

О формировании центрального плазменного слоя эхо-кластерами ионных пучков

Р. А. Ковражкин¹⁾, Ж.-А. Сово⁺²⁾, Д. Ш. Делькур^{*2)}

Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

⁺Institute de Recherche en Astrophysique et Planétologie, 31028 Toulouse, France

^{*}Laboratoire de Physique des Plasmas Ecole Polytechnique, 94107 Saint-Maur des Fossés, France

Поступила в редакцию 24 декабря 2013 г.

После переработки 27 июня 2014 г.

Проведен анализ множественных энергодисперсионных структур ионов H^+ , наблюдавшихся 03.11.1996 г. при пролете спутника ИНТЕРБОЛ-2 через плазменный слой на геоцентрическом расстоянии $\sim 3R_E$, где R_E – радиус Земли. Структура в пограничном плазменном слое, обладающая прямой дисперсией по энергии и инвариантной широте в диапазоне 0.5–10.0 кэВ (VDIS), является “автографом” ускоренных ионных пучков (первичных бимлетов), генерируемых в токовом слое вдоль геомагнитного хвоста. Центральный плазменный слой содержит пять дисперсионных структур с1–с5 со средней энергией от 2.80 до 7.36 кэВ. Средняя энергия структур возрастает с уменьшением широты. Рассматриваемое событие представляет случай режима формирования центрального плазменного слоя эхо-бимлетами ускоренного ионного пучка без присутствия диффузной термализованной популяции ионов. Возможно, данное явление объясняется тем, что в течение трех суток перед пролетом спутника наблюдался магнитно-спокойный период, во время которого осуществлялся режим длительной диффузии частиц из центрального плазменного слоя.

DOI: 10.7868/S0370274X14150028

Введение. Прямые измерения плазменных популяций в авроральной магнитосфере позволяют исследовать методом дистанционного зондирования динамику как пограничного плазменного слоя (PSBL – Plasma Sheet Boundary Layer), простирающегося в экваториальной плоскости по оси $-X$ от $\sim 20R_E$ до $\sim 100R_E$, где R_E – радиус Земли, так и центрального плазменного слоя (CPS – Central Plasma Sheet), экваториальный край которого находится на геоцентрическом расстоянии $\sim 4R_E$. Характерная средняя энергия электронов в PSBL ~ 0.1 – 0.4 кэВ, а протонов ~ 0.2 – 1 кэВ [1]. По данным *высокоапогейных* космических аппаратов в 40–50 % случаев в PSBL наблюдаются пучки ионов со скоростями 400–2000 км/с [2, 3], причем часто образуется несколько мелкомасштабных пучков (бимлетов). Бимлеты генерируются после ускорения ионов крупномасштабным магнитосферным электрическим полем в областях токового слоя вдоль геомагнитного хвоста [4]. Такие пучки чаще всего регистрируются в магнитно-спокойные периоды и на фазе восстановления суббурь [5]. В PSBL вне экваториальной области и в авроральной

зоне бимлеты наблюдаются в форме энергодисперсионных структур в диапазоне энергий ~ 0.5 – 30 кэВ (VDIS – Velocity Dispersed Ion Structures) [6–8]. Энергия в структурах падает с уменьшением широты, что объясняется приходом на определенные широты ионов разных энергий при распространении пучка до ионосферных высот в поле конвекции $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Малая часть ионов бимлетов высыпается в полярную ионосферу (3–4 %), а остальная отражается в зеркальных точках и может снова взаимодействовать с токовым слоем хвоста магнитосферы. Затем вновь сформированный пучок ионов распространяется к Земле. Эти популяции представляют собой ионные “эхо”-бимлеты/“эхо”-кластеры. В авроральной зоне такие кластеры образуют “эхо”-структуры VDIS [9–11]. В CPS осуществляются рассеяние, ускорение и дрейф частиц. При этом происходит изотропизация функции распределения по углам и образуются термализованные плазменные популяции. Характерная средняя энергия электронов ~ 1 – 5 кэВ, протонов ~ 2 – 15 кэВ. В CPS (в основном в возмущенные периоды) появляются образования энергичных ионов (порядка 5–20 кэВ) – ионные кластеры, совершающие колебания (осциллирующие) между зеркальными

