

На правах рукописи

Максим Сергеевич ДОЛГОНОСОВ

**РЕЗОНАНСНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
КОГЕРЕНТНЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ПУЧКОВ  
УСКОРЕННЫХ ИОНОВ  
В МАГНИТОСФЕРНОМ ХВОСТЕ**

01.04.02 – теоретическая физика

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

*Долгоносков*

Москва 2007

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научные руководители:  
д.ф.- м.н. Л.М. Зеленый (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:  
д.ф.- м.н., И.И. Алексеев (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова)  
к.ф.- м.н., И.Ф. Шайхисламов (Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук)

Ведущая организация:  
Институт физики Земли Российской академии наук

Защита состоится 2 ноября 2007 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного Совета Д 002.113.03 ИКИ РАН по адресу, Москва, Профсоюзная ул., 84/32, 2-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН  
Автореферат разослан 1 сентября 2007 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета,  
к.ф.-м.н. Буринская Т.М.



# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Диссертация посвящена исследованию неадиабатического ускорения плазменного вещества в слабых магнитных полях, которое, по сути, является аналогом ускорения Ферми. Космическая эра, начавшаяся 50 лет назад, дала нам возможность исследования подобных процессов в околоземном пространстве, а именно, в пределах земной магнитосферы. Удивительным здесь является тот факт, что в результате неадиабатического ускорения частиц вместо термодинамически равновесной плазмы формируются филаментированные (как пространственно, так и энергетически) потоки частиц. Такого рода процессы являются внешним проявлением нелинейной динамики системы с несколькими степенями свободы, связанной, в частности, с появлением детерминистического хаоса. Однако в море хаоса существуют области «регулярности» (или резонансные области). Как раз именно эти области «регулярности» становятся источниками филаментированных ионных пучков, названных бимлетами (от англ. beamlet - пучочек).

Первые сообщения о наблюдениях бимлетов в геомагнитном хвосте были сделаны по данным спутника Интербол-2 в середине 80-х годов. Тогда же появились первые теоретические работы, описывающие механизм формирования бимлетов. Новый всплеск внимания к бимлетам возник после запуска Европейским космическим агентством в 2000 г. четырех идентичных аппаратов КЛАСТЕР (CLUSTER, <http://clusterlaunch.esa.int>), образующих в космосе тетраэдр. Данные этого уникального космического эксперимента выявили новые свойства космической плазмы, в том числе и бимлетов, что позволило создать некую эмпирическую классификацию различных типов бимлетов, основанную на различии энергетического спектра ионов в этих пучках. До настоящего времени развитой теории, проливающей свет на физические механизмы формирования бимлетов с различной дисперсией, предложено не было. Более того, интерпретации некоторых наблюдаемых свойств бимлетов, предложенные в различных работах, противоречили друг. Потребность в такой теории, в частности, связана и со следующим интересным свойством наблюдения бимлетов. В авроральной области (на расстояниях  $\sim 4-7 R_E$  от Земли) возможно наблюдение всего «ожерелья» бимлетов. Это связано с тем, что за счет схождения магнитных силовых линий по мере приближения к Земле, бимлеты пространственно сближаются, кроме того, скорость спутника в этой области в несколько раз больше, чем в дальнем геомагнитном хвосте ( $x \sim 40-100 R_E$ ), а пересечение всего «ожерелья» бимлетов происходит в течение короткого времени ( $t \sim 1-5$  мин). Как было показано в ранних теоретических работах (см., например, [4]), посвященных данному явлению, дисперсионная структура бимлетов очень чувствительна

к возмущению магнитного поля в областях генерации бимлетов в токовом слое. Поэтому наблюдения бимлетов в авроральной области могут играть роль практически мгновенного «слежка» топологии магнитного поля в дальних областях хвоста, близких к зоне пересоединения геомагнитного и межпланетного полей. Данный факт можно было бы использовать как метод «дистанционного зондирования» плазменных процессов, протекающих в токовом слое в дальнем геомагнитном хвосте ( $x > 10 R_E$ ). Однако, как было уже сказано, для этого необходимо более глубокое понимание природы бимлетов и их основных свойств.

### **Цель работы**

Целью данной диссертационной работы является детальное изучение свойств бимлетов (когерентных, локализованных и высокоэнергичных ионных пучков) в хвосте магнитосферы Земли. В работе построены и проанализированы модели, описывающие процессы формирования пучков и их основные свойства, дальнейшее распространение бимлетов в хвосте магнитосферы Земли, а также проимитированы различные условия наблюдения. Определенный интерес также представляло исследование условий наблюдения двух-пиковых функций распределения ионов по скоростям, во время регистрации бимлетов субспутниками европейского космического проекта КЛАСТЕР [13]. Достижение поставленных целей было связано с решением ряда конкретных задач:

1. Создание численной схемы, и дальнейшей ее реализации в численных кодах, для моделирования генерации бимлетов. Изучение условий генерации и общих свойств бимлетов.
2. Изучение влияния токов, созданных частицами, формирующими бимлет, на его свойства. Данные о собственных токах бимлетов должны быть получены в результате численного моделирования (результаты задачи №1).
3. Выявление универсальных закономерностей механизма генерации бимлетов. Анализ влияния модели магнитного поля на полученный результат.
4. Изучение условий пересечения бимлетов, сформировавшихся в соседних резонансных областях. Оценка геометрического расположения точки пересечения бимлетов относительно Земли для заданной модели магнитного поля.
5. Изучение пространственно-временных характеристик бимлета и возможная интерпретация данных космических экспериментов с учетом полученных результатов.

Полученные в диссертации результаты и теоретические предсказания предполагалось проверить на многочисленных случаях наблюдения бимлетов на спутнике КЛАСТЕР. Эта часть работы проведена совместно с к.ф.-м.н. Е.Е. Григоренко (ИКИ РАН). Стоит оговориться, что в геомагнитном хвосте наблюдается

множество ионных потоков различной природы, регистрируемых в различных частях геомагнитного хвоста и в разных его состояниях. Основными здесь являются BBF (Bursty Bulk Flow, см. например, [3]) и TDIS (Time-of-Flight Ion Structures, см. например, [8]). В задачи настоящей работы не входило изучение свойств такого рода структур, механизм генерации которых принципиально отличается от механизма образования юимлетов.

