

ПО ИТОГАМ ПРОЕКТОВ
РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Проект РФФИ # 01-02-16367

Пространственно-временные ионные структуры в хвосте магнитосферы Земли: бимлеты, как результат неадиабатического импульсного ускорения плазмы

Л. М. Зеленый⁺¹⁾, Е. Е. Григоренко^{+* 1)}, А. О. Федоров^{+△}

⁺ Институт космических исследований РАН, 117810 Москва, Россия

^{*} Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына,
МГУ им. М. В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

[△] Centre d'Etude Spatial des Rayonnements, 4346-31028 Toulouse, France

Поступила в редакцию 13 октября 2004 г.

Рассмотрены свойства высокоскоростных пучков ионов (бимлетов), наблюдаемых в пограничной области плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли в течение коротких интервалов времени (1–2 мин). Бимлеты являются результатом нелинейных импульсных ускорительных процессов, происходящих в токовом слое дальних областей геомагнитного хвоста. Двигаясь затем к Земле вдоль силовых линий магнитного поля, они регистрируются в хвосте магнитосферы (в пограничной области плазменного слоя) и в высокоширотной части авроральной области в виде коротких всплесков энергичных ионов (с энергиями ~ несколько десятков кэВ). Методом наложения эпох определен размер области локализации бимлетов в хвосте и в авроральной области и показано, что бимлеты сосредоточены в узкой области вблизи границы плазменного слоя, широтный размер которой не превышает 0.8° . Тем самым подтверждены предсказания теории о том, что неадиабатическое резонансное ускорение ионов происходит в пространственно ограниченной области вблизи сепаратриссы, разделяющей открытые силовые линии магнитного поля и замкнутые силовые линии, содержащие горячую и изотропную плазму плазменного слоя. На основе данных многоспутниковых измерений проекта CLUSTER изучена пространственная структура бимлетов и обнаружено, что с бимлетами связана распространяющаяся к Земле альвеновская волна, возникающая в результате возбуждения шланговой неустойчивости в момент выхода ионного пучка из токового слоя в высокоширотную область дальнего хвоста магнитосферы Земли. Произведена оценка размеров бимлета в продольном (вдоль направления магнитного поля) и в поперечном направлениях. Установлено, что бимлет представляет собой вытянутую вдоль магнитного поля динамическую плазменную структуру, продольный размер которой в сотни раз превышает поперечный.

PACS: 94.30.Ej, 94.30.Gm

Введение

Геомагнитный хвост земной магнитосферы с момента его открытия в конце 60-х годов привлекает внимание исследователей как один из наиболее сложных и интересных объектов в космической физике. Он образуется на ночной стороне Земли в результате вытягивания силовых линий магнитного поля Земли потоком плазмы солнечного ветра (СВ) непрерывно движущимся от Солнца (рис.1). С

точки зрения физики плазмы, геомагнитный хвост представляет собой грандиозную самосогласованную магнито-плазменную конфигурацию ($\beta \approx 1$), в которой накапливается энергия, поступающая в магнитосферу из СВ. Эта энергия высвобождается затем либо взрывообразным образом, вызывая магнитные суббури, либо небольшими порциями посредством ускорения частиц. Заряженные частицы, попадающие в магнитосферу преимущественно из ионосферы и СВ (за исключением возмущенных периодов – преимущественно из СВ), ускоряются в токовом слое гео-

¹⁾ e-mail: lzelenyi@iki.rssi.ru, elenagrigenko2003@yahoo.com

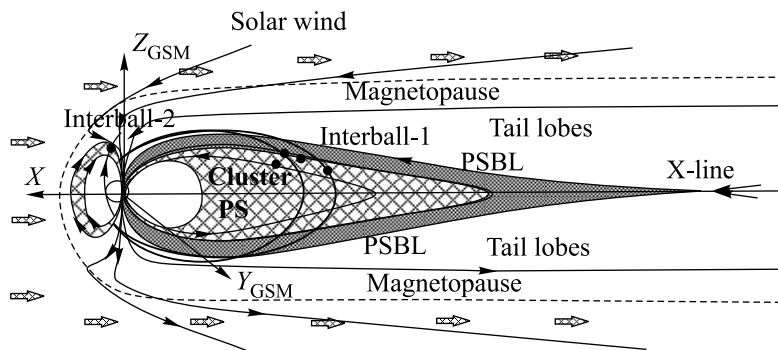


Рис.1. Схема строения магнитосферы и схематическое расположение орбит спутников Интербол-1, -2 и CLUSTER

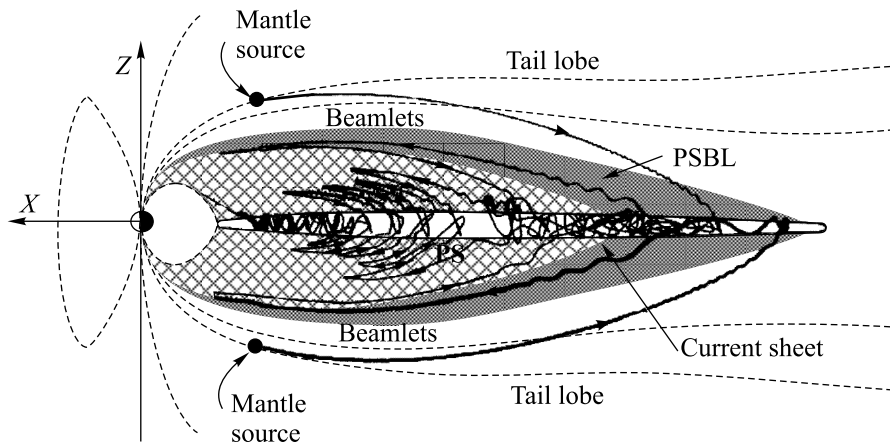


Рис.2. Схематическое изображение траекторий частиц в плоскости (X, Z) , движущихся из источника в мантии и взаимодействующих с токовым слоем. В зависимости от локальных условий в области взаимодействия частицы могут либо претерпеть сильное рассеяние и быть захвачены внутри токового слоя, либо выйти из токового слоя и двигаться вдоль спайсеровских орбит к Земле. Эти частицы и формируют бимлеты, наблюдаемые в ПОПС

магнитного хвоста до огромных скоростей (порядка нескольких тысяч км/с). Загадка такого необычайно эффективного ускорения плазмы в хвосте магнитосферы Земли уже в течение нескольких десятилетий стимулирует многочисленные теоретические и экспериментальные исследования. В конце 80-х годов стало ясно, что ускорение ионов в токовом слое должно происходить вблизи сепаратриссы, разделяющей замкнутые, пересекающие токовый слой силовые линии магнитного поля, населенные горячей плазмой плазменного слоя (ПС), и еще открытые силовые линии высокоширотной части хвоста, один конец которых связан с ионосферой, а другой находится в СВ [1–3]. Ускоренные в области сепаратриссы потоки ионов движутся затем к Земле внутри узкой области, расположенной вдоль границы, разделяющей ПС и сравнительно пустую (лишенную, по крайней мере, горячей плазмы) высокоширотную область хвоста (рис.2). Эта переходная область, которая фактически разделяет два полупространства с различной то-

пологией магнитного поля и с различными плазменными режимами, то есть, по сути, является присепаратриссным слоем, была названа пограничной областью плазменного слоя (ПОПС). Таким образом, в ПОПС, как в зеркале, отражаются сложные нелинейные ускорительные процессы, происходящие в дальнем хвосте и практически недоступные измерениям “in situ”, кроме того, эта область является “каналом”, по которому энергия, высвобождаемая в дальних областях хвоста, поступает во внутреннюю магнитосферу. Первоначально считалось, что источником ускорения ионов в токовом слое является крупномасштабное пересоединение, описываемое известной моделью Петчека и поэтому генерируемые им потоки ускоренной плазмы, которые затем коллимируются в ПОПС, также должны быть крупномасштабными [4, 5]. В этой связи также считалось, что появление потоков ускоренной плазмы на границе ПС связано с развитием суббурь, то есть ПОПС существует только во время активных периодов [6]. Позднее, благодаря

многочисленным наблюдениям, выполненным в хвосте космическими аппаратами ISEE-1,2, стало ясно, что ПОПС является постоянно существующей частью хвоста, так как наблюдается и в течение длительных спокойных периодов.