¹⁾e-mail: rkovrazh@iki.rssi.ru

²⁾J.-A. Sauvaud, D. C. Delcourt

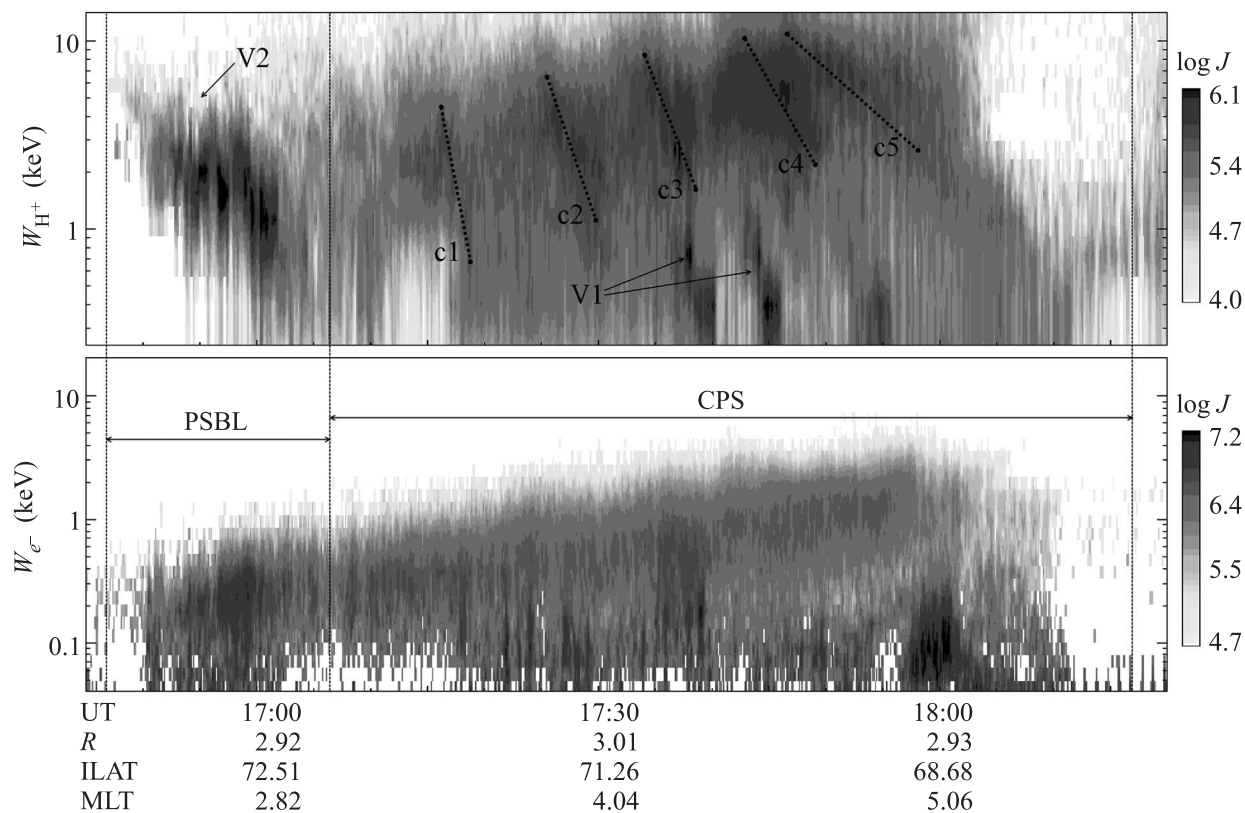


Рис. 1. Энерговременные спектрограммы протонов (H^+) и электронов (e^-) по данным спутника ИНТЕРБОЛ-2 на 03.11.1996 г. (R – геоцентрическое расстояние в радиусах Земли; ILAT – инвариантная широта в градусах; MLT – магнитное местное время в часах; W – энергия в кэВ; $\log J$ – код, соответствующий логарифму дифференциального потока частиц, в частицах/см²·с·ср·кэВ; V1 – дисперсионные структуры ионосферного происхождения; V2 – дисперсионная структура VDIS; максимальные и минимальные энергии дисперсионных структур c1–c5, соответствующих дифференциальному потоку на уровне $2.7 \cdot 10^5$ протон/см²·с·ср·кэВ, отмечены точками на спектрограмме протонов; PSBL – пограничный плазменный слой; CPS – центральный плазменный слой)