### **Научная новизна работы**

Моделирование динамики ансамбля частиц в геомагнитном хвосте, формирующих бимлеты, проводилось и ранее (см., например, [5]), но в рамках эмпирической модели геомагнитного хвоста (Цыганенко-89). В данной же работе моделирование было проведено в аналитической модели магнитосферного хвоста (модель Цвингманна [14]). Однако, как было показано в диссертационной работе, независимо от модели магнитного поля, общие свойства бимлетов воспроизводятся достаточно хорошо в обоих случаях. Все прочие результаты моделирования, представленные в работе, являются новыми и нигде ранее не приводились. Влияние нелинейных эффектов, основными из которых, как мы считаем, являются собственные токи бимлетов, ранее никогда не исследовалось. Впервые рассмотрены пространственно-временные свойства бимлетов, исследованы условия формирования двух-пиковых функций распределения ионов по скоростям в пограничной области плазменного слоя, проведены оценки перекрытия резонансных областей, внутри которых формируются бимлеты.

### **Научная и практическая ценность работы**

Полученные в диссертации результаты закладывают практические основы для методов дистанционной диагностики плазменных процессов, протекающих в токовом слое в дальнем геомагнитном хвосте, основывающихся на анализе дисперсионных свойств бимлетов. В частности, показано, что надежный мониторинг дисперсионных свойств бимлетов позволяет судить о вкладе собственных токов бимлетов в общий ток, поддерживающий обращенную конфигурацию магнитного поля, а величина модуляции нормальной компоненты магнитного поля в центре токового слоя за счет нелинейных эффектов, позволяет оценить размер магнитных островов и величину бифуркации поля в окрестности обращения магнитных силовых линий в дальних областях геомагнитного хвоста.

Универсальные свойства механизма ускорения ионов в центре токового слоя, найденные в диссертации, позволяют частично разрешить вопрос о разделении пространственно-временных характеристик бимлетов, неизбежно возникающий при интерпретации спутниковых данных. Найденные универсальные закономерности также дают дополнительную информацию о физических характеристиках электромагнитного поля в области ускорения.

Разработанные в диссертационной работе теоретические модели предсказывают условия наблюдения транзиентных эффектов, связанных, в первую очередь, с тем или иным режимом «включения» и «выключения» источника бимлетов в токовом слое.

### **Достоверность полученных результатов**

Особенностью диссертационной работы является попытка синергетически объединить разработку адекватных теоретических моделей с их дальнейшей апробацией на спутниковых наблюдениях, и далее – с постановкой новых нерешенных задач. Практически все теоретические представления, развиваемые автором, получили непосредственное экспериментальное подтверждение, а известным наблюдательным данным была дана непротиворечивая интерпретация.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации неоднократно были представлены на различных международных и российских конференциях:

1. International Conference PLASMA-2003, Warsaw, Poland (2003)
2. 36th COSPAR Scientific Assembly, Beijing, China (2006).
3. Western Pacific Geophysical Meeting, Beijing, China (2006).
4. «Нелинейные волны», Н.Новгород (2006).
5. 6 международная конференция «Problems of Geocosmos», Санкт-Петербург (2006).
6. Совете РАН по «Нелинейной динамике», Москва, (2006).
7. Conference «40 years Russian-French cooperation in space science», Moscow (2006).
8. Конференция-совещание по программе ОФН-16, Москва (2007).
9. International Assembly for Geomagnetism and Aeronomy, Perugia, Italy (2007).
10. IV международная конференция «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений», с.Паратунка, Камчатской обл. (2007).
11. Международная школа «Turbulence and Waves in Space Plasmas», L'Aquila, Italy (2007).

### **Личный вклад автора**

Все результаты, представленные в диссертации, за исключением приведенных в качестве иллюстрации экспериментальных данных (авторство в каждом конкретном случае указывается), были получены лично автором диссертации при поддержке научного руководителя и других соавторов публикаций. Соавторы публикаций, материал которых вошел в настоящую диссертацию, не

возражали против использования в данной работе совместно полученных научных результатов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из «Введения», 5 глав основного текста и «Заключения». Объем диссертации – 108 страниц. Библиография включает в себя 109 наименований. Диссертация содержит 30 рисунков.

### **Благодарности**

Хочу выразить глубокую благодарность моему научному руководителю, Льву Матвеевичу Зеленому, за его неоценимую помощь в освоении исследовательского подхода на интересном и непростом пути научного познания. Особую благодарность хотелось бы выразить Р.А. Ковражкину, В.А. Сергееву, А.И. Нейштадту и А.А. Васильеву за плодотворное обсуждение материалов диссертации, позволившее глубже понять суть исследуемых явлений. Автору посчастливилось сотрудничать с блестящими физиками – Vahe Peromian (UCLA) и Е.Е. Григоренко (ИКИ РАН), от которых он многому научился, и благодаря которым, ему удалось что-то сделать в науке. Автор также признателен другим талантливым коллегам и прекрасным людям за годы совместной работы: Х.В. Маловой, Т.М. Буринской, В.Ю. Попову, И.Л. Моисеенко, А.А. Чернышову, В.Л. Красовскому, А.В. Артемьеву, М.М. Могилевскому.

## **Содержание работы**

Во Введении обсуждаются актуальность и цели работы; формулируются вопросы, открытые к моменту начала работы над диссертацией, и намечаются пути их решения.

Глава 1 состоит из 6 параграфов. Данная глава посвящена теоретическому рассмотрению динамики частиц вблизи токового слоя хвоста магнитосферы Земли, следствием которой являются когерентные и пространственно локализованные пучки ионов, движущиеся вдоль силовых линий магнитного поля - бимлеты. В этой главе также получен универсальный закон, описывающий распределение по энергиям частиц бимлетов. Вкратце, представленные в данной главе теоретические выкладки можно свести к следующей цепочке рассуждений.