Во многих теоретических работах [7, 8] показывалось, что в токовом слое ионы не имеют гладких адиабатических траекторий, а движутся хаотически по гораздо более сложным неадиабатическим траекториям, возникающим из-за нарушения для описания их движения приближения ведущего центра. Такие частицы могут испытывать существенное стохастическое рассеяние при пересечении токового слоя, а в ряде случаев их движение может полностью хаотизоваться [9–11]. Причем судьба частицы после ее взаимодействия с токовым слоем определяется величиной так называемого параметра адиабатичности $K = \sqrt{R_{\text{curv}}/\rho_{\text{max}}}$, где R_{curv} – локальный радиус кривизны магнитных силовых линий, ρ_{max} – максимальное значение локального ларморовского радиуса частиц.

В зависимости от величины K частицы могут либо испытать сильное рассеяние и быть захвачены в токовом слое, либо выйти из токового слоя, двигаясь в ПОПС по незамкнутым (так называемым спайсеровским) орбитам (рис.2). Аналитическая теория [10] была впоследствии подтверждена численным моделированием на основе крупномасштабной кинетической модели движения ионов в токовом слое [12]. В работе [12] было показано, что потоки ускоренных ионов, движущиеся в ПОПС, не являются крупномасштабными структурами, а представляют собой совокупность множества разделенных в пространстве узких ионных пучков, причем скорость этих пучков увеличивается с ростом высоты их наблюдения над нейтральным слоем (НС). Эти ионные пучки были названы бимлетами. Впоследствии результаты численного моделирования были подтверждены многочисленными экспериментальными наблюдениями [13–16]. Таким образом, сложная структура ПОПС отражает нелинейную самосогласованную магнитно-плазменную конфигурацию хвоста магнитосферы, которая находится в устойчивом равновесии благодаря балансу между притоком плазмы из источника в плазменной мантии и потерями частиц в результате их неадиабатического движения в хвосте. Квазиравновесные осцилляции системы, которые возникают в результате мгновенных дисбалансов между притоком частиц и их потерями, происходят с периодом $\sim 1-5$ мин [17]. Этот период соответствует характерным временным масштабам наблюдения бимлетов в ПОПС [13–15]. Однако до сих пор не по-

лучено экспериментальных свидетельств, объясняющих короткое время наблюдения бимлетов, иными словами, все еще не ясно, являются ли бимлеты пространственными либо временными структурами. В ранних работах, посвященных кинетическому моделированию процессов неадиабатического ускорения ионов в стационарной модели хвоста, предполагалось, что бимлеты являются локализованными в пространстве долгоживущими структурами [12]. В этом случае короткое время регистрации бимлетов связано с движением границы ПС относительно спутника (так называемый flapping (болтание) ПС), в результате которого спутник регистрирует бимлет лишь в течение короткого времени. С другой стороны, в источнике может быть ограничено время генерации бимлета и составлять несколько минут. Более новые работы, посвященные моделированию самосогласованной конфигурации геомагнитного хвоста [17, 18], свидетельствуют о том, что конечное время жизни источника бимлетов может существенно влиять на их наблюдательные проявления.

Движущиеся к Земле в ПОПС частицы из транзитных плазменных структур должны, в конце концов, частично высыпаться в авроральной области. Оставшаяся часть плазмы отражается от областей сильного магнитного поля вблизи Земли, возвращается в хвост и позднее изотропизуется (рис.2). Многочисленные исследования были посвящены различным структурам, наблюдаемым на границе ПС в авроральной области. К таким структурам в первую очередь относятся дисперсионные структуры, так называемые VDIS (Velocity Dispersed Ion Structure) и TDIS (Time-Dispersed Ion Structure). Первые являются типично пространственными структурами [19] и наблюдаются в течение десятков минут. Ко второму типу относятся времяпролетные структуры с источником, расположенным в экваториальной плоскости сравнительно близко от Земли ($7-40 R_E$, где R_E – радиус Земли). Появление этих структур в авроральной области, как правило, связано с развитием суббури [20,21]. Но есть еще один наиболее загадочный и интересный тип структур, наблюдение которого мы хотим представить в данной работе. Мы рассматриваем структуры этого типа отдельно от перечисленных выше, так как в отличие от TDIS они наблюдаются и во время абсолютно спокойных периодов, а в отличие от VDIS длительность этих событий мала (не более нескольких минут), а внутренняя дисперсия практически отсутствует. В работе [22] было доказано, что такие недисперсионные структуры, регистрируемые вблизи высокоширотной границы ПС в авроральной области, являются высыпавшимися из

хвоста бимлетами. В данной статье мы проведем сравнительный статистический анализ длительностей бимлетов, наблюдаемых в хвосте и в авроральной области, в рамках международного многоспутникового проекта Интербол и, попытаемся разделить временной и пространственный эффекты в наблюдении бимлетов. Кроме того, в данной работе мы представим новые данные наблюдений бимлетов спутниками европейского проекта CLUSTER, которые производят одновременные измерения сразу в четырех точках пространства, разнесенных друг от друга на расстояния ~ 2000 км. Эти новейшие данные, обладающие, к тому же, более высоким временным разрешением (по сравнению с измерениями на спутниках Интербол), позволили обнаружить новые, не наблюдавшиеся ранее свойства бимлетов.

2. Экспериментальные данные

Интербол-1 был запущен 3 августа 1995 г. и был предназначен для исследования чрезвычайно важных и интересных, с точки зрения физики плазмы, пограничных слоев магнитосферы Земли, в том числе и ПОПС. Орбита космического аппарата позволяла ему долгое время находиться в высокоширотных областях хвоста и в ПОПС. В этом смысле Интербол-1 имел неоспоримое преимущество для исследования ПОПС по сравнению с другими космическими аппаратами (КА), производившими измерения в хвосте. В каждом пролете хвоста Интербол-1 пересекал его высокоширотную область, ПОПС и ПС (рис.1). В данной работе мы проанализировали 42 пересечения ПОПС Интербол-1 на расстоянии $X \sim -25$ Re. Мы использовали данные измерений российских приборов: магнитного поля с магнитометра МИФ и плазменных параметров, полученных с помощью ионного спектрометра КОРАЛЛ.

В авроральной области измерения проводились спутником Интербол-2. Данные по плазме были получены российско-французским ионным спектрометром ION. Мы проанализировали 52 пересечения Интербол-2 высокоширотной границы ПС при спокойных геомагнитных условиях на высотах ~ 3 Re.

Проект CLUSTER, состоящий из 4 спутников (рис.1), был запущен летом 2000 г., и каждый год, с июля по октябрь, его орбита проходит через хвост магнитосферы и пересекает ПС в направлении с севера на юг. В течение этого периода дистанция внутри этого квартета спутников варьирует от 1500 км до 3000 км. В данной работе мы использовали измерения, полученные с ионного спектрометра НИА (Hot Plasma Analyser). Мы также использовали дан-

ные измерения магнитного поля, полученные магнитометром FGM с 4-секундным разрешением.

3. Экспериментальное наблюдение бимлетов спутниками Интербол-1,2

3.1. Наблюдение бимлетов в хвосте магнитосферы. На спектрограммах, измеренных в ПОПС хвоста магнитосферы, бимлеты выглядят как короткие “всплески” высокоэнергичных ионов ($E \sim$ нескольких десятков кэВ) с длительностью $\sim 1-2$ мин. Как правило, внутри отдельно взятого события дисперсии по скоростям не наблюдается. Все наблюдения бимлетов в ПОПС сопровождаются понижением модуля магнитного поля (диамагнитный эффект). В пространстве скоростей бимлеты имеют характерную форму функций распределения – форму перуанской фасоли [23–25, 14]. На спектрограммах они могут выглядеть либо изолированными от ПС, либо наблюдаться на самой границе с ПС. К сожалению, располагая измерениями, производимыми только в одной точке пространства, невозможно определенно утверждать, являются ли бимлеты действительно изолированными от ПС структурами или же они связаны с ПС и представляют собой явление, происходящее на его границе. На рис.3 представлен типичный пример бимлета, наблюдаемого в хвосте Интербол-1. Спутник двигался из высокоширотной области хвоста по направлению к НС. Когда аппарат находился еще в высокоширотной области (это видно по данным магнитного поля, которое в этой области достигает большой величины ~ 30 нТл), на спектрограмме, измеренной детектором, смотрящим в антисолнечном направлении, наблюдается короткий пучок ионов (бимлет) с энергией ~ 10 кэВ и длительностью ~ 1 мин, сопровождающийся локальным уменьшением величины модуля магнитного поля. Как видно из функции распределения, бимлет с большой скоростью движется к Земле, преимущественно вдоль магнитного поля. К сожалению, прибор КОРАЛЛ имел “слепой угол” как раз вдоль оси вращения (линии Солнце–Земля), поэтому в функции распределения в угловом секторе, соответствующем скорости, направленной строго вдоль магнитного поля, имеется пробел.