ми точками обоих полушарий Земли. Они регистрируются на геостационарных высотах $6.6R_E$ [12, 13] и в ночном секторе плазменного слоя на $\sim 9-10R_E$ [14, 15]. В отличие от бимлетов “баунсирующие” ионные кластеры образуются в CPS, в областях квазидипольного и дипольного геомагнитного поля. Их дисперсия по энергии объясняется действием время-пролетного (TOF – Time Of Flight) эффекта, когда энергичные частицы доходят до спутника за более короткое время, чем низкоэнергичные. Было показано, что баунсирующие кластеры возникают в результате ускорения ионов на экваторе импульсным электрическим полем, обусловленным диполизацией магнитного поля хвоста [16, 17]. Они наблюдались в виде дисперсионных полос вне экваториальной плоскости в CPS [8] и в авроральной зоне [18].

Отметим, что исследования процессов формирования PSBL и CPS представляют значительный интерес для понимания динамики состояния раз-

личных плазменных образований, в частности основных областей, содержащих ускоренные заряженные частицы, в магнитосферах планет. В данной работе, используя возможности зондирования всего магнитосферного хвоста с космического аппарата ИНТЕРБОЛ-2, мы анализируем случай наблюдения множественных дисперсионных ионных структур 3 ноября 1996 г. в плазменном слое в послеполуночном секторе магнитного местного времени MLT. Уникальность этого случая заключается в том, что центральный плазменный слой не содержит обычно присутствующей диффузной термализованной популяции ионов. Результаты анализа касаются транспорта ионных кластеров в PSBL и CPS, отождествления их природы и локализации источников инжекции, а также их роли в формировании плазменного слоя. Данные наземных обсерваторий по AE-индексам, а также данные по магнитному полю и плазме в солнечном ветре, полученные по измерени-

ям с космического аппарата WIND, привлечены для исследования механизма генерации ионных кластеров.

Экспериментальные результаты. Измерения плазменных популяций проводились спектрометрическим комплексом ИОН на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 (“Авроральный зонд”). Спутник вращался относительно оси, направленной на Солнце, с периодом 2 мин, что позволяло получать развертку по питч-углам. Комплекс спектрометров состоял из двух датчиков ионов H^+ , He^{++} , He^+ , O^+ (использовался фильтр Вина, позволявший производить разделение ионов по массам) в диапазоне 5–14000 эВ/заряд и двух датчиков электронов в диапазоне энергий 10–22000 эВ. Полное описание спектрометров ИОН приведено в [19]. Мы анализируем потоки H^+ , т.к. интенсивности в других каналах ионов в плазменном слое для рассматриваемого случая были на уровне фона. Полное время сканирования спектра по 16 энергетическим уровням для протонов и 32 для электронов составляло 7.5 и 3.75 с соответственно.

Энерговременные спектрограммы дифференциального потока протонов и электронов по измерениям 03.11.1996 г. представлены на верхней и нижней панелях рис. 1 соответственно. При движении от полярной шапки, где отсутствуют значимые потоки частиц, к экваториальным широтам спутник пересекает сначала PSBL от UT = 16:47 до UT = 17:07, а затем CPS до UT = 18:17. Граница между PSBL и CPS определялась по средней энергии электронов. В пограничном плазменном слое она составляла $\langle We \rangle \sim (200-300)$ эВ, а в центральном возрастала с уменьшением инвариантной широты и достигла значения ~ 1.6 кэВ в UT $\sim 18:00$. В области PSBL регистрируется протонная структура VDIS (V2 на рис. 1), состоящая из нескольких субструктур, что указывает на генерацию нескольких бимлетов в хвосте магнитосферы. В CPS наблюдаются энергодисперсионные структуры протонов c1–c5. Эти структуры являются следами ионных кластеров, распространяющихся по центральному плазменному слою и в данном случае формирующих его практически полностью. В CPS видны также две структуры низкоэнергичных ионов H^+ с энергиями < 1.2 кэВ (обозначенные как V1), имеющие направленное к Земле продольное питч-угловое распределение. Эти структуры имеют ионосферное происхождение. Ионы ускоряются в сопряженном полушарии продольным электрическим полем и образуют дисперсионную кривую подобного вида из-за радиального дрейфа протонов разной энергии при распространении их в магнитосфере [20, 21]. Вблизи экваториального края в UT = 18:05–

18:15 регистрируется “провал” потока протонов 2.5–14.0 кэВ. Он связан с тем, что магнитный дрейф превалирует над дрейфом $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. В результате протоны указанного энергетического диапазона разворачиваются на запад и идут вокруг Земли. При этом время жизни таких протонов будет меньше времени их прохода в утренний сектор [22].