В области обращения магнитных силовых линий (окрестность точки  $z=0$ ) магнитное поле можно представить в виде:

$$\vec{B}(x, z) = B_0(x) \frac{z}{L} \vec{e} + B_n(x) \vec{e}_z, \quad (1)$$

где  $B_0(x)$  - продольная, а  $B_n(x)$  - нормальная компоненты магнитного поля,  $\vec{e}_x$  и  $\vec{e}_z$  - базисные вектора. Нормальную компоненту  $B_n(x)$  магнитного поля можно считать медленно меняющейся функцией  $L \frac{d \ln B_n(x)}{dx} \ll 1$ , что подтверждается экспериментальными данными [10]. Предположим существование постоянного электрического поля  $E_y$  во всей рассматриваемой нами области, возникающего вследствие движения магнитосферы внутри солнечного ветра. Как уже упоминалось, впервые механизм ускорения частиц в такой конфигурации был описан в работе [12]. В этой работе было показано, что в процессе вращения частицы в магнитном поле, представленным уравнением (1), и постоянном электрическом поле  $E_y$  энергия частицы увеличивается. В приближении изначально холодной плазмы конечную скорость и энергию частицы можно выразить в виде:

$$\Delta V = 2V_c = 2cE_y / B_n, \quad (2)$$

$$\Delta W = m\Delta V^2 / 2 = 2mV_c^2 = 2mc^2 E_y^2 / B_n^2, \quad (3)$$

где  $V_c$  - скорость конвекции плазмы в скрещенных полях  $E_y$  и  $B_n(x)$ . Из этих соображений можно сразу сделать вывод: таким механизмом ионы должны ускоряться до гораздо более высоких энергий, чем электроны.

В работе [2] было показано, что магнитный момент сохраняется с точностью  $\Delta\mu/\mu \sim \exp(-\kappa^2)$ , где параметр определяется как:  $\kappa(x) = (R_{min}/\rho_L)^{1/2}$ ,  $R_{min}$  - минимальный радиус кривизны силовых линий магнитного поля,  $\rho_L$  - ларморовский радиус частицы [6]. Для модели параболического магнитного поля этот параметр  $\kappa(x)$  определяется как:

$$\kappa(x) = \sqrt{\frac{R_{min}}{\rho_{max}}} = \sqrt{\frac{eLB_n^3}{2mc^2 B_0 E_y}} = \alpha B_n^{3/2}, \quad (4)$$

где  $\alpha = (eL/2mc^2 E_y B_0)^{1/2}$ . Поэтому до тех пор, пока  $\kappa > 1$ , магнитный момент  $\mu$  достаточно точно описывает динамику частиц. Практически для большинства реальных значений магнитного поля в магнитосферном хвосте электроны замагничены (их динамику можно характеризовать магнитным моментом  $\mu$ ). В случае, когда  $0 < \kappa < 1$ , описание динамики частиц строится на сохранении квазиadiaбатического инварианта  $I_z$ , предложенного в работе [11]. Как было показано в этой работе, движение иона в поле, задаваемом уравнением (1), представляет собой наложение двух осцилляций, имеющих разный временной масштаб: линейных и медленных осцилляций по  $x$  и нелинейных и быстрых по  $z$ . Временное различие этих двух колебаний позволяет ввести в качестве одного из инвариантов движения новый адиабатический инвариант  $I_z$ , связанный с быстрыми осцилляциями по  $z$ , и фактически представляющий собой интеграл действия:



$$I_z = \frac{1}{2\pi} \oint \dot{z} dz \quad (5)$$

В окрестности  $z=0$  квазиadiaбатический инвариант  $I_z$  испытывает скачок при пересечении сепаратрисы – области обращения магнитных силовых линий. В работе [1] получена формула, определяющая скачок адиабатического инварианта  $\Delta I_z$  как функцию некоторой случайной величины  $\theta$ , являющейся по существу фазой быстрого вращения при пересечении сепаратрисы:

$$\Delta I_z = -\frac{3}{2} \kappa(x) Y \ln|2 \sin \theta|, \quad (6)$$

где  $Y = \sqrt{1 - I_z^{4/3}} \approx 1$  для  $I_z \approx 0$ . В нашем случае частица пересекает область сепаратрисы дважды - на входе и на выходе из токового слоя. Соответственно, адиабатический инвариант  $I_z$  частицы испытывает скачки дважды:

$$\Delta I_z^{in} = -\frac{3}{2} \kappa(x) \ln|2 \sin \theta|, \quad (7)$$

$$\Delta I_z^{out} = \frac{3}{2} \kappa(x) \ln|2 \sin(\theta + \Delta\theta)|, \quad (8)$$

$$\Delta I_z^{sum} = -\frac{3}{2} \kappa(x) \ln|\cos \Delta\theta + \text{ctg} \theta \sin \Delta\theta|, \quad (9)$$

где  $\Delta\theta$  является набегом фазы в промежутке между двумя последовательными скачками инварианта  $I_z$ . В общем случае, если  $\Delta\theta \neq \pi N$ ,  $N=1,2,3\dots$ , суммарный скачок инварианта  $I_z$  является случайной величиной, и, как следствие, в системе возникает детерминистический хаос. Однако если выполняется условие  $\Delta\theta = \pi N$ , уравнение (9) больше не зависит от случайной величины  $\theta$ , и, более того, скачок инварианта  $I_z^{in}$  на входе в токовый слой компенсируется скачком инварианта  $I_z^{out}$  на выходе из токового слоя, так что  $I_z^{sum} = 0$ . В этом случае вся энергия, набранная частицей за время ее вращения внутри токового слоя, заключена в поступательном движении вдоль магнитных силовых линий:  $V_{\parallel} \gg V_{\perp}$ . Таким образом, частицы, ускоренные в тех местах, где выполняется условие  $\Delta\theta = \pi N$ , формируют когерентные пучки ускоренных частиц - бимлеты. Стоит отметить следующий факт. Если  $\text{mod}(\Delta\theta, 2\pi) = 0$  - частица вылетает в противоположную полуплоскость относительно своего начального положения, в случае  $\text{mod}(\Delta\theta, 2\pi) = \pi$ , частица из токового слоя вылетает в ту же полуплоскость, из которой она прилетела. Токовый слой подобно дифракционной решетке селективно рассеивает и коллимирует частицы, постоянно приходящие из мантии и/или ионосферы.

