

На правах рукописи

Оводков Денис Александрович

**Динамика заряженных частиц в токовых слоях
бесстолкновительной плазмы магнитосферы Земли.**

Специальность: 01.01.03 - математическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель д.ф.-м.н В.Ю. Попов

МОСКВА, 2007

Работа выполнена на кафедре математики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

**Доктор физико-математических наук
Попов Виктор Юрьевич**

Официальные оппоненты:

**Доктор физико-математических наук
Кропоткин Алексей Петрович**

**Кандидат физико-математических наук
Васильев Алексей Алексеевич**

Ведущая организация:

Полярный геофизический институт,
Кольский научный центр РАН,
г. Апатиты, Мурманская обл., Россия.

Защита состоится 17 мая 2007 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета К.501.001.17 в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан ” ” 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
профессор

П.А. Поляков.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Исследование явлений, происходящих в хвосте магнитосферы Земли, занимает важное место в космической физике. Спутниковые данные свидетельствуют о том, что в хвосте магнитосферы могут образовываться тонкие токовые слои (ТТС) с характерным масштабом порядка ионного ларморовского радиуса, выполняющие роль резервуаров энергии солнечного ветра, которая может запасаться и взрывным образом высвобождаться во время геомагнитных возмущений - суббурь. ТТС могут иметь сложную внутреннюю структуру, например, два максимума плотности тока (так называемые расщепленные, или бифурцированные ТТС), несимметричные профили плотности тока и магнитного поля. По своим динамическим свойствам это токовые слои являются метастабильными, т.е. могут существовать в течение достаточно долгого промежутка времени, сопоставимого с фазой геомагнитного возмущения, а потом взрывным образом разрушаться. Структура и динамика тонких токовых слоев (ТТС) в бесстолкновительной плазме изучаются в рамках кинетической теории, где движение разных групп частиц определяет свойства токового слоя как целого. Процессы хаотического рассеяния частиц в ТТС, исследуемые в настоящей работе, могут играть ключевую роль как в формировании ТТС, так и в их разрушении во время геомагнитных возмущений, поэтому их моделирование является актуальной задачей.

Цель работы

Целью работы является получение аналитических и численных оценок динамики заряженных частиц в бифурцированных тонких токовых слоях (с масштабом неоднородности порядка ионного ларморовского радиуса) в бесстолкновительной магнитосферной плазме, а также исследование влияния геометрии токового слоя на коллективное движение плазмы.

Задачи исследования

1. Построение модели взаимодействия заряженных частиц с токовым слоем, позволяющей с единых позиций рассматривать как классические токовые слои (ТС) (с "колоколообразным" профилем плотности тока), так и бифурцированные ТС, обнаруженные относительно недавно в магнитосфере Земли.
2. Создание комплекса программ, позволяющего проводить эффективный численный анализ динамики как отдельных частиц так и ансамблей частиц в "бифурцированных" токовых слоях.
3. Получение аналитических оценок основных характеристик движения заряженных частиц в широком диапазоне изменения основных параметров токового слоя и ансамбля частиц.

Методы исследования

Основными методами математического моделирования, разработанными в данной диссертации, являются численные методы, реализованные в виде комплексов программ. В работе также получены аналитические оценки важных характеристик взаимодействия заряженных частиц с ТТС: скачков магнитных моментов и адиабатического инварианта $I_z = \frac{1}{2\pi} \oint \dot{z} dz$.

Научная новизна.

Разработаны новые эффективные алгоритмы и комплексы программ, которые позволяют проводить эффективный анализ динамики частиц в ТТС. Используются современные вычислительные средства, позволяющие значительно экономить компьютерные ресурсы, реализован удобный интерфейс пользователя. Проведено аналитическое исследование динамики частиц в бифурцированных токовых слоях. Получены аналитические формулы для скачков магнитных моментов частиц, являющиеся обобщением полученной ранее формулы для классических "колоколообразных" ТТС. Получено аналитическое выражение для адиабатического инварианта дви-

жения I_z . Результаты были подтверждены численными экспериментами и находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными, а также результатами других исследователей. Разработанные аналитические методы и численные алгоритмы позволяют с единых позиций проводить рассмотрение как "колоколообразных" так и бифурцированных ТС.