Протяженность структур c1–c5 по инвариантной широте возрастает по мере приближения к Земле (рис. 1). Это является свидетельством того, что источником инжекции для каждого последующего кластера служит область, расширенная из-за дисперсии предыдущего кластера. Потоки во VDIS и в структурах c1–c4 имеют близкое к изотропному питч-распределение. Последнее характерно для пучков, пришедших на высоты спутника из экваториальной плоскости магнитосферы. Поток протонов в структуре c5 имеет максимум вблизи питч-угла 90° и минимум в конусе потерь. Это означает, что кластер в своем движении до момента наблюдения спутником проводит в магнитосфере больше времени, чем каждый из кластеров c1–c4. Время жизни c5 больше времени движения ионов до ионосферы, т.е. достаточно для выхода ионов из конуса потерь.

Средняя энергия кластеров $\langle W_N \rangle$ составляет: 2.79, 4.50, 5.60, 7.15, 7.36 кэВ для структур c1, c2, c3, c4, c5 соответственно. Нетрудно заметить, что среднюю энергию для ионных кластеров от c1 до c4 можно выразить как $\langle W_N \rangle = \langle W_1 \rangle N^A$, где $\langle W_1 \rangle$ – средняя энергия первого кластера, а N – номер кластера. Другими словами, энергия $\langle W_N \rangle$ при N от 1 до 4 обладает масштабной инвариантностью (скейлингом) с индексом $A = 0.66$, т.е. принадлежит к однородному ряду. Средняя энергия кластера c5 не подчиняется указанному закону, что может быть связано с различной природой этого кластера и кластеров c1–c4 (данное предположение будет рассмотрено далее).

Если бы все протонные кластеры имели один источник, то инжекция частиц во всех кластерах с бесконечно большой скоростью ($1/V = 0$) наблюдалась бы в одно и то же время и на одной и той же инвариантной широте. Чтобы протестировать это, мы построили зависимость обратной скорости следов кластеров от широты их наблюдения в CPS (рис. 2). Трассирование показывает, что основным механизмом при распространении кластеров c1–c4 нельзя считать ТОФ-эффект, т.к. для каждого ионного кластера существует своя широта, с которой он инжектируется. Структуры c1–c4 отстоят друг от друга по широте на 0.4–0.5 градусов (с учетом распространения и отражения пучков ионов в магнитосфере). Последнее согласуется с результатами численного рас-

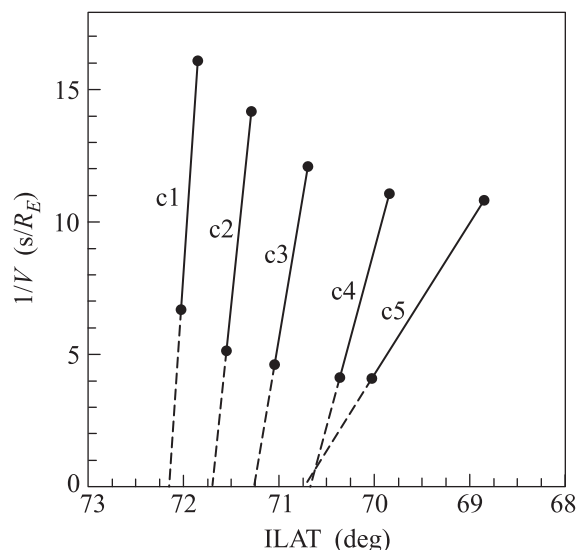


Рис. 2. Зависимости обратной скорости ионных кластеров $1/V$ от инвариантной широты $ILAT$ (R_E – радиус Земли; для трассируемых кластеров $c1$ – $c5$ использованы точки, соответствующие максимальным и минимальным энергиям структур $c1$ – $c5$ с рис. 1)

чета для магнитно-спокойного периода, выполненного в [9]. Максимальная энергия протонов в каждой последующей структуре увеличивается на 2.1–3.0 кэВ, что характерно для взаимодействия пучка с токовым слоем [9, 10]. Согласие экспериментальных данных с модельными расчетами позволяет заключить, что $c1$ – $c4$ в CPS есть эхо-кластеры первичного бимлета из PSBL. Их дисперсия связана с эффектом фильтрации протонов по скоростям под действием дрейфа $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ при распространении пучков в магнитосфере.