Набег фазы  $\Delta\theta$  между двумя последовательными пересечениями сепаратрисы можно вычислить по следующей формуле [6]:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi I_z}{\kappa(x_N)} \int_{k_0}^1 \frac{k dk}{f_A^2 \sqrt{1 - (I_z / f_A)^{4/3}}} = \frac{\pi C}{\kappa(x_N)}, \quad (10)$$

$$f_A = (1 - k^2)K(k) + (2k^2 - 1)E(k), \quad (11)$$

где  $x_N$  – местоположение  $N$ -го резонанса, а  $K(\kappa)$  и  $E(\kappa)$  - полные эллиптические интегралы. Вычисления показывают, что  $C=0.761$ . Следовательно, резонансное условие выполняется при условии:

$$\kappa(x_N) = \frac{C}{N}, \quad (12)$$

Из уравнений (3), (4) и (12) можно найти универсальный закон (универсальный скейлинг), связанный с внутренней природой неадиабатического механизма ускорения частиц. Этот закон связывает энергию  $W_N$  частиц  $N$ -го резонанса с самим номером резонанса  $N$ :

$$W_N = 2N^{4/3} \left( \frac{em^{1/2} E_y^{1/2}}{B_0 C} \right)^{2/3}, \quad (13)$$

Важно, что закономерность распределения энергий бимлетов не зависит от конкретной модели магнитного поля и величины электрического поля (от этих параметров зависит только местоположение резонансов  $x_N$ ). В этом смысле оказывается, что неадиабатическое ускорение частиц имеет свои общие универсальные законы, инвариантные относительно замены модели магнитного поля.

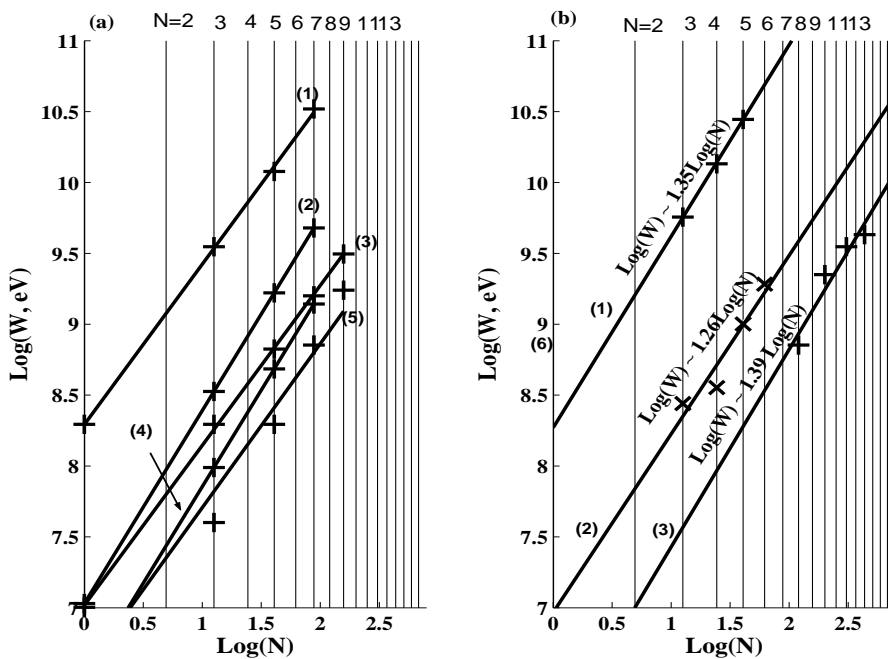
Глава 2 состоит из 4 параграфов. В данной главе описывается численная схема, описывающая формирование бимлетов в хвосте магнитосферы Земли. Основу данной численной схемы составляет моделирование динамики ансамбля частиц (ионов) в заданном магнитном поле (модель Цвингманна, [14], параметры этой модели:  $q=1/3$ ,  $x_L=45 R_E$ ,  $L=3 R_E$ ) при наличии постоянного и однородного электрического поля ( $E_y=0.1$  мВ/м). Траектории частиц вычислялись методом Рунге-Кутты 4 порядка точности. Частицы выпускались из источника одновременно, их общее число варьировалось в зависимости от целей моделирования от  $2 \times 10^4$  до  $7 \times 10^4$ . Информация о траекториях частиц собиралась на виртуальных детекторах – плоскостях  $x=const$ ,  $y=const$ , расположенных эквидистантно ( $\Delta x=5 R_E$ ,  $\Delta y=0.25 R_E$ ). Z-детектор был установлен только один,  $z=0$ . Данные, полученные с этого детектора, предоставляли информацию о первом пересечении частицами токового слоя, что было необходимо на начальном этапе юстировки модели. Параметры источника частиц, его местоположение в геомагнитном хвосте и параметры магнитного поля были выбраны таким образом, чтобы соответствовать реальным параметрам магнитного поля на ночной стороне Земли [10]. При этом оказывается, что частицы могут достичь сразу нескольких «резонансных областей» (~5-8). Последнее обстоятельство позволяет воспроизводить генерацию достаточного для различных задач исследования число бимлетов.

В связи с большим объемом вычислительных данных программный код был написан с использованием библиотеки MPI, позволяющей проводить вычисления на кластерных системах. Большая часть вычислений была проведена на кластерных системах Межведомственного Суперкомпьютерного Центра РАН (<http://www.jscc.ru>).

Первые результаты моделирования генерации бимлетов показали, что данная схема достаточно адекватна и ее результаты хорошо согласуются с результатами предыдущих попыток моделирования бимлетов в геомагнитном хвосте (см., например, 4-5]). Нам удалось сравнить предсказания математической модели, описанной в главе 1, с результатами моделирования. Оказалось, что теоретическая модель полностью подтверждается численными данными.

Как уже упоминалось, дисперсионная структура бимлетов очень чувствительна к возмущению магнитного поля в токовом слое, что и подтвердилось в ходе численных экспериментов. В диссертации приведены результаты влияния того или иного возмущения магнитного поля на конечную дисперсионную структуру бимлетов. В будущем планируется наладить методику восстановления профиля магнитного поля в области ускорения частиц на основе полученной информации о вкладе различного рода возмущений в конечную дисперсию бимлетов.