Теоретическая и практическая значимость.

1. Предложена модель взаимодействия заряженных частиц (ионов) с ТС, позволяющая с единых позиций рассматривать динамику заряженных частиц в токовых слоях сложной конфигурации.
2. Создан и реализован в виде комплекса программ алгоритм расчета траекторий частиц в магнитном поле, характерном для хвоста магнитосферы Земли.
3. В численном эксперименте получены характеристики коллективной динамики частиц в широком диапазоне основных физических параметров. Оценено среднее время жизни частиц в слое, коэффициент прохождения слоя, рассеяние магнитного момента. Проведено численное моделирование динамики частиц с использованием сечений Пуанкаре.
4. Разработан аналитический аппарат, позволяющий определять положения центров рассеяния магнитных моментов в бифурцированных токовых слоях произвольной конфигурации. Впервые получены аналитические выражения для скачков магнитных моментов ионов и адиабатических инвариантов движения в бифурцированных ТС.
5. Предложен эффективный способ определения параметра адиабатичности, в полях с областью неоднородности порядка ларморовского радиуса частиц.
6. Представленные в диссертации аналитические оценки позволяют получать качественную картину динамики частиц, без ресурсоёмких численных экспериментов на ЭВМ. Полученные формулы могут быть

использованы в теоретических исследованиях для построения более общих самосогласованных моделей магнитосферного хвоста Земли, а также для анализа данных, полученных со спутников.

Достоверность и обоснованность

полученных результатов подтверждаются

1. Тестированием алгоритмов и комплексов программ на изученных ранее тестовых задачах.
2. Совпадением полученных аналитических оценок и результатов прямого компьютерного моделирования.
3. Хорошим согласием теоретических и численных результатов с результатами других исследовательских групп и экспериментальными спутниковыми данными.

Положения, выносимые на защиту

1. Созданы эффективные алгоритмы и комплексы программ для моделирования нелинейной динамики заряженных частиц в бифурцированных токовых слоях, характерных для хвоста магнитосферы Земли.
2. В численных экспериментах методом сечений Пуанкаре впервые исследована динамика частиц в бифурцированных токовых слоях с масштабом неоднородности порядка ларморовского радиуса ионов. Численно и аналитически исследованы процессы рассеяния магнитных моментов заряженных частиц в бифурцированных токовых слоях с областью неоднородности много больше ионного ларморовского радиуса.
3. Получены аналитические выражения для адиабатического инварианта I_z и скачков магнитных моментов при движении частиц в токовых слоях с профилями плотности тока произвольной формы, а также аналитические оценки, позволяющие находить центры рассеяния магнитных моментов.

Апробация работы

Диссертация выполнена в МГУ им. М.В.Ломоносова. Результаты работы доложены на съездах, симпозиумах, конференциях:

- The Second Workshop on Thin Current Sheets 19-21 April, 2004, College Park, Maryland
- International conference on Problems of Geocosmos, May 24-28, 2004, St. Petersburg, Russia
- Russian-Chinese Conference on Investigations of Space Plasma, 11-15 October 2005, Tsingdao, China.
- Международный симпозиум EGO в Вене, Австрии 2005г.
- 7th International Symposium for Space Simulations (ISSS-7), 26-31 March 2005, Kyoto, Japan, Ed. Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Ломоносовские чтения. Москва, апрель 2006.
- Выездной семинар ИКИ РАН, Таруса 2006.
- Семинар НИИЯФ МГУ по космической электродинамике. Москва, 17 февраля, 2006.
- Ломоносовские чтения. Москва, апрель 2006.
- Конференция молодых ученых, ИКИ РАН, апрель 2006.
- 6-th international conference on Problems of Geocosmos, St. Petersburg, Russia, 23-27 May, 2006.
- Семинар НИИЯФ МГУ по космической электродинамике. Москва, 9 марта, 2007.

Публикации

Основные результаты, полученные автором и изложенные в диссертации, опубликованы в работах, список которых приведен в конце автореферата. По материалам диссертации опубликована 3 научные работы и сделано 12

докладов на научных конференциях. Все результаты, полученные автором во время работы в составе научных коллективов, включены в диссертацию с согласия и одобрения соавторов.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, разбитых на параграфы, заключения и списка литературы, содержащего наименований. Диссертация содержит 57 рисунков. Нумерация формул и рисунков своя в каждой главе. Объем диссертации составляет 97 страниц, включая 8 страниц цитированной литературы.