3.2. Наблюдение бимлетов в высокоширотной части авроральной области. На рис.4 представлен результат наблюдения Интербол-2 недисперсионной структуры высыпавшихся ионов в авроральной области вблизи высокоширотной границы ПС 26.08.1997 в 21:02-21:09. Длительность этого события составила 7 мин, что уникально много для такого класса структур. Данное событие наблюдалось в те-

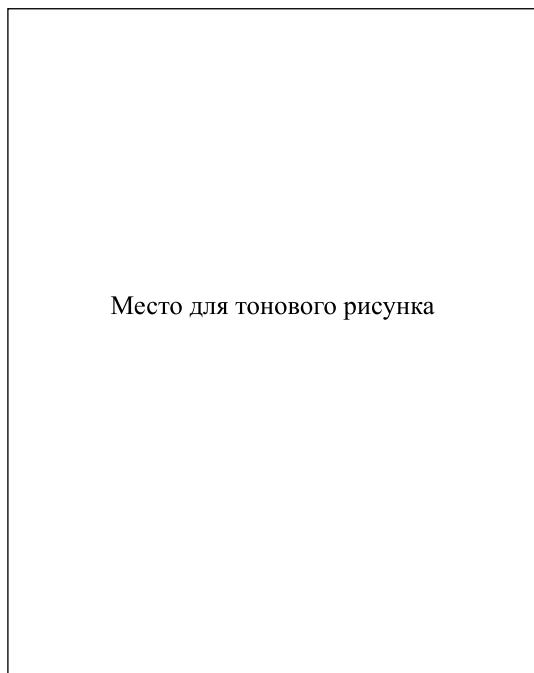


Рис.3. Пример бимлета, наблюдаемого спутником Интербол-1 в высокоширотной части хвоста магнитосферы Земли 25.11.1996. Положение Интербол-1: $X = -28\text{Re}$, $Y_{\text{GSM}} = 1.4\text{Re}$, $Z_{\text{GSM}} = 2.6\text{Re}$. Верхняя часть: характерная форма функции распределения ионов по скоростям в бимлете, измеренная в момент времени, обозначенный стрелкой в верхней части. Функция распределения измерялась в течение 2 мин и построена в системе: скорость ионов, перпендикулярная магнитному полю (V_{\perp} , км/с) – скорость ионов, параллельная магнитному полю (V_{\parallel} , км/с). Нижняя часть: пример ионной спектрограммы, построенной в системе время – энергия (эВ). Разным цветом показана скорость счета согласно серо-черной шкале, приведенной в правой части рисунка. Сверху вниз: спектрограмма, измеренная детектором, смотрящим в хвост (стрелкой показан бимлет); спектрограмма, измеренная детектором, смотрящим на Солнце; временной ход компонент $B_{Z_{\text{GSM}}}$, $B_{Y_{\text{GSM}}}$ и B_X вектора магнитного поля

чение абсолютно спокойных геомагнитных условий. Интересной особенностью подобных событий является наблюдение одновременно с ними сравнительно холодных электронов ($E \sim 300\text{--}400\text{эВ}$), заметно отличающихся от электронов ПС, как правило, имеющих энергии более 1 кэВ. Это еще раз подтверждает, что явления рассматриваемого класса наблюдаются действительно в пограничной области, вне ПС. Такие события являются “следами” бимлетов, высыпаящихся в высокоширотной части авроральной области из хвоста магнитосферы [22].

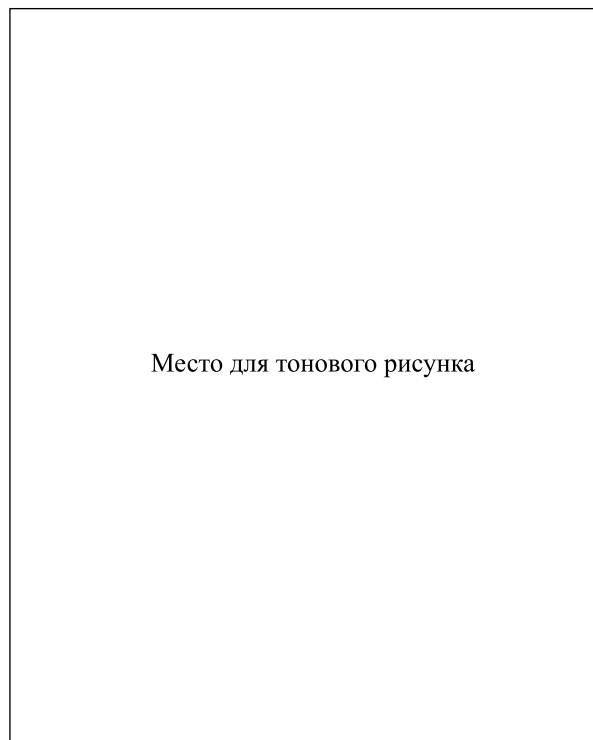


Рис.4. Пример бимлета, наблюдаемого вблизи высокоширотной границы ПС в авроральной области спутником Интербол-2 26.08.1997 (бимлет показан пунктирными линиями). Положение Интербол-2: Инвариантная широта = 73.5° , радиальное расстояние от Земли = 2.65Re , локальное время = 2.00 Сверху вниз: спектрограмма ионов, построенная в системе время – энергия; спектрограмма электронов

4. Статистический анализ бимлетов, наблюдаемых в хвосте и в авроральной области

Регистрируя бимлет только в одной точке пространства, невозможно разделить временной и пространственный эффекты, формирующие возникающую наблюдательную картину, то есть нельзя оценить реальную длительность бимлета и пространственный размер. Ничего нельзя сказать также и о пространственном размере области, занимаемой бимлетами. Тем не менее, располагая большим объемом измерений, можно попытаться решить эти проблемы статистическими методами. Для статистического анализа пространственных распределений бимлетов в хвосте и в высокоширотной части авроральной области мы, прежде всего, выбрали интервалы, когда спутники Интербол-1,2 пересекали соответствующие области магнитосферы в полуночном секторе (для хвоста при $|Y_{\text{GSM}}| \leq 7\text{Re}$; для авроральной области при $21.00\text{h} < \text{MLT} < 03.00\text{h}$) и в спокойные геомаг-

нитные интервалы ($AE < 100$ нТл). Напомним, что в системе координат GSM ось X направлена к Солнцу (вдоль линии Земля-Солнце); ось Z направлена вдоль оси магнитного диполя Земли и ось Y дополняет правую систему координат (рис.1). В результате было выбрано 42 пересечения ПОПС в хвосте магнитосферы и 52 пересечения высокоширотной границы ПС в авроральной области.

