

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ НЕАДИАБАТИЧЕСКИ УСКОРЕННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

NON-LINEAR EFFECTS OF FORMATION OF NON-ADIABATIC ACCELERATED ION BEAMS IN THE EARTH MAGNETOSPHERE

М.С. Долгоносов¹, Л.М. Зеленый¹, В. Перумян²

¹*Институт космических исследований РАН*

²*Университет Калифорнии, г. Лос Анжелес, США*

We investigate the nonlinear influence of the cross-tail currents carried by beamlets (substructures of PSBL ion beams) on the topology of the magnetic field, and, correspondingly, on the dispersion properties of these substructures self-consistently generated in this field. We found that some of the peculiarities of beamlet shapes found recently in CLUSTER data could be explained by taking into account the nonlinearity of the system. This model explains the steepening of local beamlets dispersion in comparison with the global dispersion of the enveloping VDIS structure. At the same time we found that velocity filter effects operating during beamlets propagation towards the Earth prevent the sign's reversal of this local dispersion.

Введение

Как известно, процессы, протекающие вблизи сепаратрисы, играют очень важную роль в динамике многих процессов. В геомагнитном хвосте роль сепаратрисы играет Пограничная область Плазменного Слоя (ППС), разделяющая открытые и закрытые силовые линии магнитного поля Земли. Одним из интересных процессов, изучаемых в ППС, являются когерентные и пространственно локализованные пучки ионов - бимлеты, обладающие сложным пространственно - временным поведением [4-7,11,12,15,].

В работе [10] была предложена модель формирования ионных пучков (названных в англоязычной литературе VDIS), основанная на неадиабатическом механизме ускорения в скрещенных электромагнитных полях. При таком ускорении частица, попавшая в токовый слой с малой, поперечной к слою, компонентой магнитного поля B_n , "проворачивается" в слое на половину своей ларморовской орбиты (напоминаем, что движение частицы вблизи слоя уже не подчиняется стандартному приближению ведущего центра), т.е. смещается поперек слоя на расстояние $2r_i$ (r_i – ларморовский радиус частицы в поле B_n), после чего вылетает из токового слоя. Поскольку в магнитосфере всегда существует поле E_y , направленное с утренней стороны на вечернюю, возникшее за счет движения магнитосферы относительно солнечного ветра, частица при таком смещении приобретает

дополнительную энергию $\Delta W = 2r_i E_y = \frac{m_i}{2} V_c^2 = \frac{m_i c^2}{2} \left(\frac{E_y}{B_n} \right)^2$.

Данные спутника AUREOL-3 [16] показали, что часто регистрируемые в ППС ионные пучки состоят из мелкомасштабных субструктур (как по энергиям, так и по широте наблюдения), названные бимлетами. Теоретическая модель формирования бимлетов, представленная в работе [3], описывает динамику ионов, как неадиабатическое (в смысле сохранения классического инварианта – магнитного момента частицы μ) ускорение в центре токового слоя в присутствии электрического поля, которую можно охарактеризовать приближенным (т.н. квазиадиабатическим) интегралом движения $I_z = \frac{1}{2p} \oint \mathcal{H} dz$, дающим возможность приближенно проинтегрировать уравнения движения частицы [3]. Отличительной чертой данного механизма ускорения является объяснение детерминистического хаоса, возникающего в системе. Хаос возникает из-за скачков инварианта I_z при пересечении токового слоя, что может приводить к захвату частиц в токовом слое и их перемешиванию в фазовом пространстве. Для определенного набора