Работа выполнена в Московском государственного университета им. М.В. Ломоносова

Содержание работы.

СТРУКТУРА ТОКОВОГО СЛОЯ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ

В этом разделе диссертации приводится обзор литературы по спутниковым измерениям в токовом слое хвоста магнитосферы Земли, его структуре, основным свойствам [1, 2]. Сделан детальный обзор свойств недавно открытых в магнитосфере предельно тонких токовых слоев, как нерасщепленных, так и расщепленных (бифурцированных). Приведено описание классической модели Харриса [3]. Подробно рассмотрена квазиadiaбатическая теория движения заряженных частиц в ТТС. Сделан обзор работ по изучению нелинейной динамики частиц в нерасщепленных токовых слоях. Рассмотрены общие свойства движения заряженных частиц в геомагнитосферном хвосте Земли, в рамках рассматриваемой модели:

$$\mathbf{V} = B_0 B_x(Z/L) e_x + B_n e_z \quad (1)$$

где $B_x(Z) \rightarrow \pm 1$ при $Z \rightarrow \pm \infty$; B_n, B_0 - соответственно перпендикулярная и продольная компоненты магнитного поля, причем $B_n \ll B_0$, а -ширина области обращения магнитного поля. Рассмотрены существующие на сегодняшний день подходы и методы для изучения динамики частиц в нерасщепленных ТС: метод сечений Пуанкаре [4], квазиadiaбатическая теория

[5], адиабатическая теория [6], методы расчёты скачков магнитного момента [7].

ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В ДВОЙНЫХ ТТС

В данной главе рассматривается динамика в бифурцированных ТТС различных конфигураций: с плавными и резкими пиками тока, симметричными и несимметричными профилями плотности тока. Для исследования соответствующие профили магнитного поля были заданы как суперпозиция расположенных рядом двух токовых слоев. Расстояние между максимумами плотности тока определяется параметром Z_c , а ширины максимумов - параметрами L_{left} и L_{right} , соответственно.

$$B_x(Z) = \frac{1}{2} \left\{ \text{th} \left(\frac{Z - Z_c}{L_{right}} \right) + \text{th} \left(\frac{Z + Z_c}{L_{left}} \right) \right\} \quad (2)$$

Было проведено численное моделирование движения заряженных частиц, характеризуемое гамильтонианом:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2}(p_x^2 + p_z^2) + \frac{1}{2}(a_y(z) - b_n \sigma x)^2 \quad (3)$$

где

$$a_y(z) = \frac{1}{2} \left[\sigma_r^2 \ln \text{ch} \left\{ \frac{(z - z_c)\sigma}{\sigma_r^2} \right\} + \sigma_l^2 \ln \text{ch} \left\{ \frac{(z + z_c)\sigma}{\sigma_l^2} \right\} - \sigma_r^2 \ln \text{ch} \left\{ \frac{z_c \sigma}{\sigma_r} \right\} - \sigma_l^2 \ln \text{ch} \left\{ \frac{z_c \sigma}{\sigma_l} \right\} \right] \quad (4)$$

Здесь использованы следующие безразмерные переменные:

$$p_{x,y,z} = \frac{P_{x,y,z}}{mv_0}, \quad \{y, z, z_c\} = \frac{\{Y, Z, Z_c\}}{\sqrt{\rho_0 L}}, \quad x = \frac{X}{\sqrt{\rho_0 L}} - \frac{p_y}{b_n \sigma}, \quad (5)$$

где $b_n = \frac{B_n}{B_0}$, $\sigma = \sqrt{\frac{L}{\rho_0}}$, ρ_0 - ларморовский радиус иона.

Подробно рассмотрен весь диапазон энергий частиц, начиная от $\sigma = 1$, что соответствует полностью размагниченным ионам и заканчивая значениями $\sigma = 30$, что соответствует полностью замагниченным, ионам. Подробно рассмотрены различные конфигурации магнитного поля: гиперболическая модель, "колокообразная", гиперболическая расщепленная

и гиперболическая расщепленная модель с асимметричными максимума профиля тока. Для проверки разработанного алгоритма расчета было использовано сравнение с результатами, полученными ранее в работах [8],[9]. Получено хорошее совпадение результатов с изученной ранее гиперболической моделью токового слоя.

ДИНАМИКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С ОБЛАСТЬЮ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОРЯДКА ИОННОГО ЛАРМОРОВСКОГО РАДИУСА

В данной главе проводится исследование особенностей движения заряженных частиц при неоднородностях магнитного поля порядка ларморовского радиуса частицы. Аналитическое описание тесным образом связано с теорией адиабатических инвариантов движения I_z [10, 11]. В рассматриваемой нами системе параметром адиабатичности, сохраняющимся при движении заряженной частицы, является величина

$$I_z = \frac{1}{2\pi} \oint \dot{z} dz \quad (6)$$

Впервые в работе [10] было получено аналитическое значение для адиабатического инварианта I_z без учета скачков при пересечениях сепаратрисы частицей. В данной работе приводится обобщение алгоритма вычисления адиабатического инварианта для двугорбого профиля магнитного тока. Для аппроксимации векторного потенциала магнитного поля была предложена пятилинейная модель :

$$A_y(z) = a_i z^2 + b_i z + c_i, \quad i = 1, \bar{5} \quad (7)$$

где a_i, b_i, c_i постоянные коэффициенты. Для данной пятилинейной модели были получены аналитические формулы периода колебаний заряженных частиц и величины адиабатических инвариантов движения. Получена формула для периода колебаний частицы в режиме с пересечением нейтрального слоя, для невырожденного случая $a_i \neq 0$, которая записывается следующим образом:

$$\tau_A = \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} \frac{2}{a_i} \frac{h_i h'_i}{\sqrt{h_i^2 + h_i'^2}} \int_{\beta_i}^{\alpha_i} \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k_i^2 t^2)}} \quad (8)$$

Здесь

$$k = \frac{h}{\sqrt{h^2 + h'^2}} \quad (9)$$

$$\alpha = \sqrt{1 - h'^2 \left(\frac{p_i}{2} + z_{min}\right)^2}, \quad \beta = \sqrt{1 - h'^2 \left(\frac{p_i}{2} + z_{max}\right)^2} \quad (10)$$

$$h_i = \sqrt{\frac{1}{q_i - \frac{p_i^2}{4}}}, \quad h'_i = \sqrt{\frac{1}{\frac{p_i^2}{4} - q'_i}} \quad (11)$$

$$p_i = \frac{b_i}{a_i}, \quad q_i = \frac{c_i + \sqrt{E_z} - b_n \sigma x}{a_i}, \quad q'_i = \frac{c_i - \sqrt{E_z} - b_n \sigma x}{a_i} \quad (12)$$

$$E_z = \dot{z} + (A_y(z) - b_n \sigma x)^2 \quad (13)$$

$$z_{min} = \frac{-b_i - \sqrt{b^2 - 4a_i(c_i - b_n \sigma x - \sqrt{E_z})}}{2a_i} \quad (14)$$

$$z_{max} = \frac{-b_i + \sqrt{b_i^2 - 4a_i(c_i - b_n \sigma x - \sqrt{E_z})}}{2a_i} \quad (15)$$

Получено выражение для адиабатического инварианта:

$$I_z = \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} \frac{a_i}{\pi k_i h_i'^3} \left\{ \frac{1}{3k_i^2} (E_{\beta_i}^{\alpha_i} (2k_i^2 - 1) + K_{\beta_i}^{\alpha_i} (1 - k_i^2)) - \frac{1}{3} (t_i y(\tilde{t})_i) |_{\beta_i}^{\alpha_i} \right\} \quad (16)$$

Здесь

$$E_{\beta_i}^{\alpha_i} = \int_{\beta_i}^{\alpha_i} \frac{dz}{\sqrt{(1 - z^2)(1 - k_i^2 z^2)}} \quad (17)$$

- эллиптический интеграл 1-го рода

$$y(\tilde{t})_i = \sqrt{(1 - t^2)(1 - k_i^2 t^2)}, \quad t = \sqrt{1 - h_i'^2 \left(z + \frac{p_i}{2}\right)^2} \quad (18)$$