Инжекция $c4$ и $c5$ произошла на очень близких широтах (рис. 2). Это может означать, что источники для них находятся практически в одной области геомагнитного хвоста или даже имеется один источник инжекции. Измерения с одного спутника не дают возможности разделить пространственные и временные вариации потоков протонов. Кластер $c5$ простирается на 1.2° по широте, а $c1$ – $c4$ – на 0.2 – 0.5° . Кроме того, прирост максимальной энергии для $c5$ по сравнению с $c4$ составляет всего 0.3 кэВ. Отсюда следует, что этот кластер, возможно, не связан с образованием от бимлета из PSBL. Трассирование позволяет оценить расстояние, пройденное $c5$ от возможного источника, в предположении, что дисперсия вызвана ТОФ-эффектом. Расстояние непосредственно вычисляется делением разности времен прохождения $c5$ (в с) на разность обратных скоростей (в с/ R_E). Мы получаем расстояние $110R_E$. Для восста-

новления источника использовалась модель магнитосферы T-87 [23]. Источник инжекции должен располагаться на $\sim 12.3R_E$ в экваториальной области. Результаты трассирования позволяют предположить, что $c5$ может являться осциллирующим между двумя полушариями ионным кластером, совершившим 1.25 баунс-периода в CPS.

Обсуждение результатов и выводы. Рассмотрим особенности формирования CPS исходя из результатов события 03.11.1996 г.: 1) отсутствие наложения эхо-бимлетов от первичных бимлетов, наблюдаемых в PSBL; 2) доминирование эхо-бимлетов $c1$ – $c4$ в наполнении CPS; 3) образование баунсирующего ионного кластера $c5$.

1. Моделирование процессов образования и распространения бимлетов с использованием 2D-модели и сравнение с высыпаниями протонов в авроральной зоне на высотах 500–2000 км были проведены в [9]. Затем более детальные модельные расчеты были сделаны в [10]. Ионы первичных бимлетов отражаются в зеркальных точках и вновь взаимодействуют с токовым слоем в более близкой к Земле области, образуя эхо-бимлеты. Согласно модельным расчетам процесс взаимодействия ионных пучков с токовым слоем может повторяться до 3–5 раз. При этом имеют место интерференция эхо-бимлетов и их наложение друг на друга. В нашем случае наложения эхо-бимлетов в CPS не наблюдается. Причиной этого может являться образование $c1$ – $c4$ только от одного бимлета. Оценим время жизни первичного бимлета и время распространения пучка от спутника до экваториальной плоскости (наблюдение VDIS) и обратно до спутника (наблюдение эхо-кластера $c1$). Время полета спутника от начала наблюдения структуры VDIS до $c1$ равняется ~ 30 мин. Из них сама структура VDIS наблюдается в течение 15 мин. Протоны с минимальной энергией 0.8 кэВ пройдут расстояние $\sim 55R_E$ (от спутника до экватора и обратно) также за 15 мин. По измерениям непосредственно в хвосте магнитосферы время жизни бимлетов составляет 10–15 мин [24]. Из соотношения рассматриваемых времен следует, что структура $c1$ может наблюдаться от последнего самого ближайшего к Земле первичного бимлета.

2. В качестве наполнителей CPS в рассмотренном случае выступают дисперсионные структуры $c1$ – $c4$ и $c5$, хотя обычно он содержит диффузные термализованные ионные популяции. По данным [9, 11] при наблюдении эхо-бимлетов в авроральной области такие популяции присутствовали во всех случаях. Отметим, что измерения четырех актов образования эхо-бимлетов $c1$ – $c4$ проходили в необычных условиях. Отсутствие выноса ионосферных ионов H^+