Глава 3 состоит из 6 параграфов. В этой главе проводится проверка, по-



**Рис.1.** Проверка универсального скейлинга по а) данным моделирования (использованы данные моделирования диссер-

лученного ранее в главе 1, универсального скейлинга. Как было показано в главе 1:  $\log W_N \sim 4/3 \log N$ , где  $W_N$  – энергия бимлета, пришедшего из  $N$ -ой резонансной области. Для проверки этого теоретического предположения были привлечены данные численного моделирования, описанные в главе 2 и работе [5], а также данные космического аппарата *КЛАСТЕР*. Показано, что как для

экспериментальных данных, так и для результатов моделирования угол наклона  $k$  всех кривых ( $W_N \sim k \log N$ ) лежит в диапазоне  $k \in [1.2; 1.4]$  (Рис.1). Таким образом, несмотря на ряд ограничений (геометрия модели, её линейность, пренебрежение волновыми явлениями) результаты теории, описанной в главе 1, достаточно хорошо согласуются с уже достаточно многочисленными данными измерений плазменных пучков.

В этой же главе приведены оценки максимального числа резонансных областей возможных для данного профиля электромагнитного поля. Перекрывание резонансных областей приводит к формированию одного мощного пучка с достаточно большим разбросом ионов по скоростям вместо пространственно изолированных и почти моноэнергетических структур. Таким образом, число резонансных областей на самом деле ограничено. В нашей модели максимально возможное число бимлетов равно 13.

Следующее явление, которому было дано объяснение в этой главе – наблюдение двухпиковых функций распределения ионов по скоростям в пограничной области плазменного слоя (т.е. в области распространения бимлетов), также выполненные на спутнике *КЛАСТЕР* [13]. Данное явление является следствием пересечения бимлетов, вылетающих из соседних резонансных областей. Возможность этого эффекта связана с тем, что источники разных бимлетов в токовом слое могут быть сильно разнесены в пространстве, и тем, что средние скорости частиц в каждом источнике могут сильно различаться. Благодаря этому вследствие поперечного дрейфа частиц по направлению к токовому слою пучки могут «сфокусироваться» в одну точку – точку наблюдения. В диссертации выполнены количественные оценки этого эффекта, а также приведена формула, в общем виде показывающая, на каком расстоянии от Земли возможно пересечение бимлетов с различными номерами:

$$X_{N-1,N+1} = \frac{q\gamma\sigma(N^2-1)^{2/3} \ln\left(\frac{N+1}{N-1}\right)}{\left((N+1)^\gamma - (N-1)^\gamma\right)} + b(N-1)^{2/3}, \quad (14)$$

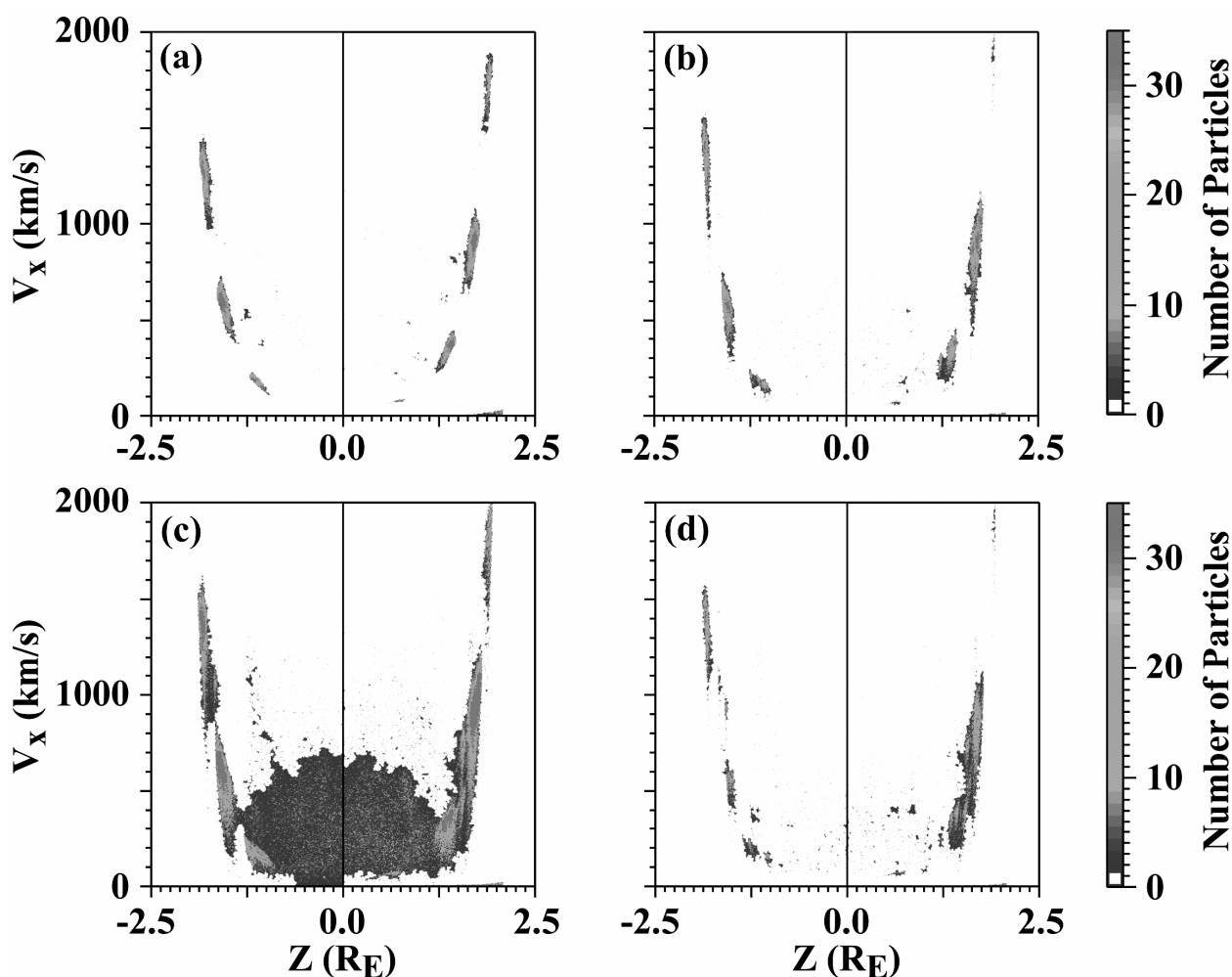
$$b = \left(\frac{\alpha}{C}\right)^\gamma = \left(\frac{eL^2}{mqx_L^{2q}CE_y}\right)^\gamma, \quad \sigma = 2\left(\frac{eLE_y^2}{mB_0C^2}\right)^{1/3}, \quad \gamma = -\frac{1}{1+q}$$

где  $B_0 = 10$  нТл. Для нашей модели магнитного поля, пересечение бимлетов с номерами, например, 4 и 6 должно произойти на расстоянии  $\sim 14 R_E$  от Земли.