Для периода колебаний в случае движения без пересечения плоскости $Z = 0$ получена следующая формула:

$$\tau_B = \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} 2 \frac{h'_i}{a_i} K_{\beta_i}^{\alpha_i}(k_i) \quad (19)$$

Здесь

$$k_i = \frac{\sqrt{h_i^2 - h_i'^2}}{h_i}, \quad (20)$$

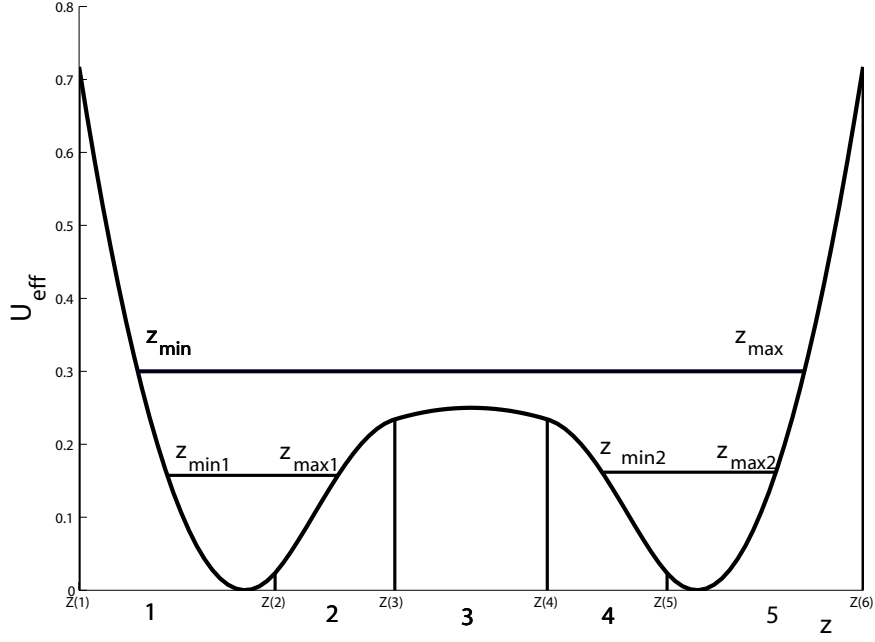


Рис. 1: Потенциальная яма движения частицы в пятилинейной модели токового слоя.

$$h_i = \sqrt{\frac{1}{\frac{p_i^2}{4} - q_i}}, \quad h'_i = \sqrt{\frac{1}{\frac{p_i^2}{4} - q'_i}} \quad (21)$$

где z_{min} и z_{max} определяются следующим образом (рис. 1:

$$z_{min1} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4a(c - b_n \sigma x - \sqrt{E_z})}}{2a} \quad (22)$$

$$z_{max1} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4a(c - b_n \sigma x + \sqrt{E_z})}}{2a} \quad (23)$$

$$z_{min2} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c - b_n \sigma x - \sqrt{E_z})}}{2a} \quad (24)$$

$$z_{max2} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c - b_n \sigma x + \sqrt{E_z})}}{2a} \quad (25)$$

Получена формула для адиабатического инварианта $I_z = \frac{1}{\pi} \oint p_z dz$:

$$I_z = \sum_{i=i_{min}}^{i_{max}} \frac{2a_i}{3\pi h_i^3} \left\{ E_{\beta_i}^{\alpha_i} (2 - k_i^2) + 2K_{\beta_i}^{\alpha_i} (k_i^2 - 1) - \frac{1}{3} (t_i y(\tilde{t})_i k_i^2) |_{\beta_i}^{\alpha_i} \right\} \quad (26)$$

Для численного моделирования динамики заряженных частиц в бифурцированных ТТС был реализован программный комплекс на базе пакета

Matlab 7.0 с возможностью графической визуализации полученных результатов. Возможности комплекса позволяют в полностью автоматическом режиме по заданным параметрам модели L_{left}, L_{right}, Z_c определять параметры аппроксимации a_i, b_i, c_i , находить граничные точки склейки сегментов, точки отражения частиц $z_{min}, z_{max}, z_{min1}, z_{max1}, z_{min2}, z_{max2}$. Для проведения расчетов были использованы два метода вычислений : первый основан на численном интегрировании, второй на основе полученных аналитических выражений. Получено совпадение результатов, что свидетельствует о надежности, полученных численных и аналитических алгоритмов.