На рис.5 показана спектрограмма, полученная методом наложения эпох всех выбранных пересечений ПОПС в хвосте. Спектрограмма построена в координатах dZ – энергия, где dZ – это расстояние меж-

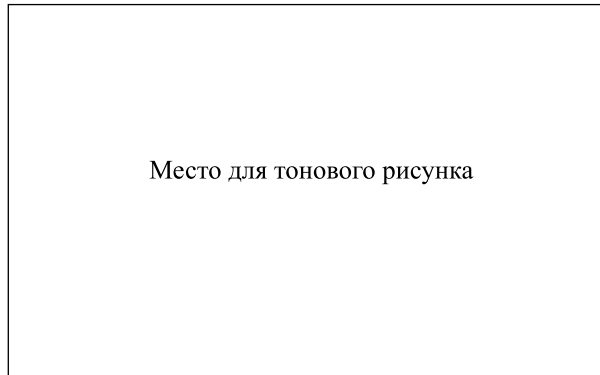


Рис.5. Спектрограмма ионов, полученная методом наложения эпох примененным к пересечениям ПОПС в хвосте магнитосферы спутником Интербол-1 во время спокойных геомагнитных интервалов (использовано 42 пересечения ПОПС). Спектрограмма построена в системе: ΔZ – энергия ионов, где ΔZ – расстояние между спутником и границей ПС. Граница ПС показана пунктиром. Цветом показана скорость счета в детекторах согласно серо-черной шкале, показанной в правой части рисунка. Верхняя панель: данные детектора, смотрящего в хвост магнитосферы. Нижняя панель: данные детектора смотрящего на Солнце

ду спутником и границей ПС (вдоль направления Z_{GSM}). Граница ПС определялась отдельно для каждого пересечения ПОПС согласно следующим критериям: 1) ионная температура $T_i > 1$ кэВ; 2) счет во всех 5 полярных каналах прибора КОРАЛЛ должен был быть примерно одинаков (различия в счете не должны превышать 30%). Определив таким образом границу ПС в каждом конкретном пролете, мы присваивали ей $dZ = 0$, в результате области с $dZ > 0$ соответствует высокоширотная часть хвоста, а области с $dZ < 0$ – внутренняя часть ПС. На спектрограмме со стороны высокоширотной области четко видны движущиеся из хвоста бимлеты. Таким образом, статистически можно оценить размер области (вдоль направления Z_{GSM}), в пределах которой на-

блюдаются бимлеты – он составляет $0.5 Re$ (или 0.5° в градусах инвариантной широты).

Аналогичный метод был применен к пересечениям авроральной области Интербол-2. Широтный размер области занимаемой бимлетами согласно авроральным данным составил $\sim 0.8^\circ$. Таким образом, мы получили похожие результаты для размера области локализации бимлетов в хвосте и в авроральной части магнитосферы. Тем самым мы установили, что бимлеты наблюдаются в пределах очень узкой по широте области вблизи границы ПС, причем, как видно из рис.5, вероятность их наблюдения уменьшается по мере удаления от границы ПС.

Хотя мы имеем данные по наблюдению бимлетов в двух точках пространства (в хвосте и в авроральной области), к сожалению, невозможно зарегистрировать один и тот же бимлет в обоих регионах магнитосферы и, тем самым, разделить временной и пространственный эффекты в его наблюдении. Единственный способ, которым можно воспользоваться, это статистически сравнить длительности наблюдения бимлетов в хвосте и в авроральной области. На рис.6 представлены распределения вероятности на-

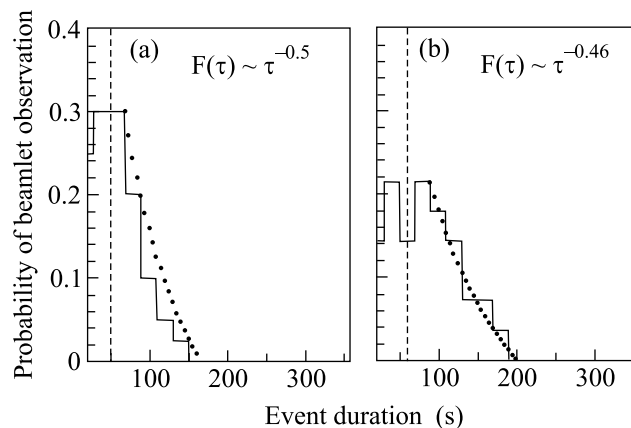


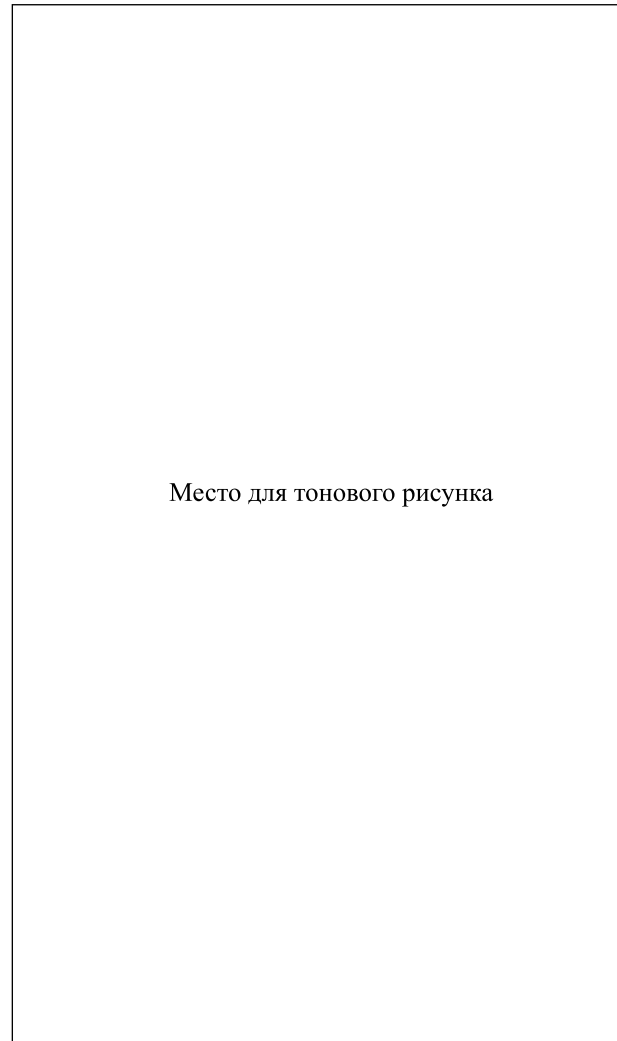
Рис.6. Распределения вероятностей наблюдения бимлетов в зависимости от длительности их наблюдения: (а) распределение, полученное для бимлетов, наблюдавшихся в авроральной области (данные спутника Интербол-2); (б) распределение, полученное для бимлетов, наблюдавшихся в хвосте (данные спутника Интербол-1)

блюдения бимлетов в авроральной области (рис.6а) и бимлетов, регистрируемых в хвосте (рис.6б), в зависимости от их длительности. Из рисунка видно, что в обеих областях магнитосферы наблюдаются похожие формы распределений: средняя длительность наблюдения бимлетов в хвосте и в авроральной области составляет ~ 1 мин и “хвост” распре-

делений хорошо аппроксимируется степенным законом: $F(\tau) \sim \tau^{-0.5}$, где τ – длительность наблюдения бимлета. Напомним, что условия регистрации бимлетов в хвосте и в авроральной области совершенно различны: отличаются как скорости движения самих спутников Интербол-1 и -2, так и скорости плазменной конвекции. Казалось бы, что сходность распределений бимлетов в обоих случаях является аргументом в пользу того, что временной масштаб 1–1.5 мин является реальной длительностью бимлетов, то есть характерным временем импульсного ускорения частиц в дальнем хвосте. Однако в этом случае возникает противоречие с фактом отсутствия дисперсии по скоростям в бимлете. Согласно экспериментальным данным, разброс продольных скоростей ионов в бимлете составляет $200 \div 500$ км/с и, тем не менее, все ионы наблюдаются вблизи Земли практически одновременно. Если бы источник ускорения работал в импульсном режиме (то есть частицы одновременно ускорялись бы до различных энергий), то для отсутствия дисперсии (по крайней мере, в пределах временного разрешения прибора) необходимо, чтобы этот источник находился достаточно близко от места регистрации бимлетов (по нашим оценкам, на расстоянии $\leq 4 R_E$ от места наблюдения бимлета), иначе более энергичные ионы должны были наблюдаться заметно раньше менее энергичных. Так как и предсказание теории, и экспериментальные данные указывают на то, что бимлеты генерируются в дальних областях хвоста (на расстояниях от Земли $\sim 100 R_E$), то отсутствие дисперсии можно объяснить, только предположив, что генерация бимлетов не происходит мгновенно, то есть источник работает, по крайней мере, в течение $\sim 10 \div 15$ мин. В этом случае бимлеты уже не будут являться чисто временными структурами (короткоживущими всплесками плазмы), а будут представлять собой пространственные структуры с ограниченным временем жизни. Наблюдения бимлетов на спутниках CLUSTER, которые мы представим в следующей главе, подтверждают это предположение.