Глава 4 состоит из 4 параграфов. В этой главе сделаны оценки влияния нелинейных эффектов на дисперсионную структуру бимлетов. Предполагается, что основным нелинейным эффектом, оказывающим влияние на модификацию бимлетов, являются собственные токи бимлетов, протекающие в центре токового слоя. Для оценки вклада собственных токов бимлетов были использованы данные моделирования, полученные в главе 2, а именно, данные у-детекторов, на которых отображалась информация о токах частиц, текущих поперек хвоста. Стоит отметить, что мы специально никоим образом не выделяли популяцию частиц, формирующих бимлеты. В процессе ускорения ионов в токовом слое система самостоятельно «выбирала» из общего потока частиц ту группу частиц, которая вносила наибольший вклад в поперечный ток.

Нелинейные эффекты «укручают» дисперсию бимлетов, т.е. энергия внутри данного бимлета более быстро растет с увеличением широты наблюде-

ния, чем в невозмущенном случае (Рис.2). Но важно, что дисперсия, как правило, остается «нормальной», т.е. растет с увеличением широты. Бимлеты с нормальной дисперсией неоднократно наблюдались в авроральной области как на спутниках Интербол, так и на спутниках *КЛАСТЕР*. Также удалось показать, что под влиянием нелинейных эффектов в источнике могут формироваться и бимлеты с аномальной дисперсией. Но дисперсионные свойства бимлета меняются за время его движения от места генерации до точки наблюдения: за счет эффекта фильтрации частиц по скоростям при распространении к Земле происходит «вращение» бимлета. Выяснение причин формирования бимлетов с аномальной дисперсией и проблема сохранения их начальной дисперсии по мере распространения к Земле требуют дальнейшего исследования.



**Рис.2.** Модификация дисперсий бимлетов в зависимости от уровня возмущения: 0, 0.05, 0.11, 0.17. Параметром нелинейности является интегральная величина среднеквадратичного отклонения возмущенного профиля магнитного поля в центре токового слоя от начального профиля магнитного поля в той же области.

Глава 5 состоит из 5 параграфов. В этой главе сделана попытка соединить теоретическую модель с реальными экспериментальными наблюдениями бим-

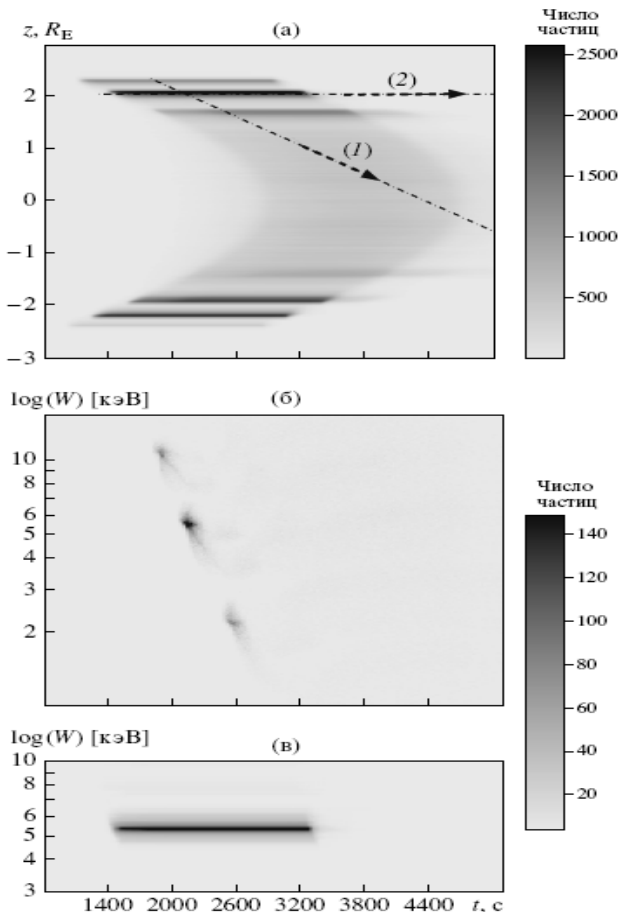
летов на спутнике *КЛАСТЕР*. Дело в том, что анализ экспериментальных данных [7] показал, что характерное время наблюдения бимлетов более 10 мин. Конечность времени жизни источника бимлетов в токовом слое ставит вопрос о теоретическом моделировании проявления краевых эффектов и условий их наблюдения.

Указанное выше исследование проводилось на основе данных численного моделирования. Для этого был использован результат работы исходного  $\delta$ -образного источника частиц, который можно рассматривать как функцию Грина  $G(z, t)$  нашей модели геомагнитного хвоста. Результат работы произвольного источника  $f(t)$  можно получить, вычислив интеграл Дюамеля (или интеграл - свертки):

$$\Psi(z, t) = \int G(z, t' - t) f(t') dt', \quad (15)$$

Таким образом, можно моделировать результат работы источника, существующего в течение некоторого конечного времени. Конкретный вид функции

$f(t)$  не столь важен для настоящего качественного исследования (он может изменить лишь величину интенсивности пучка в данный момент времени). Результат работы постоянного источника в токовом слое в течение 30 мин представлен на Рис.3а. На этом же рисунке представлены траектории спутника в случае «быстрого» и «медленного» пересечения популяции бимлетов.



**Рис.3. а)** Популяция бимлетов как результат работы постоянного источника в токовом слое в течение 30 мин. Стрелками указано направление при быстром и медленном пересечении спутником структуры бимлета. Соответствующие спектрограммы ионов показаны на панели **б)** и **в).**

При быстром пересечении Пограничной Области Плазменного Слоя (ПОПС) спутником бимлеты на спектрограмме будут представлены в виде серии мелкомасштабных структур (при условии хорошего энергетического и временного разрешений регистрирующего их прибора) (Рис.3б).