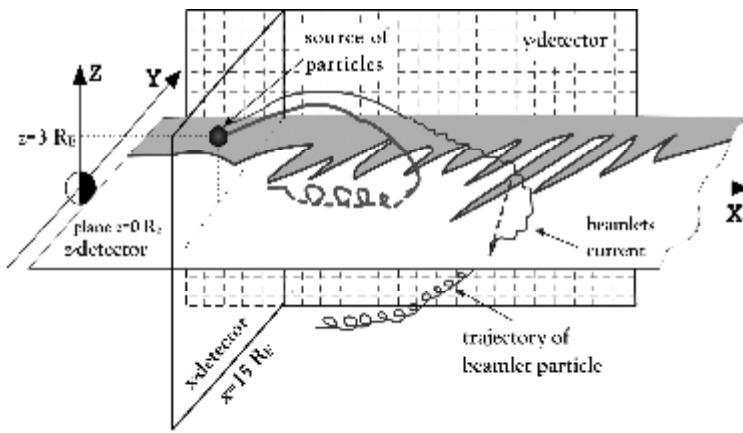


Рис.1. Схематическая модель численного эксперимента, показывающая относительное расположение виртуальных детекторов и источника частиц.

Запуск мульти-спутникового космического эксперимента Cluster привел к многочисленным многоточечным наблюдениям бимлетов в ППС [8-9, 14]. В частности, в этих работах на основе наблюдений бимлетов при входе и выходе из ППС, было показано, что в то время, как средняя дисперсия ионного пучка в ППС и его субструктур (бимлетов) достаточно хорошо соответствует результатам моделирования, представленных в работе [1], локальная дисперсия отдельного бимлета отличается, а иногда значительно, от "средней" дисперсии VDIS. Обе группы авторов сделали вывод, что для объяснения данного явления необходимо учитывать различие во временах полета частиц различных энергий от источника в токовом слое, в котором прошло ускорение, до места наблюдения – местонахождения спутника. Независимо друг от друга, они также предположили, что бимлеты являются результатом некоррелированных импульсивных инъекций в дальней области геомагнитного хвоста.

В этой статье, мы предлагаем альтернативную гипотезу, объясняющую причину образования различных дисперсий: «средней» дисперсии VDIS и дисперсий ее субструктур-бимлетов. Мы сделаем первый шаг к исследованию бимлетов в рамках самосогласованной модели, учитывающей вклад токов частиц. Стоит отметить, что компьютерное моделирование динамики частиц проводилось для всей популяции частиц, но во время взаимодействия частиц с токовым слоем геомагнитный хвост выбирал группу частиц,двигающихся вдоль линий магнитного поля и, в то же время, вносящих основной вклад в ток поперек хвоста. После нескольких повторений, наша система, сходится к неравновесному квазистойчивому состоянию, поскольку нет никаких существенных различий между последующими повторениями. Хотя такой подход составляет только начальный этап перехода системы к динамической самосогласованности, однако результаты, полученные даже от первой итерации, довольно ясно иллюстрируют влияние нелинейных эффектов на формирование дисперсионной структуры бимлетов.

Описание схемы моделирования.

Наше исследование основано на численном моделировании динамики ионной популяции в рамках глобальной 2-мерной аналитической модели магнитосферного хвоста, представленной в работе [17]. Согласно работе [17], магнитное поле задавалось аналитическими формулами:

параметров (основным регулирующим параметром здесь является величина компоненты магнитного поля, перпендикулярная токовому слою) возможно существование областей "регулярного" ускорения. Внутри этих областей происходит компенсация скачков инварианта I_z иона при входе и выходе из токового слоя, что ведет к формированию бимлетов, т.е. почти когерентных высокоэнергичных ионных пучков.