5. Наблюдение и изучение структуры бимлета по данным со спутников CLUSTER

5.1. Наблюдение бимлетов в хвосте магнитосферы спутниками CLUSTER. На рис.7 показан пример наблюдения бимлета тремя спутниками CLUSTER 21.09.2001 (здесь и далее они будут обозначены как Cl-1, Cl-3, Cl-4). К сожалению, на четвертом спутнике (Cl-2) ионные измерения недоступны. Данное событие наблюдалось во время абсолютно спокойных геомагнитных условий. На ионных спек-



Место для тонового рисунка

Рис.7. Пример бимлета, наблюдаемого тремя спутниками CLUSTER (Cl-1, Cl-3, Cl-4). Верхняя часть. Сверху вниз: спектрограмма ионов O^+ , измеренная на спутнике Cl-4; спектрограмма ионов H^+ , измеренная на Cl-4; спектрограмма ионов (без массового разрешения), измеренная на аппарате Cl-3; спектрограмма ионов, измеренная на спутнике Cl-1. Нижняя часть. Положения аппаратов CLUSTER для рассматриваемого интервала времени (сверху вниз: в плоскости XY_{GSM} ; XZ_{GSM} ; YZ_{GSM})

рограммах, представленных на рис.7, так же как и на спектрограммах, измеренных Интерболом-1 (рис.3), бимлет наблюдается в течение короткого времени, имеет энергию ~ 10 кэВ и дисперсия по скоростям практически отсутствует. Тем не менее, благодаря одновременным измерениям сразу в трех точках пространства, в данном примере наблюдения бимлета видны некоторые особенности, которые невозможно было увидеть по данным одного спутника Интербол-

1. На спектрограммах, полученных с CLUSTER, хорошо видно, что сначала бимлет наблюдается аппаратами Cl-3 и Cl-4 в течение 1.5 мин (19:45:30–19:47). Третий аппарат Cl-1 в это время бимлета не видит. Затем ситуация меняется: в 19:47:30 аппарат Cl-1 начинает видеть бимлет, а аппараты Cl-3 и Cl-4, напротив, перестают его наблюдать, и, наконец в 19:50 Cl-3 и Cl-4 вновь начинают видеть бимлет, тогда как на Cl-1 он уже не наблюдается. Такие особенности в наблюдении бимлета свидетельствуют о его сложной геометрии, подробный анализ которой мы представим в следующем параграфе. Здесь же мы отметим еще одно явление, связанное с прохождением бимлета, которое не удавалось наблюдать ранее. На спектрограммах, представленных на рис.7, хорошо видно (особенно по данным со спутников Cl-3 и Cl-4), что в момент прохождения бимлета наблюдается увеличение энергии холодной плазмы (нижняя часть спектрограмм), причем энергия холодных ионов достигает максимума на границе бимлета. Обычно холодная плазма, вытягиваемая из ионосферы и заполняющая высокоширотную область хвоста, не видна детекторами из-за того, что ее энергия ниже порога чувствительности приборов. Но в момент прохождения каких-либо возмущений, например альвеновских волн, эта плазма может быть ускорена изменяющимся электрическим полем, связанным с возмущением, и стать видимой на детекторах [26]. В этом смысле увеличение скорости холодной плазмы может служить хорошим индикатором движения магнитных трубок, населенных ионами бимлета. Мы используем это явление в следующем параграфе при анализе пространственной структуры бимлета.

5.2. Анализ пространственной структуры бимлета. Посмотрим, как были расположены спутники CLUSTER в интересующий нас интервал времени (19:40–20:00) (нижняя часть рис.7). Аппарат Cl-1 всегда находится выше (вдоль Z_{GSM}), чем аппараты Cl-3 и Cl-4. Так как в данном случае мы находились в северной доле хвоста, то это означает, что спутник Cl-1 находился дальше от ПС, чем спутники Cl-3 и Cl-4, причем расстояние между Cl-1 и Cl-3 составляло $\sim 0.3 Re$ (Cl-3 и Cl-4 имели практически одинаковые координаты Z_{GSM}). Кроме того, аппараты были также разведены вдоль направления Y_{GSM} . Что касается направления X , то тут максимально разведены были аппараты Cl-3 и Cl-4, и, так как их наблюдения бимлета практически идентичны, мы можем предположить, что продольный размер бимлета (вдоль X) существенно превышает расстояние между спутниками ($> 0.4 Re$). Таким образом, можно заключить, что наблюдаемый бимлет

пространственно ограничен (то есть его размер меньше расстояния между спутниками) вдоль направления Y_{GSM} и/или Z_{GSM} . Чтобы хоть как-то использовать четвертую точку измерения (спутник Cl-2), мы воспользовались данными измерений магнитного поля, которые доступны на всех четырех аппаратах. Оказалось, что на спутниках Cl-2, Cl-3 и Cl-4 наблюдаются похожие вариации компонент магнитного поля, тогда как на спутнике Cl-1 они другие. Можно предположить, что бимлет и связанное с ним возмущение магнитного поля первоначально проходят через аппараты Cl-2, Cl-3 и Cl-4, и лишь после этого достигают Cl-1. Введя новую систему координат $X'Y'Z'$, в которой ось X' направлена вдоль силовых линий невозмущенного магнитного поля высокоширотной части геомагнитного хвоста, ось Y' проходит через аппараты Cl-2, Cl-3 и Cl-4 и ось Z' дополняет правую тройку, мы построили годограф магнитного поля в плоскости $Y'Z'$ для интервала времени соответствующего наблюдению бимлета (рис.8). Оказалось, что для всех четырех аппаратов годографы вы-

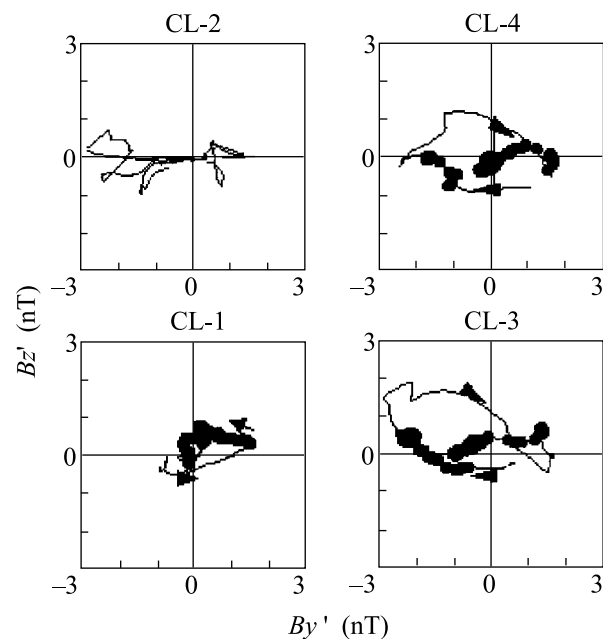


Рис.8. Годографы магнитного поля, построенные в координатах $B_{Y'}$ – $B_{Z'}$ для интервала времени 19:44–19:54. Черными кружочками отмечены моменты наблюдения бимлета (наблюдения частиц с энергиями более 5 кэВ)

глядят практически симметрично в плоскости $Y'Z'$, причем максимальная вариация магнитного поля наблюдается вдоль Y' . Кроме того, вариации компоненты $B_{Y'}$ магнитного поля и скорости $V_{Y'}$ холодной плазмы (о которой мы упомянули в предыдущем

параграфе) происходят синхронно и максимальны на границе бимлета. Предположим, что с бимлетом связано магнитное возмущение, распространяющееся к Земле со скоростью V_{PROP} вдоль силовых линий магнитного поля (вдоль оси X' нашей системы координат) (рис.9). Благодаря вмороженности магнитного поля в холодную компоненту плазмы, вариации маг-

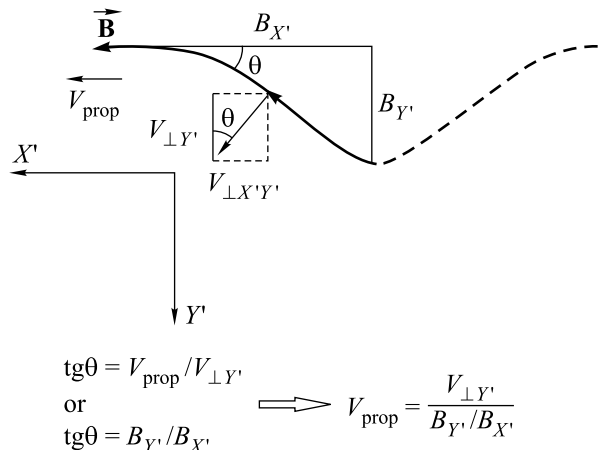


Рис.9. Схематическое изображение в плоскости $(X'Y')$ связанного с бимлетом возмущения магнитного поля ("змейки"). Из условия вмороженности магнитного поля в холодную плазму получена формула для определения скорости распространения возмущения вдоль направления невозмущенного магнитного поля, V_{PROP} по измеряемым значениям компонента скорости холодной плазмы $V_{\perp Y'}$ и компонент магнитного поля $B_{Y'}$ и $B_{X'}$