С помощью метода сечений Пуанкаре было продемонстрировано, что расщепление слоя вызывает увеличение относительного объема рассеянной плазмы, что может играть критическую роль в эволюции структуры тонкого токового слоя [12]. Получена формула для определения эффективного параметра адиабатичности κ_{eff} :

$$\kappa_{eff} = \begin{cases} b_n \sigma_{eff}, & \sigma_{eff} > 1, \\ b_n (1 + \sigma_{eff}), & \sigma_{eff} < 1. \end{cases}$$

Здесь $\sigma_{eff} = \sqrt{\frac{0.5(L_{left} + L_{right}) + Z_c}{\rho_0}}$ определяет отношение области обращения поля к гирорадиусу вращения ρ_0 в случае "двугорбой" конфигураций ТС. Было показано, что управляющими параметрами, определяющими размеры фазовых областей, могут служить параметр адиабатичности κ_{eff} , а также расстояние между максимумами плотности тока Z_c и отношение их ширины к ларморовскому радиусу ионов σ . Увеличение фазовой области захваченных частиц сопровождается общим увеличением времени жизни плазменных частиц в токовом слое.

ДИНАМИКА ИОНОВ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С ОБЛАСТЬЮ НЕОДНОРОДНОСТИ МНОГО БОЛЬШЕ ЛАРМОРОВСКИХ РАДИУСОВ ВРАЩЕНИЯ

В данной главе проводится аналитическое и численное исследование влияния структуры магнитного поля токовых слоев разных конфигураций (с

одним и двумя максимумами профилей плотности тока) на характер динамики заряженных частиц - ионов (в-частности, рассеяния их магнитных моментов) с масштабом неоднородности магнитного поля много больше ларморовского радиуса частиц.

Построены аналитическая и численная модели скачков магнитных моментов частиц при пересечении токовых слоев со сложными профилями тока. Получена формула, определяющая положение центров рассеяния магнитных моментов частиц для исследуемой задачи:

$$\frac{X_0}{L} = \frac{Z_c}{L} + \frac{L_{right}}{2L} \ln \frac{b_n}{\sqrt{1 + b_n^2}} \quad (27)$$

Получено аналитическое выражение для скачков магнитных моментов частиц:

$$\Delta\mu^* = \frac{B_n}{V^2} \Delta\mu \simeq \pi \left(\frac{(\mu^*)^{\frac{1}{2}}}{2^{\frac{3}{4}}} \right) \left(\frac{B_n}{B_0 B'_x(X_0) r_G} \right)^{\frac{1}{8}} \left(Y_0 \frac{B_0}{B_n} B'_x(X_0) \right)^{-\frac{9}{8}} \frac{\cos \Psi_{r0}}{\Gamma(\frac{9}{8})} \exp \left\{ \frac{-b_n}{r_G \frac{\partial B_x(Z)}{\partial Z} \Big|_{Z=X_0}} F(\mu^*) \right\} \quad (28)$$

Здесь использовано обозначение:

$$B'_x(X_0) = \frac{\partial B_x(Z)}{\partial Z} \Big|_{Z=X_0} \quad (29)$$

Аналитические оценки скачков магнитных моментов сравнивались с численными расчетами трассирования частиц в заданных магнитных конфигурациях и численного интегрирования уравнений движения. Проанализированы характеристики движения ионов в широкой области изменения параметров системы. Показано, что процессы рассеяния частиц, которые в целом определяются соотношением между радиусом кривизны силовой линии и ларморовским радиусом, существенным образом зависят от профилей плотности тока и магнитного поля. Так, в бифурцированных токовых слоях, в отличие от классических, могут существовать две рассеивающие области, вместо одной.