$$B_x = A_z F(x) \tanh(zF(x)),$$

$$B_z = A_z \frac{dF(x)}{dx} \left[\frac{1}{F(x)} - z \tanh(zF(x)) \right],$$

$$F(x) = \frac{1}{L} \left(\frac{x}{x_L} \right)^{-q},$$

где $q=0.4$, $A_z=55$, $x_L=45 R_E$, $L=3 R_E$, $R_E=6380$ км - радиус Земли. В центре токового слоя, т.е. при $z=0$, $B_z = -A_z \frac{q}{x}$. Частицы ускоряются под действием постоянного и однородного во всей области моделирования электрического поля, направленного «утро-вечер» ($E_y=0.1$ мВ/м) и соответствующего электрическому полю, существующему в хвосте магнитосферы в результате проникновения внутрь нее межпланетного электрического поля, связанного с относительным движением Земли и потока солнечного ветра. Источник протонов с функцией распределения $f_0 \approx \exp((v_{\parallel} - u)^2 + v_{\perp}^2) / v_{th}^2$, где $0.5 m_i v_{th}^2 = 0.3$ кэВ, $u = 200$ км/с располагался в северной мантии ($x=15 R_E$, $z=3 R_E$, см. Рис. 1). При этом основная группа частиц должна попадать во все характерные области, внутри которых можно ожидать «регулярного» ускорения, причем число таких областей должно быть хотя бы больше 5. Частицы из источника выпускались одновременно, и их общее число равнялось $N=70\,000$. Их траектория вычислялась методом Рунге-Кутты 4 порядка. Информация об их движении собиралась на виртуальных детекторах (плоскости $x=\text{const}$ и $y=\text{const}$, расположенные эквидистантно, $\Delta x=5 R_E$, $\Delta y=0.25 R_E$), на которых отмечалась точка пересечения, энергия частицы и время, прошедшее с момента запуска. На Рис. 1 схематично показано положение одного из таких детекторов, $x=15 R_E$. Чтобы отразить конечную ширину геомагнитного хвоста, ионы удалялись из области моделирования, как только они достигали $y < -40 R_E$. Схема численного эксперимента представлена на рис. 1.

Наше исследование состояло из двух этапов. Вначале, в рамках заданного начального магнитного поля были вычислены траектории ионов и получен ток, текущий поперек хвоста магнитосферы и созданный этими частицами. Затем область моделирования была разбита на ячейки размером $0.275 R_E \times 0.8 R_E$ в плоскости X-Z. Мы

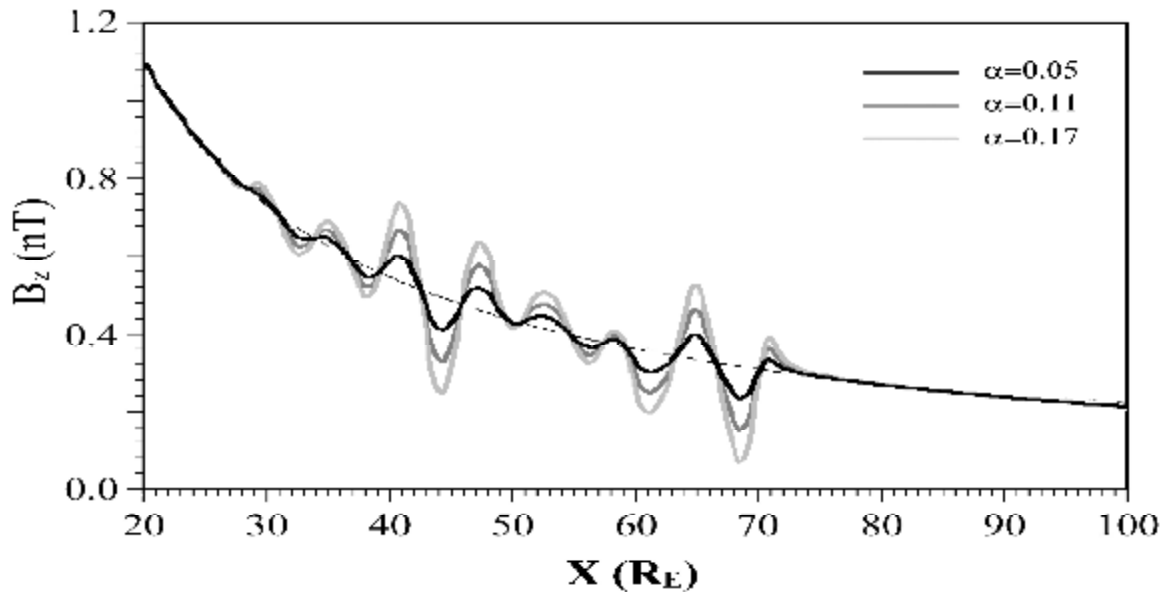


Рис.2. Первоначальный профиль магнитного поля B_z и его последующие возмущения для $\alpha=0.05$, 0.11 , 0.17 .