нитного поля (которые, как было установлено выше, происходят, в основном, вдоль Y') должны быть непосредственно связаны с изменениями скорости $V_{\perp Y'}$ холодной плазмы. Связь между $B_{Y'}$ и $V_{\perp Y'}$ позволяет определить скорость распространения возмущения вдоль магнитного поля:

$$V_{\text{PROP}} = \frac{V_{\perp Y'}}{B_{Y'}/B_{X'}} \quad (1)$$

(см. рис.9). Таким образом, нам остается построить в координатах $B_{Y'}/B_{X'}$ и $V_{\perp Y'}$ данные измерений со спутников Cl-1, Cl-3 и Cl-4 и определить тангенс угла наклона получившейся прямой, величина которого и будет равна V_{PROP} . Скорость распространения возмущения составила 570 км/с, в то время как альвеновская скорость, рассчитанная по наблюдаемым в это время значениям магнитного поля $|B| = 31$ нТл и плотности плазмы $n_{\text{H}^+} = 0.06 \text{ см}^{-3}$ и $n_{\text{O}^+} = 0.06 \text{ см}^{-3}$, составила $V_A = 640$ км/с, то есть имеет достаточно близкое значение. Таким образом, можно предположить, что связанное с бимлетом воз-

мущение представляет собой распространяющуюся к Земле альвеновскую волну.

Зная скорость распространения возмущения вдоль магнитного поля (вдоль X'), можно трансформировать временные вариации в пространственные: $X'_i = t_i \cdot V_{\text{PROP}}$, (где t_i – моменты времени, когда наблюдался бимлет) и изучить геометрию бимлета. На рис.10 представлены проекции векторов магнитного

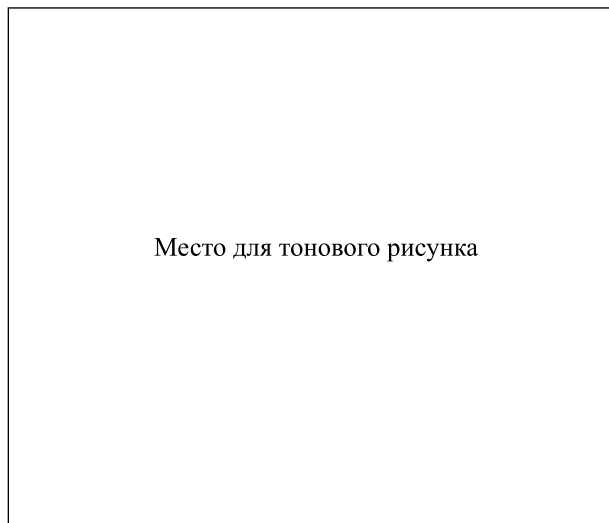


Рис.10. Мгновенный "фотоснимок" пространственной структуры бимлета (в проекции на плоскость $X'Y'$). Пространственная шкала X' (Re), показанная на нижней панели, соответствует временной шкале, представленной на верхней панели: Верхняя часть: временной ход модуля вектора магнитного поля, $|B|$, нТ по данным четырех спутников CLUSTER (номера аппаратов показаны справа). Черными прямоугольниками показаны периоды уменьшения величины $|B|$ (диамагнитный эффект), вызванные прохождением высокоэнергичных ионов (бимлета) через соответствующий аппарат; Нижняя часть: проекции векторов магнитного поля в плоскости $(X'Y')$ по данным четырех спутников CLUSTER. Для трех аппаратов (на которых доступны данные по измерениям плазмы, Cl-1, -3, -4) проекции векторов магнитного поля показаны цветом, который соответствует плотности ионов с энергиями более 5 кэВ (бимлета), согласно серо-черной шкале, представленной в правой части рисунка. На основании данных по плотности бимлета и данных по временному ходу $|B|$ построены проекции силовых линий магнитного поля, содержащих ионы бимлета (сплошные черные линии) и последовательно проходящих через все четыре аппарата CLUSTER

поля на плоскость $X'Y'$, наблюдаемые в 19:44–19:54. Данный интервал времени был преобразован в пространственные координаты X' , причем $X' = 0$ соответствует началу анализируемого интервала

времени (19:44). Проекция векторов магнитного поля, измеренные спутниками C1-1, C1-3 и C1-4, показаны в серо-черных тонах, где цвет соответствует значению плотности ионов высоких энергий ($E > 5$ кэВ), согласно черно-серой шкале, показанной в правой части рисунка. Таким образом, мы можем видеть, на каких силовых линиях магнитного поля находится бимлет, а какие силовые линии являются пустыми (эти линии показаны штрихами). Так как на спутнике C1-2 отсутствуют измерения плазмы, и мы не можем непосредственно указать цветом локализацию бимлета, то для восстановления структуры бимлета мы воспользовались дополнительными косвенными свидетельствами присутствия бимлета: данными по временному ходу абсолютной величины магнитного поля и суммарного потока электронов с энергиями 100 эВ–1 кэВ, которые доступны на всех четырех аппаратах. Кроме того, чтобы правильно восстановить геометрию бимлета, мы выдержали расстояния между спутниками CLUSTER в направлении Y' такими, какими они были в указанный период времени. Таким образом, на рис.10 приведен мгновенный “фотоснимок” бимлета. Из рисунка ясно видно, что бимлет представляет собой “змейку”, распространяющуюся в плоскости $X'Y'$. Причем ширина этой змейки в направлении Y' составляет всего $0.25 R_E$, в то время как длина бимлетной структуры вдоль направления X' не менее $25 R_E$. К сожалению, на примере данного события ничего определенного нельзя сказать о размере бимлета в направлении Z' . На рис.10 видно, что в период времени 19:46–19:48 хорошее соответствие между проекциями векторов магнитного поля наблюдается только для аппаратов C1-2, C1-3 и C1-4 (через эти спутники можно провести единые силовые линии) и только эти аппараты в это время “видят” бимлет (C1-1, при этом, не регистрирует бимлет, так как расположен выше по Z'). Но в интервале времени 19:48–19:51 наблюдается хорошее соответствие между проекциями векторов магнитного поля, измеренными уже на всех четырех спутниках: силовые линии, содержащие бимлет, последовательно проходят через все 4 аппарата. Это означает, что силовые трубки, содержащие бимлет, “поднялись” до уровня C1-1 и бимлет имеет размер в направлении Z' , превышающий расстояние между аппаратами, то есть более $0.3 R_E$.

Таким образом, бимлет представляет собой вытянутую вдоль магнитного поля плазменную структуру, продольный размер которой в десятки раз превышает поперечный. Этот экспериментально установленный результат окончательно подтверждает теорию о том, что бимлеты генерируются в пространст-

венно ограниченных областях токового слоя геомагнитного хвоста и тем самым являются проявлениями не крупномасштабного пересоединения, а действующих в разных местах дальнего токового слоя локальных “очагов” ускорения.