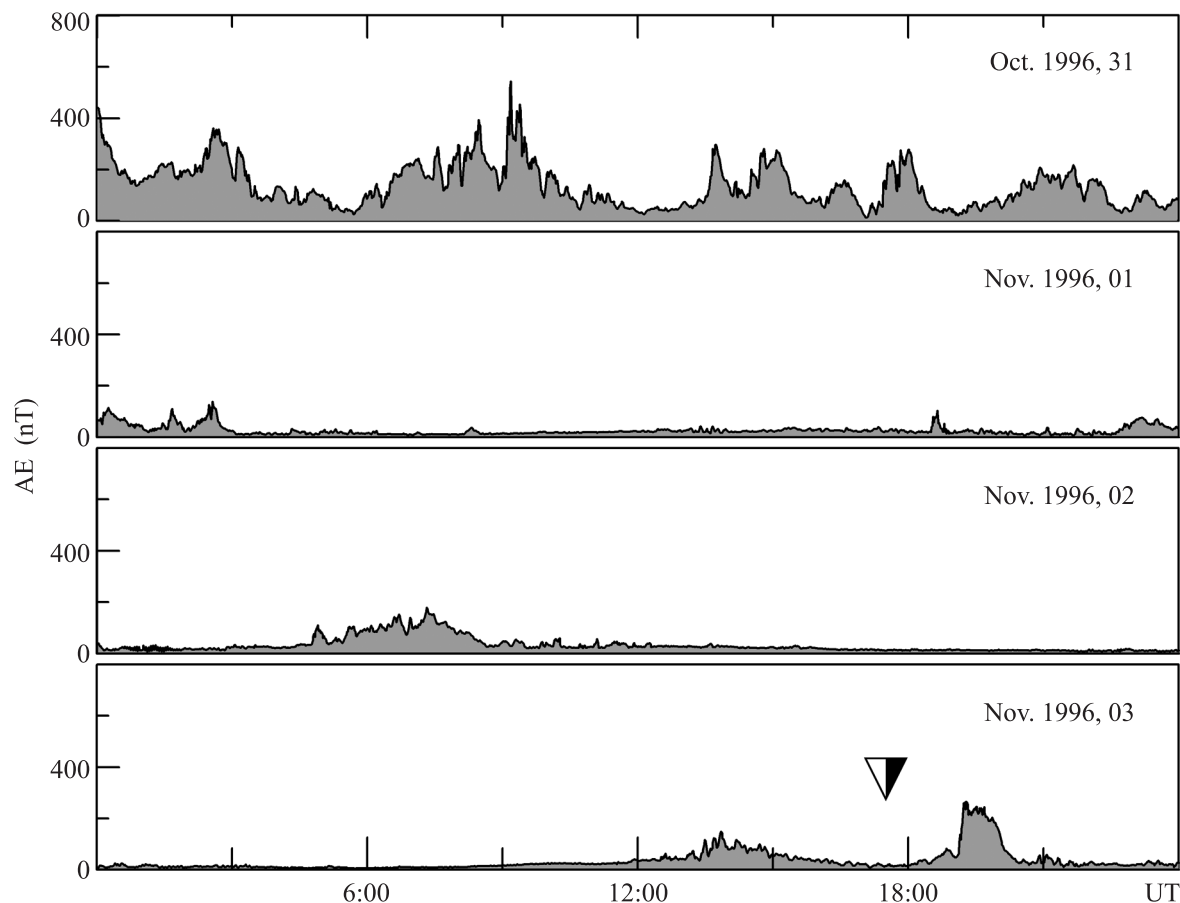


Рис. 3. Диаграмма АЕ-индексов 31.10.1996 г.–03.11.1996 г. (стрелкой показан период сечения плазменного слоя спутником ИНТЕРБОЛ-2)

и O^+ с коническим пичч-распределением (так называемых коников, образующихся при взаимодействии ионов с волнами), характерным для возмущенных условий [25, 26], подтверждает данные наземных обсерваторий по АЕ-индексам, согласно которым период 1–3 ноября 1996 г. был исключительно магнитно-спокойным (рис. 3). За сутки до измерений ионных кластеров не превосходило вообще никаких активных процессов, за исключением возмущения в $UT = 12:00–16:00$ 03.11.1996 г., которое в максимуме достигало 150 нТл (в $UT = 13:51$). Экспериментальное свидетельство множественных отражений первичного пучка без эффективного рассеяния его в магнитосфере с образованием эхо-бимлетов вплоть до четвертого порядка может указывать на режим длительной диффузии частиц из плазменного слоя перед наблюдаемым событием. Таким образом, отсутствие термализованных популяций может быть связано с состоянием CPS в магнитно-спокойный период.