предположили, что ток, текущий в ячейке, представляет собой бесконечно длинный провод радиуса $0.5 R_E$ (центры ячейки и провода совпадают), внутри которого плотность

тока равна плотности тока в ячейках области моделирования, а в центре провода ток равен нулю. Это позволило нам воспользоваться законом Био-Савара с тем, чтобы вычислить возмущение начального магнитного поля в результате неадиабатического движения ионов в токовом слое. Перекрытие проводов соседних ячеек приводило к сглаживанию конечного профиля магнитного поля.

На следующем шаге «возмущение» магнитного поля, полученное из токов частиц, прибавлялось к начальному магнитному полю. Степенью нелинейности являлся свободный параметр α , который, по сути, является среднеквадратичным отклонением нового магнитного поля от первоначального профиля магнитного поля при $z=0$. На Рис.2 показано, что токи бимлетов изменяют первоначальное магнитное поле так, что вместо монотонного уменьшения $B_z(x)$ получается намного более сложная, практически гармоническая структура. Так как условия резонансного неадиабатического ускорения очень чувствительны к локальной величине $B_z(x')$, можно ожидать существенных модификаций дисперсионной структуры бимлетов, в то время как «средняя» дисперсия VDIS, определяемая усредненным профилем $B_z(x)$, может остаться относительно неизменной.

Результаты моделирования и обсуждение

Основная цель нашего исследования состоит в том, чтобы понять, как токи, созданные бимлетами, влияют на их собственные дисперсионные свойства. На Рис. 3 представлены результаты моделирования динамики частиц с 4 различными значениями параметра нелинейности α : а) $\alpha=0$, б) $\alpha=0.05$, в) $\alpha=0.11$, д) $\alpha=0.17$. Рис. 3а является