Список литературы

- [1] Y. Asano, T. Mukai, M. Hoshino, Y. Saito, H. Hayakawa, and T. Nagai. Evolution of the thin current sheet in a substorm observed by geotail. *J. Geophys. Res.*, 108, JA 2003.
- [2] A. Runov, R. Nakamura, W. Baumjohann, T. I. Zhang, and M. Volwerk. Cluster observation of a bifurkated current sheet. *Geophys. Res. Lett.*, 30:8–1 – 8–4, 2003.
- [3] E. G. Harris. On a plasma sheath separating regions of oppositely directed magnetic fields. *Nuovo Chimento*, 23:115–121, 1962.
- [4] А. Лихтерберг and М. Либерман. *Регулярная и стохастическая динамика*. 1984.
- [5] J. Buchner and L. M. Zelenyi. Regular and chaotic charged particle motion in magnetotail-like field reversals: 1. basic theory of trapped motion. *J. Geophys. Res.*, 94:11821–11842, 1989.
- [6] Н. Н. Боголюбов and Ю. А. Митропольский. *Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний*. М.: ФИЗМАТЛИТ.
- [7] Thomas J. Birmingham. Pitch angle diffusion in the jovian magnetodisc. *J. Geophys. Res.*, 29:2699, 1984.
- [8] R.L. Kaufmann, D.J. Larson, P. Beidl, and Ch. Lu. Mapping and energization in the magnetotail. 1. magnetospheric boundaries. *J. Geophys. Res.*, 98:9307–9320, 1993.
- [9] R.L. Kaufmann, D.J. Larson, P. Beidl, and Ch. Lu. Mapping and energization in the magnetotail. 2. particle acceleration. *J. Geophys. Res.*, 1993.
- [10] Sonnerup B. U. O. Adiabatic particle orbits in a magnetic null sheet. *J. Geophys. Res.*, 76:8211–8222, 1971.
- [11] А. И. Нейштадт. Об изменении адиабатического инварианта при переходе через сепаратрису в системах с двумя степенями свободы. *Прикладная Математика и Механика*, 51:750–757, 1987.

- [12] L. M. Zelenyi, H. V. Malova, V. Yu. Popov, D. C. Delcourt, and A. S. Sharma. Evolution of ion distribution function during the “aging” process of thin current sheets. *Advances in Space Research*, 31:1207–1214, 2003.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список работ, опубликованных диссертантом по теме защищаемой диссертации.

1. *Оводков Д.А., Попов В.Ю., Малова Х.В.* Динамика заряженных частиц в расщепленных тонких токовых слоях // Вестн. МГУ. 2006. серия 3, С. 10-13.
2. *Delcourt D. C., Ovodkov D. A., Popov V. Yu., Malova H. V., Zelenyi L. M.* // Do phase portraits resist current sheet bifurcation? *Advances in Space Research.*- 2006.- Vol.37.- Pp. 547-551.
3. The nonlinear particle dynamics in double-humped thin current sheets / Zelenyi L., Malova H., Delcourt D., Popov V., Ovodkov D., Sharma A. // St. Petersburg, Russia, Book of abstracts. 2004. May 24-28. P.168.
4. The nonlinear particle dynamics in double-humped thin current sheets / Ovodkov D., Popov V., Delcourt D., Malova H. // Proceedings of the 7th International Symposium for Space Simulations (ISSS-7) /Ed. Kyoto University, Japan. 2005. March 26-31. PP. 295-296.
5. Influence of nonlinear dynamics of charged particles on fine structure and dynamics of thin current sheets in the Earth’s magnetotail / Zelenyi L., Malova H., Popov V., Ovodkov D., Delcourt D., Sharma A. // *Geophysical Research Abstracts/European Geosciences Union, Vienne, Austria*, SRef-ID:1607-7962/gra/EGU05-A-03625.2005. April 24-29. P. 03625.
6. *Malova H. V., Ovodkova D. A., Zelenyi L. M.* On the quasi-adiabatic motion of charged particles in double-humped current sheets // Tsyndao, China, Book of Abstracts/ Russian-Chinese Conference on Investigations of Space Plasma. 2005. October. P.47.

7. *Ovodkov D. A., Malova H. V., Popov V. Yu.* Charged particle dynamics in double-humped current sheets//Book of Abstracts/St. Petersburg, Russia, Proc. 6-th Int. Conf. "Problems of Geocosmos". 2005. May 23-27. P. 162.
8. *Оводков Д.А., Попов В.Ю., Малова Х.В.* Динамика частиц в расщепленных тонких токовых слоях// Сборник тезисов международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов-2005», секция «Физика», Физический Факультет МГУ. 2005. С. 95.