3. Появление баунсирующих кластеров обычно связывают с ускорением ионов на экваторе импульс-

ным электрическим полем. Детальные модельные расчеты [16, 17] показали, что такое поле является индуцированным и связано с процессом диполяризации геомагнитного поля. Поэтому представляется интересным проанализировать условия, при которых появляется баунсирующий кластер с5. На рис. 4 представлены зависимости B_z -компоненты межпланетного поля и динамического ионного давления от времени в солнечном ветре для рассматриваемого события. Данные космического аппарата WIND показывают, что величина B_z начала уменьшаться, а давление резко увеличилось с 3.1 до 3.9 нПа (отметим, что импульс давления совпадает с началом прохождения спутником ИНТЕРБОЛ-2 центрального плазменного слоя). Появление импульса давления должно привести к реконфигурации магнитного хвоста, а также к импульсному ускорению протонов в CPS.

Итак, можно констатировать, что в данной работе впервые экспериментально выявлено существование режима формирования центрального плазменного слоя кластерными ионными структурами, ускоренными в результате повторяющихся взаимодей-

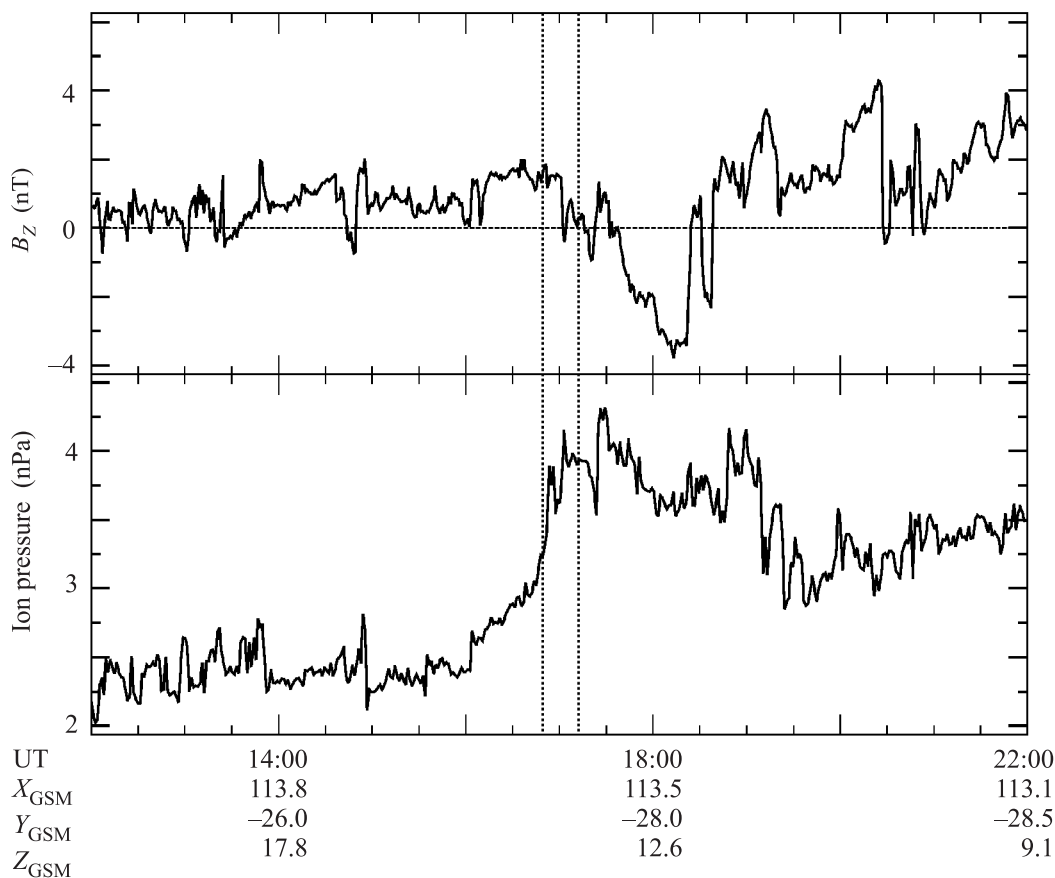


Рис. 4. Зависимости B_z -компоненты магнитного поля (в нТл) и ионного давления (в нПа) от UT на 03.11.1996 г. по данным космического аппарата WIND, координаты которого указаны в GSM-системе (вертикальными прямыми показан период измерения плазменного слоя спутником ИНТЕРБОЛ-2)

ствий пучков с токовым слоем хвоста магнитосферы. При этом процессы термализации ионов отсутствуют.

