических лучей, основанного на решении бесстолкновительного уравнения Больцмана с использованием обратных траекторий частиц; 3) метод получения соотношений между функцией распределения КЛ и её тремя моментами, используемыми при сопоставлении результатов расчета и измерений.
2. Предложен механизм формирования Форбуш понижения в магнитном облаке, в котором функция распределения КЛ определяется потерями энергии в индукционном электрическом поле и квазизахватом в винтовом магнитном поле. Предложена модель формирования Форбуш понижения в магнитном облаке, основанная на новом механизме, в котором характеристики Форбуш понижения определяются потерями энергии космических лучей при переходе из невозмущенного пространства в магнитное облако.
3. Рассчитаны амплитуда Форбуш понижения, векторная и тензорная анизотропии в магнитном облаке. Выявлена их зависимость от: 1) величины напряженности магнитного поля, винтовой структуры магнитного поля и ее состояния во всем объеме, типа магнитного облака, скорости и градиента скорости движения магнитного облака; 2) углового размера и величины площади поперечного сечения облака; 3) траектории пересечения облака Землей.
4. Рассчитан спектр Форбуш понижения в зависимости от жесткости. Получено, что при малой жесткости (~ 5 ГВ) амплитуда Форбуш понижения $\sim 100\%$, что обусловлено образованием большого количества запрещенных траекторий частиц. При большой жесткости (~ 30 ГВ) спектр имеет обрезание, обусловленное размером поперечного сечения магнитного облака.

Представленные результаты получены для использованной модели винтового магнитного поля в магнитном облаке.

5. Сопоставление двух рассчитанных характеристик Форбуш понижения – амплитуды Форбуш понижения и векторной анизотропии – с измерениями показывает общее согласие. Результаты сопоставления с измерениями в двух событиях показывают количественное соответствие амплитуды Форбуш понижения и качественное соответствие векторной анизотропии.

Таким образом, в диссертации решена научная задача, имеющая важное значение для физики космических лучей – создана модель формирования спорадических Форбуш понижений в электромагнитном поле магнитного облака, установлены связи между свойствами магнитных облаков и функцией распределения космических лучей. Рассчитанные характеристики Форбуш понижения соответствуют наблюдениям.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных работах в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и/или SCOPUS:

A1. **Petukhova, A. S.**, Petukhov, I. S., Petukhov, S. I. Forbush decrease spectrum in a magnetic cloud in the 2004 July 27 event. Journal of Physics: Conference Series. V. 1690, P. 012016, (2020) (**WOS and Scopus**)

A2. **Petukhova, A. S.**, Petukhov, I. S., Petukhov, S. I. Forbush decrease characteristics in a magnetic cloud. Space Weather. V. 18, P. e2020SW002616, (2020) (**WOS and Scopus**)

A3. **Petukhova, A. S.**, Petukhov, I. S., Petukhov, S. I., Gololobov P.Yu. Cosmic rays as an indicator of the geoeffectiveness of magnetic clouds. E3S Web Conf. V. 127, P. 02007, (2019) (**Scopus**)

A4. **Petukhova, A. S.**, Petukhov, I. S., Petukhov, S. I. Theory of the Formation of Forbush Decrease in a Magnetic Cloud: Dependence of Forbush Decrease

Characteristics on Magnetic Cloud Parameters. The Astrophysical Journal. V. 880, №1. P. 17, (2019) (**WOS and Scopus**)

A5. **Petukhova, A. S.**, Petukhov, I. S., Petukhov, S. I. Image of Forbush Decrease in a Magnetic Cloud by Three Moments of Cosmic Ray Distribution Function. Journal of Geophysical Research: Space Physics. V. 124, № 1. P. 19, (2019). (**WOS and Scopus**)

A6. **Петухова, А.С.**, Петухов, С.И. Тороидальные модели магнитного поля с винтовой структурой. Солнечно-земная физика. том 5, № 2, с. 74, (2019) (**БАК**)

A7. **Петухова, А.С.**, Петухов, И.С., Петухов, С.И., Григорьев В.Г. Форбуш понижение космических лучей в тороидальной модели магнитного облака. Известия РАН. Сер. Физ., том 81, № 4, с. 571, (2017) (**БАК**)

A8. **Петухова, А.С.**, Петухов, И.С., Петухов, С.И. Форбуш-понижение космических лучей в тороидальной модели магнитного облака. Письма в ЖЭТФ, том 102, № 11, с. 807, (2015) (**БАК**)

Список цитируемой литературы

1. Miller, G., Turner, L. Force free equilibria in toroidal geometry // The Physics of Fluids. – 1981. – V. 24. – N. 2. – P. 363.
2. Zurbuchen, T. H., Richardson, I. G. In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections // Coronal Mass Ejections. Space Sciences Series of ISSI. – 2006. – V. 123. – P. 31.
3. Kilpua, E., Koskinen, H. E. J., Pulkkinen, T. I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space // Living Reviews in Solar Physics. – 2017. – V. 14. – N. 1. – ID. 5.
4. Petukhov, I.S., Petukhov, S.I. Galactic cosmic ray intensity dynamics in the presence of large-scale solar wind disturbances // Astronomy letters. – 2009. – V. 35. – N. 10. – P. 701.
5. Bothmer, V., Schwenn, R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind // Annales Geophysicae. – 1998. – V. 16. – N. 1. – P. 1.

6. Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H. Galactic cosmic ray density variations in magnetic clouds // Solar Physics. – 2015. – V. 290. – N. 5. – P. 1429.
7. Abunin, A., Abunina, M., Belov, A., Eroshenko, E., Oleneva, V., Yanke, V., Mavromichalaki, H., Papaioannou, A. The impact of magnetic clouds on the density and the first harmonic of the cosmic ray anisotropy // 33-rd International Cosmic Ray Conference. – 2013. – P. 198.
8. Altukhov, A.M., Krymsky, G.F., Kuzmin, A.I. The method of “global survey” for investigating cosmic ray modulation // Proc. 11th International Conference on Cosmic Rays. – 1970. – V. 4. – P. 457.