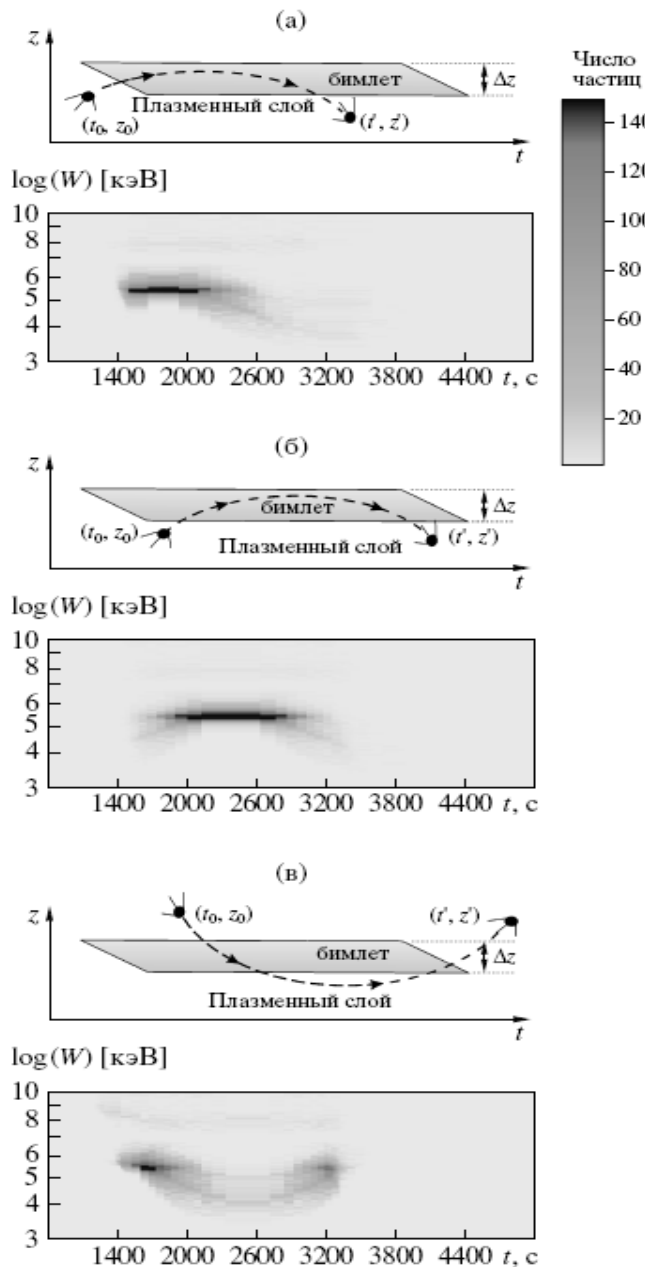
Случай медленного пересечения общей структуры бимлетов хотя и довольно тривиален, но позволяет дать нижнюю оценку времени существования бимлета – источник бимлетов функционирует, по крайней мере, в течение всего времени его наблюдения на спутнике (Рис.3в). При этом спутник может довольно долго находиться

внутри бимлета как пространственной структуры. Сделать какие-либо выводы о существовании других бимлетов в таком случае уже не представляется возможным. Прекращение наблюдения бимлета может быть связано как с прекращением работы источника, так и выходом спутника из области распространения

бимлета.

Самым интересным и, по-видимому, самым реалистичным является случай осцилляций ПОПС относительно спутника. Возможность такого рода колебаний (не всегда гармонических) неоднократно обсуждалась в работах (см., например, [9]). Колебания (flapping motions) могут быть связаны с динамикой токового слоя, имеющего свою историю развития. Многообразие направлений, под которыми спутник может пересекать бимлет, дает возможность исследовать явные проявления временных эффектов в характеристиках бимлетов. В качестве типичных случаев пересечения мы выбрали 3 варианта: а) начало наблюдения бимлета в момент прихода первых самых энергичных частиц и окончание наблюдения все еще существующей структуры за счет выхода из области распространения в Плазменный Слой (ПС); б) вход и выход из бимлета как пространственной структуры; в) вход в существующий бимлет и выход из бимлета как пространственной структуры в момент окончания работы источника, когда возможно наблюдение транзитных эффектов (см. Рис.4 а,б,в).

В первом случае событие начинается с регистрации ионов, имеющих некоторую величину энергии, и продолжается до момента регистрации ионов с некой мак-



**Рис.3. Верхняя панель.** Показана точка входа и выхода из бимлета как пространственной структуры. **Нижняя панель.** Приведена соответствующая данному случаю спектрограммы энергичных частиц (результаты моделирования).

симальной величиной энергии для данного события (может не совпадать с максимальной энергией частиц в бимлете, если спутник не выходит из него) (Рис.4а). А затем, по мере движения спутника к экватору, величина наблюдаемых энергий падает до минимального значения энергии, существующего в данном бимлете. Сравнительный анализ энергий частиц в начале наблюдения и после прекращения наблюдения бимлета в приведенном случае позволяет заключить, что нам удалось увидеть транзитный эффект - наблюдение начала функционирования источника бимлета в токовом слое. Таким образом, если наблюдение бимлета заканчивается регистрацией более низких энергий по сравнению с энергиями ионов в начальный момент регистрации бимлета, причем при этом спутник выходит из ПОПС или в ПС высоко – это может свидетельствовать о проявлении временных эффектов в наблюдении бимлета (прекращении функционирования источника в токовом слое). Во втором варианте пересечения бимлета вследствие колебательного движения ПОПС относительно наблюдение начинается с минимальных энергий и заканчивается на тех же энергиях, но бимлет наблюдается лишь как пространственная структура (Рис.4б). Последний из указанных выше вариантов пересечения бимлета является симметричным (по времени) отображением первого варианта (Рис.4в).

Таким образом, если наблюдение какого-либо бимлета начинается (заканчивается) «средними» энергиями, т.е. в последующие моменты времени регистрируются менее (более) энергичные частицы за счет уменьшения (увеличения) широты наблюдения – подобные экспериментальные данные также могут свидетельствовать о влиянии временных эффектов на формирование структуры бимлета.