Мы с благодарностью отмечаем, что АЕ-индексы получены в Мировом центре данных в Киото (WDC, Kyoto), а ключевые параметры космического аппарата WIND – на CDAWeb. Мы благодарим Э. Пену (IRAP) и А.Л. Глазунова (ИКИ РАН) за визуализацию данных ИНТЕРБОЛ-2. Работа выполнена при поддержке программы П-22 президиума РАН.

1. E. Eastman, L. A. Frank, W. K. Peterson, and O. W. Lennartsson, *J. Geophys. Res.* **89**, 1553 (1984).
2. G. K. Parks, C. S. Lin, K. A. Anderson, and H. Reme, *J. Geophys. Res.* **84**, 6471 (1979).
3. K. Takahashi and E. W. Hones, *J. Geophys. Res.* **93**, 8558 (1988).
4. Л. М. Зеленый, Е. Е. Григоренко, А. О. Федоров, Письма в ЖЭТФ **80**(10), 771 (2004).

5. R. A. Kovrazhkin and J.-A. Sauvaud, in *Auroral Phenomena and Solar-terrestrial Relations, CAWSES Handbook-1*, (2004), p. 165.
6. L. M. Zelenyi, R. A. Kovrazhkin, and J. M. Bosqued, *J. Geophys. Res.* **95**, 12119 (1990).
7. O. W. Lennartsson, K. J. Trattner, H. L. Collin, and W. K. Peterson, *J. Geophys. Res.* **106**, 5859 (2001).
8. J.-A. Sauvaud and R. A. Kovrazhkin, *J. Geophys. Res.* **109**, A12213 (2004).
9. M. Ashour-Abdalla, L. M. Zelenyi, J. M. Bosqued, and R. A. Kovrazhkin, *Geophys. Res. Lett.* **19**(6), 617 (1992).
10. M. Ashour-Abdalla, L. M. Zelenyi, V. Perroomian, R. L. Richard, and J. M. Bosqued, *J. Geophys. Res.* **100**, 19191 (1995).
11. J. M. Bosqued, M. Ashour-Abdalla, M. El Alaoui, V. Perroomian, L. M. Zelenyi, and C. P. Escoubet, *J. Geophys. Res.* **98**, 19181 (1993).
12. J. M. Quinn and C. E. McIlwain, *J. Geophys. Res.* **84**, 7365 (1979).
13. J. M. Quinn and D. J. Southwood, *J. Geophys. Res.* **87**, 10536 (1982).

14. Y. Kazama and M. Mukai, *Geophys. Res. Lett.* **30**(7), 1384 (2003).
15. Y. Kazama and M. Mukai, *J. Geophys. Res.* **110**, A07213 (2005).
16. B. H. Mauk, *J. Geophys. Res.* **91**, 13423 (1986).
17. D. C. Delcourt and J. A. Sauvaud, *J. Geophys. Res.* **99**, 97 (1994).
18. M. Hirahara, T. Mukai, T. Nagai, N. Kaya, H. Hayakawa, and H. Fukunishi, *J. Geophys. Res.* **101**, 7749 (1996).
19. J.-A. Sauvaud, H. Barthe, C. Aoustin, J. J. Thocaven, J. Rouzaud, E. Penou, R. A. Kovrazhkin, and K. G. Afanasiev, *Ann. Geophys.* **16**, 1056 (1998).
20. J. D. Winningham, J. L. Burch, and R. A. Frahm, *J. Geophys. Res.* **89**, 1749 (1984).
21. J. M. Bosqued, J. A. Sauvaud, D. Delcourt, and R. A. Kovrazhkin, *J. Geophys. Res.* **91**, 7006 (1986).
22. R. A. Kovrazhkin, J.-A. Sauvaud, and D. C. Delcourt, *Ann. Geophysicae* **17**, 734 (1999).
23. N. A. Tsyganenko, *Planet. Space Sci.* **35**, 1347 (1987).
24. E. E. Grigorenko, J.-A. Sauvaud, and L. M. Zelenyi, *J. Geophys. Res.* **112**, A05218 (2007).
25. E. G. Shelley, R. G. Johnson, and R. D. Sharp, *J. Geophys. Res.* **77**, 6104 (1972).
26. E. Sagawa, A. W. Yau, B. A. Whalen, and W. K. Peterson, *J. Geophys. Res.* **92**, 12241 (1987).