Новой интересной особенностью бимлета является его искривленность. Так как бимлет представляет собой пучок быстро движущихся ионов (в рассмотренном случае скорость движения ионов вдоль магнитного поля составляла ~ 800 км/с) с ярко выраженной температурной анизотропией ($T_{\parallel} \gg T_{\perp}$), то в момент вылета бимлета из токового слоя в высокоширотную область хвоста в пучке развивается шланговая неустойчивость, которая приводит к изгибу силовых линий магнитного поля, вдоль которых распространяется бимлет, то есть к возбуждению альвеновской волны. Действительно, шланговая неустойчивость возникает при условии: $p_{\parallel} - p_{\perp} > B_{lobe}^2/4\pi$, где p_{\parallel} – давление плазмы вдоль магнитного поля, p_{\perp} – давление плазмы поперек поля и B_{lobe} – напряженность магнитного поля, в котором распространяется ионный пучок. Так как генерация бимлетов происходит в дальних областях геомагнитного хвоста (на расстояниях от Земли порядка $100 R_E$), где высокоширотное магнитное поле B_{lobe} достаточно слабое ($B_{lobe} \sim 5 \div 8$ нТл), то условие шланговой неустойчивости легко выполняется. Действительно, в рассмотренном примере плотность плазмы в бимлете $n = 0.05$ см $^{-3}$, продольная и поперечная температуры соответственно равны: $T_{\parallel} = 8000$ эВ; $T_{\perp} = 20$ эВ, отсюда $p_{\parallel} = 0.064$ нПа; $p_{\perp} = 0.00016$ нПа ($p_{\parallel} - p_{\perp} = 0.063$ нПа) и $B_{lobe}^2/4\pi = 0.05$ нПа (для $B_{lobe} = 8$ нТ), то есть $(p_{\parallel} - p_{\perp})/(B_{lobe}^2/4\pi) \approx 1.5 > 1.0$. Таким образом, при входе бимлета в высокоширотную область хвоста в нем возникает шланговая неустойчивость, генерирующая альвеновскую волну, которая распространяется в плоскости $X'Y'$. Из магнитогидродинамики известно, что плазма обладает гидродинамической устойчивостью, если магнитное поле увеличивается по мере удаления от границы плазмы [27]. Градиенты магнитного поля могут стабилизировать развитие шланговой неустойчивости. В этом смысле можно ожидать, что неустойчивые магнитные возмущения будут поляризованы в плоскости (XY), так как градиенты всех параметров плазмы и магнитного поля поперек хвоста (в направлении Z_{GSM}) по крайней мере, на два порядка выше, чем в направлении утро–вечер (то есть вдоль Y_{GSM}). Таким образом, основной компонент альвеновского возмущения должен быть направлен вдоль Y_{GSM} , что и наблюдается в эксперименте.

Итак, многоспутниковые измерения на CLUSTER позволили обнаружить новую, ранее ненаблюдавшуюся, особенность бимлетов. Возбуждение шланговой неустойчивости на силовых линиях магнитного поля, вдоль которых распространяется бимлет, позволяет экспериментально оценить, по крайней мере, нижнюю границу расстояния от Земли до источника его генерации (по максимальной величине B_{lobe} , для которой критерий неустойчивости еще может быть удовлетворен). Так, в рассмотренном примере условие неустойчивости еще выполняется для $B_{lobe} = 8$ нТл. По данным измерений магнитного поля в дальнем хвосте спутником Geotail, такая величина поля наблюдается на расстояниях ≥ 80 Re [28].

Таким образом, с помощью многоточечных измерений на спутниках CLUSTER удалось установить, что бимлеты являются пространственными структурами. Малое время их наблюдения (1–2 мин) обусловлено движением бимлета относительно спутника, причем такое движение возможно не только в вертикальной плоскости (flapping ПС вдоль Z), но и в горизонтальной плоскости (вдоль Y), благодаря изгибам силовых трубок, вдоль которых движутся частицы бимлета. Близкие времена регистрации бимлетов, наблюдавшихся в хвосте и в авроральной области (рис.6), не противоречат этому утверждению. Это можно доказать с помощью следующих простых соображений.

Действительно, время наблюдения бимлета $\Delta t = L/V_{\perp}$, где L – поперечный размер бимлета и V_{\perp} – скорость движения магнитных трубок, заполненных ионами бимлета, поперек магнитного поля. Согласно (1), поперечная скорость движения трубок связана с продольной скоростью распространения возмущения (альвеновской скоростью) соотношением

$$V_{\perp} = \frac{V_A \cdot B_{\perp}}{B} \approx \frac{B_{\perp}}{\sqrt{n \cdot m_i}}, \quad (2)$$

где V_A – альвеновская скорость, n – концентрация плазмы, m_i – масса ионов (в основном H^+), B_{\perp} – компонента магнитного поля, перпендикулярная направлению невозмущенного магнитного поля B , возникающая при прохождении бимлета. Пусть площади сечения бимлета в хвосте и в авроральной области равны соответственно S_1 и S_2 , напряженности невозмущенного магнитного поля соответственно B_1 и B_2 и величины перпендикулярной компоненты магнитного поля равны $B_{1\perp}$ и $B_{2\perp}$. Тогда из условия сохранения потока энергии волны, связанной с бимлетом,

получаем для точек наблюдения в хвосте и в авроральной области:

$$B_{1\perp}^2 \cdot S_1 = B_{2\perp}^2 \cdot S_2. \quad (3)$$

Условие сохранения магнитного потока дает:

$$B_1 \cdot S_1 = B_2 \cdot S_2, \quad (4)$$

отсюда имеем:

$$B_{1\perp}/B_{2\perp} = \sqrt{B_1/B_2}. \quad (5)$$

Пусть Δt_1 и Δt_2 – времена наблюдения бимлетов в хвосте и в авроральной области, соответственно. Проверим, действительно ли величины этих времен могут оказаться близки, как было экспериментально установлено в предыдущей главе, в предположении, что бимлет является пространственной структурой. Используя соотношения (2), (3), (4) и (5) получаем:

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{\sqrt{S_1}/V_{1\perp}}{\sqrt{S_2}/V_{2\perp}} = \frac{B_2}{B_1} \sqrt{\frac{n_1}{n_2}}.$$

Так как в высокоширотной части хвоста напряженность магнитного поля $B_1 \sim 30$ нТл, а в авроральной области она составляет $B_2 \sim 300$ нТл и концентрации плазмы соответственно равны $n_1 \sim 0.2$ см $^{-3}$ и $n_2 \sim 20$ см $^{-3}$, то отношение времен наблюдения бимлета $\Delta t_1/\Delta t_2 \approx 1.0$, то есть в обеих областях магнитосферы времена регистрации бимлетов, благодаря сочетанию физических параметров действительно оказываются очень близки. Таким образом, статистический результат, представленный в предыдущей главе, не противоречит новому представлению о бимлете, как о пространственной структуре, с которой связана распространяющаяся к Земле альвеновская волна.

6. Заключение

Современные спутниковые измерения уже обладают достаточным временным разрешением, чтобы “in situ” исследовать принципиально важное физическое явление – диссипацию магнитной энергии – с помощью локализованных, напоминающих вспышки, кратковременных инъекций плазмы. Важно, что энергия магнитного поля преобразуется при этом в упорядоченную (кинетическую) энергию движения ионных пучков, а не только в хаотический нагрев ионов СВ. Интересно, что это явление имеет аналогии и в солнечной атмосфере. Как показано в работах Паркера [29] и других исследователей, важнейшей компонентой солнечной активности, определяющей нагрев короны, являются мелкомасштабные “нановспышки”

(nanoflares), в которых диссипируется основная энергия, разогревающая солнечную корону до миллионов градусов. Наши конкретные результаты, посвященные “нановспышкам” в хвосте магнитосферы Земли, можно сформулировать следующим образом:

1. Высокоскоростные пучки ионов (бимлеты) наблюдаются в ПОПС хвоста магнитосферы и вблизи высокоширотной границы ПС в авроральной области в виде коротких всплесков плазмы, как правило, без дисперсии, с энергиями несколько десятков кэВ и длительностью 1–2 мин.

2. Как в хвосте, так и в авроральной области бимлеты локализованы вблизи границы ПС, в области, широтный размер которой составляет $0.5\text{--}0.8^\circ$.

3. Бимлет представляет собой пространственную структуру, с которой связана распространяющаяся к Земле альвеновская волна. Время жизни такой структуры $\sim 10\div 15$ мин. Анализ одновременных наблюдений бимлета в нескольких точках пространства позволил оценить пространственные размеры бимлета. Бимлет вытянут вдоль магнитного поля, его продольный размер во много раз превышает поперечный и составляет несколько десятков радиусов Земли, в то время как размер бимлета в направлении поперек магнитного поля не превышает одного радиуса Земли. Это еще раз доказывает, что бимлеты генерируются в пространственно локализованных участках токового слоя геомагнитного хвоста.

4. Многоспутниковые наблюдения бимлета позволили установить, что бимлет не является прямой вытянутой вдоль магнитного поля структурой (как предполагалось ранее), а имеет вид “змейки”, образованной в результате развития шланговой неустойчивости, которая возникает при выходе бимлета из токового слоя в месте его генерации в дальнем хвосте магнитосферы. По максимальной величине магнитного поля, при которой условие шланговой неустойчивости еще выполняется, можно оценить нижнюю границу расстояния от Земли до источника бимлета, которая в рассмотренном примере превышала $80 R_e$.