## **Положения , выносимые на защиту**

1. Получен универсальный закон (скейлинг), связывающий энергию бимлета  $W_N$  с номером резонанса  $N$ , в котором произошло ускорении частиц:  $\log(W_N) = 4/3 \log N + Const$ . Показано, что скейлинг с достаточно хорошей точностью подтверждается как результатами моделирования, так и спутниковыми данными (данные спутника *КЛАСТЕР*).

2. Показано, что двухпиковые функции распределения ионов в ПОПС, часто наблюдаемые в эксперименте, являются следствием пересечения бимлетов. Приведены расчеты показывающие, на каком расстоянии от Земли в зависимости от параметров геомагнитных полей могут пересечься два бимлета, вылетающих в одну полусферу.

3. Показано, что собственные токи бимлетов, меняя местоположение областей, в которых происходит генерация пучков, приводят к формированию бимле-



тов как с нормальной, так и аномальной дисперсией. Однако, вероятность наблюдения бимлетов с аномальной дисперсией вблизи Земли уменьшается за счет эффектов фильтрации частиц по скоростям, что приводит к «вращению» бимлета.

4. Показано, что ограниченность времени «жизни» источника бимлетов в токовом слое характеризуется:

- с отсутствием минимально низких энергий, характерных для данного бимлета, при пересечении спутником бимлета со стороны низкоэнергичной части пучка (начало работы источника в токовом слое)
- с отсутствием максимально высоких энергий, характерных для данного бимлета, при пересечении спутником бимлета со стороны низкоэнергичной части пучка (окончание функционирования источника в токовом слое)

Только в указанных выше случаях возможно наблюдение транзитных эффектов. Сделан вывод, что вероятность наблюдения начала или окончания функционирования источника должна быть достаточно мала (7.5-10% от общего числа наблюдений бимлетов).

## **Публикации по теме диссертации**

1. Zelenyi L. M., Dolgonosov M. S., Peromian V., Ashour-Abdalla M. Effects of nonlinearity on the structure of PSBL beamlets // *Geophys.Res.Lett.* 2006. V.33. P.18103. DOI:10.1029/2006GL026176.
2. Зеленый Л.М., Долгоносов М.С., Григоренко Е.Е., Сово Ж.-А. Универсальные закономерности неадиабатического ускорения ионов в токовых слоях // *Письма в ЖЭТФ.* 2007. Т.85. №4. СС.225-231.
3. Долгоносов М.С., Зеленый Л.М., Григоренко Е.Е., Сово Ж.-А. Транзитные свойства пространственных структур в пограничной области плазменного слоя // *Космические Исследования.* 2007. Т.45. №5. СС. 1-9.

**Автор диссертации принимал участие в следующих работах на другие темы:**

1. Zelenyi L.M., Dolgonosov M.S., Bykov A.A., Popov V.Yu., and Malova H.V., Influence of trapped plasma on the structure of collisionless thin current sheets // Space Research. 2002. V.40. N4. PP.385-394.
2. Dolgonosov M.S., Zelenyi L.M., Malova H.V. Influence of the trapped plasma on the structure of forced current sheet // Proceedings of the 27th General Assembly of EGS. 2002. E-book.
3. Dolgonosov M.S. Influence of a weak magnetic field on properties of nonlinear wave-particle interactions // Proceedings of the International Conference PLASMA-2003. 2003. E-book P.7.2.

## **Список литературы**

1. Нейштадт А.И. Скачки адиабатического инварианта при пересечении сепаратрисы // Физика Плазмы. 1986. Т.12. С.992.
2. Чириков Б.В. Устойчивость движения заряженной частицы в магнитной ловушке // Физика Плазмы. 1978.V.4. С. 521.
3. Angelopoulos, V., Baumjohann, W., Kennel et al. Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet // J.Geophys.Res. 1992. V.97. PP.4027-4039.
4. Ashour-Abdalla M., Berchem J. P., Buechner J., Zelenyi L. M. Shaping of the magnetotail from the mantle - Global and local structuring // J.Geophys.Res. 1993. V.98. P. 5651.
5. Bosqued J. M., Ashour-Abdalla M., El Alaoui M., Perroomian V., Zelenyi L.M., Escoubet C. P. Dispersed ion structures at the poleward edge of the auroral oval: Low-altitude observations and numerical modeling // J.Geophys.Res. 1993. V.98. P. 19181.
6. Buechner J., Zelenyi L. M. Regular and chaotic charged particle motion in magnetotail-like field reversals. I - Basic theory of trapped motion // J.Geophys.Res. 1989. V.94. P. 11821.
7. Grigorenko, E.E., Sauvaud J.-A., Zelenyi L.M. Spatial-Temporal characteristics of ion beamlets in the plasma sheet boundary layer of magnetotail // J.Geophys.Res. 2007. V.112. P.5218.
8. Sauvaud, J.-A., Popescu, D., Delcourt, Brittnacher, M., Sergeev, V., Kovrazhkin, R. A., Mukai, T., Kokubun, S. Sporadic plasma sheet ion injections into the high-altitude auroral bulge: Satellite observations // J.Geophys.Res. 1999. V.104. P.28565.
9. Sergeev V., Runov A., Baumjohann W. Current sheet flapping motion and structure observed by Cluster // Geophys.Res.Lett. 2003. V.30. P.60.

10. Slavin J. A., Smith E. J., Sibeck D. G., Baker D. N., Zwickl R. D. An ISEE 3 study of average and substorm conditions in the distant magnetotail // J.Geophys.Res. 1985. V.90. P. 10875.
11. Sonnerup B. U. O. Adiabatic particle orbits in a magnetic null sheet. // J.Geophys.Res. 1971. V.76. P. 8211.
12. Speiser T. W. Particle trajectories in model current sheets, 1, Analytical Solutions // J. Geophys. Res. 1965. V.70. P. 4219.
13. Zelenyi L.M., Grigorenko E.E., Sauvaud J.-A., Maggiolo R. Multiplet structure of acceleration processes in the distant magnetotail // Geophys.Res.Lett. 2006. V.33. P.6105.
14. Zwingmann W. Self-consistent magnetotail theory - Equilibrium structures including arbitrary variation along the tail axis // J.Geophys.Res. 1983. V.88. P.9101.