В целом наши результаты подтверждают модель неадиабатического ускорения плазмы, в результате которого генерируются бимлеты во время транзитных процессов, спорадически происходящих в разных областях хвоста даже при самых спокойных условиях. Такие короткоживущие быстрые пучки ионов (бимлеты) не обязательно связаны с пересоединением (то есть сменой знака B_z в токовом слое), возможен и чисто неадиабатический механизм в областях со слабым квазистационарным $B_z > 0$. Конечно, если источником бимлетов все же является пересоединение,

то оно должно быть локализованным в пространстве. Именно такие свойства пересоединения, происходящего в хвосте магнитосферы, активно обсуждаются в течение последнего десятилетия [30–33]. В любом случае возникающая картина трансформации и диссипации энергии в горячей плазме магнитосферного хвоста связана с многоточечными (переменяемыми) событиями (рис.11), вспыхивающими то в одной, то в другой части токового слоя [34, 35]. Такая картина

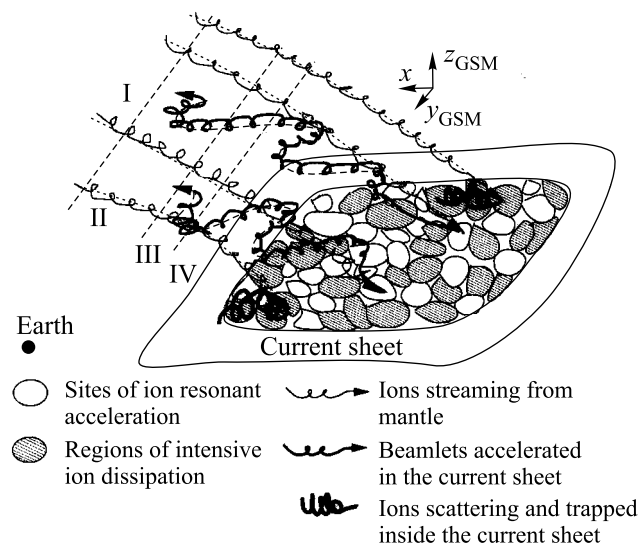


Рис.11. Сценарий генерации бимлетов в токовом слое хвоста магнитосферы Земли. С точки зрения процессов трансформации и диссипации энергии, токовый слой не является однородным, а представляет собой пространство, состоящее из перемежаемых областей повышенного рассеяния ионов (заштрихованные овалы) и областей резонансного ускорения плазмы (белые овалы). Причем, картина распределения этих областей не является стационарной, она все время меняется: то в одной, то в другой части токового слоя вспыхивают новые или распадаются старые области резонансного ускорения бимлетов. Римскими цифрами показаны области магнитосферы: I – мантия; II – высокоширотная часть хвоста; III – пограничная область плазменного слоя; IV – плазменный слой

конечно очень далека от еще недавно господствовавших представлений о глобальности и квазистационарности подобных процессов.

Авторы выражают благодарность В. А. Сергееву за обсуждение данной работы и полезные замечания.

Работа была поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований # 01-02-16367; # 04-02-17371, грантом ведущих научных школ при Президенте РФ # НШ-17 39.2003.2, грантами INTAS YS Fellowship # 03-55-1880; INTAS # 00-04-65; # 03-51-3738 и Фондом содействия отечествен-

ной науке (программа “Выдающиеся ученые. Кандидаты и доктора наук”).

1. L. R. Lyons and T. W. Speiser, *J. Geophys. Res.* **87**, 2276 (1982).
2. L. M. Zelenyi, J. Buchner, and D. V. Zogin, in *Proc. of Varenne-Abustuman Workshop on Plasma Astrophysics*, Eur. Space Agency Spec. Publ. ESA-SP285, **1**, 227 (1988).
3. J. Buchner and L. M. Zelenyi, in *Proc. of Varenne-Abustuman Workshop on Plasma Astrophysics*, Eur. Space Agency Spec. Publ. ESA-SP285, **1**, 219 (1988).
4. D. J. Williams, *J. Geophys. Res.* **86**, 5501 (1981).
5. M. K. Andrews, P. W. Daly, and E. Keppler, *Geophys. Res. Lett.* **8**, 987 (1981).
6. J. D. Winningham, F. Yasubara, S.-I. Akasofu et al., *J. Geophys. Res.* **80**, 3148 (1975).
7. T. W. Speiser, *J. Geophys. Res.* **70**, 4219, (1965).
8. B. U. O. Sonnerup, *J. Geophys. Res.* **76**, 8211, (1971).
9. J. Buchner and L. M. Zelenyi, *Phys. Lett.* **A118**, 395 (1986).
10. J. Buchner and L. M. Zelenyi, *J. Geophys. Res.* **94**, 11,821 (1989).
11. J. Chen and P. J. Palmadesso, *J. Geophys. Res.* **91**, 1499 (1986).
12. M. Ashour-Abdalla, J. P. Berchem, J. Buchner, and L. M. Zelenyi, *J. Geophys. Res.* **98**, 5651 (1993).
13. G. Parks, L. J. Chen, M. McCarthy et al., *Geophys. Res. Lett.* **25**, 3285 (1998).
14. E. E. Grigorenko, A. O. Fedorov, and L. M. Zelenyi. *Ann. Geophysicae* **20**, 329 (2002).
15. J.-A. Sauvaud and R. A. Kovrazhkin, Abstracts of 35-th COSPAR Scientific Assembly, 8-25 July, Paris, France, COSPAR04-A-01819 D3.1-0022-04 (2004).
16. A. Keiling, H. Reme, I. Dandouras et al., *J. Geophys. Res.* **109**, A05215, doi:10.1029/2003JA010277 (2004).
17. V. Perroomian, M. Ashour-Abdalla, and L. M. Zelenyi. *J. Geophys. Res.* **105**, 18, 807 (2000).
18. V. Perroomian and L. Zelenyi, *Space Science Rev.* **95**, 257 (2001).
19. L. M. Zelenyi, R. A. Kovrazhkin, and J. M. Bosqued., *J. Geophys. Res.* **95**, 12119 (1990).
20. J.-A. Sauvaud, D. Popescu, D. C. Delcourt et al., *J. Geophys. Res.* **104**, 28,565 (1999).
21. V. A. Sergeev, J.-A. Sauvaud, D. Popescu et al., *J. Geophys. Res.* **105**, 18465 (2000).
22. E. E. Grigorenko, A. O. Fedorov, L. M. Zelenyi et al., *Adv. Space Res.* **31**, 1271 (2003).
23. R. J. DeCoster and L. A. Frank., *J. Geophys. Res.* **84**, 5099 (1979).
24. T. G. Onsager, M. F. Thomsen, R. C. Elphig et al., *J. Geophys. Res.* **96**, 20999 (1991).
25. L. M. Zelenyi, A. L. Taktakishvili, E. M. Dubinin et al., *Proceedings of the 9th COSPAR Colloquium "Magnetospheric Research with Advanced Techniques"*, Beijing, China, 1996, p. 125.
26. J.-A. Sauvaud, P. Louarn, G. Fruit et al., *J. Geophys. Res.* **109**, A01212, doi:10.1029 /2003 JA009996 (2004).
27. Н. Кролл, А. Трайвелпис, *Основы физики плазмы*, М.: “Мир”, 1975, с. 209.
28. T. Yamamoto, K. Shiokawa, and S. Kokubun, *Geophys. Res. Lett.* **21**, 2875 (1994).
29. E. N. Parker, *Spontaneous Current Sheets in Magnetic Fields*, New York: Oxford University Press, 1994.
30. V. A. Sergeev, R. C. Elphic, F. S. Mozer et al., *Planet Space Sci.* **40**, 1551 (1992).
31. A. J. Klimas, J. A. Valdivia, D. Vassiliadis et al., *J. Geophys. Res.* **105**, 18765 (2000).
32. W. Liu, *J. Geophys. Res.* **106**, A1, 289 (2001).
33. T. Nagai, I. Shinohara, M. Fujimoto et al., *J. Geophys. Res.* **106**, 25929 (2001).
34. К. В. Чукбар, *ЖЭТФ* **108**, 1875 (1995).
35. Г. М. Батанов, В. Е. Бенинг, В. Ю. Королев и др., *Письма в ЖЭТФ* **73**, 143 (2001).