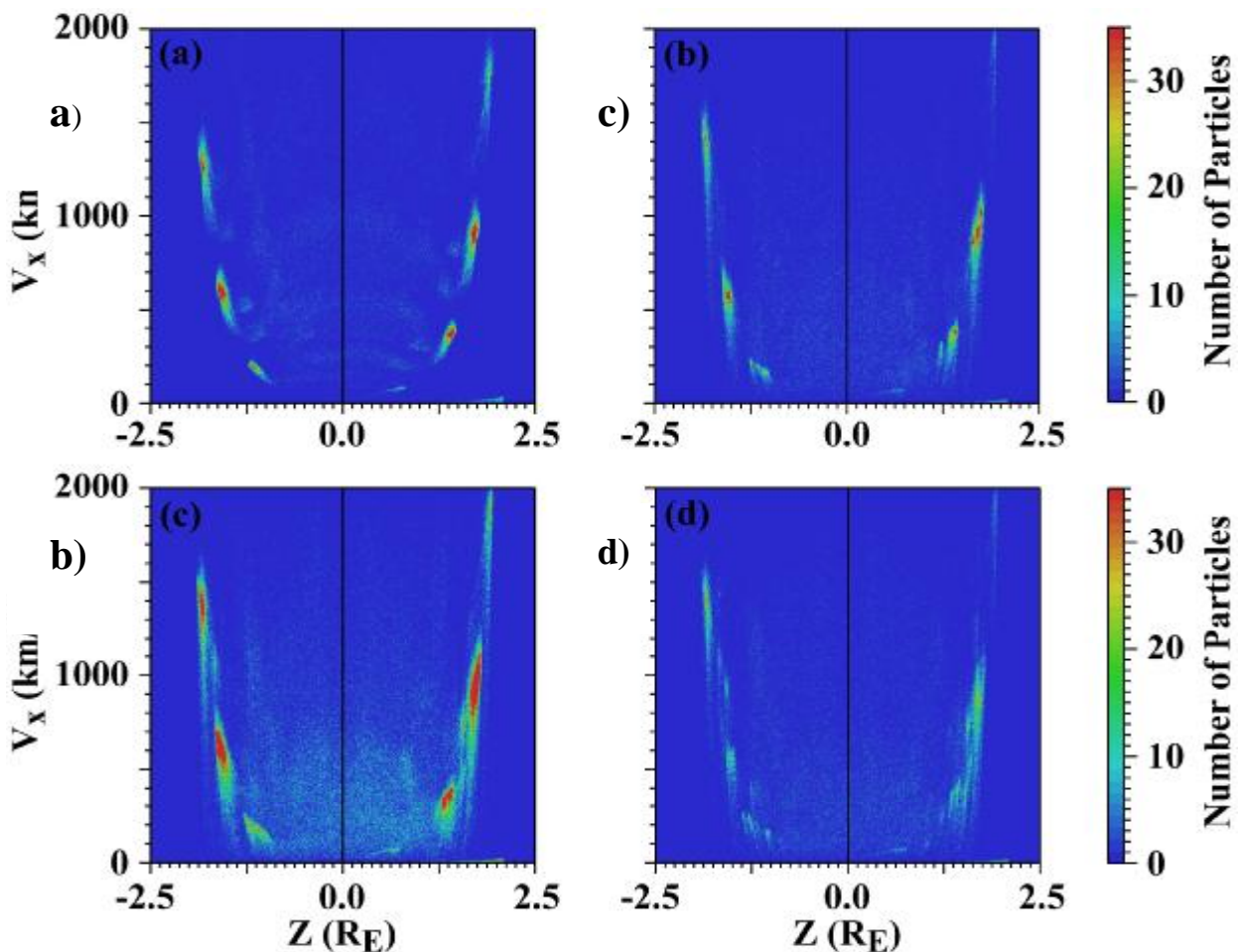


Рис.3. Спектрограммы распределения частиц, полученные в результате моделирования на виртуальном детекторе, расположенном в точке $x_D=10 R_E$ для 4 значений параметра $\alpha=0, 0.05, 0.11, 0.17$.

результатом генерации бимлетов в невозмущенной конфигурации магнитного поля. Данный результат идентичен результатам моделирования, полученным в работе в [2]. Он показывает, что бимлеты – результат естественного неадиабатического ускорения ионов в токовом слое в модели магнитного поля с монотонно уменьшением $B_z(x)$ (как в нашем случае, так и при использовании модели магнитного поля Tsyganenko-89 [2]). Однако, в нелинейных случаях (Рис.3б, с и d), форма и дисперсия каждого отдельного бимлета отличается от невозмущенного случая. Бимлеты удлинняются, приобретают низкоэнергичные «хвосты», формируя, таким образом, более крутую энергетическую дисперсию, чем средний профиль VDIS.

Результаты, полученные в этом исследовании и представленные на Рис.3, довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными (Рис. 3 в работе [8]; Рис. 7 в работе [14]). Так же отчетливо видно, что укрупнение энергетической дисперсии бимлетов не зависит от степени нелинейности, и все характерные нелинейные эффекты, описанные выше, проявляются во всех 3 возмущенных случаях.

Вычисление модификации профиля магнитного поля, состоявшее из запуска частиц, вычисление тока и возмущения магнитного поля, как описано выше, было выполнено несколько раз. Получившиеся серии бимлетов практически ничем не отличались от представленных на Рис.3. Единственное различие заключалось в изменении местоположения источника бимлетов в токовом слое, которое носило периодический характер. К сожалению, ограничения, налагаемые на размер публикации, не позволили нам включить в эту статью результаты последующих итераций. Однако они дают хороший признак динамического характера нелинейного влияния потоков частиц на равновесие геомагнитного хвоста. Этот результат совпадает с результатами, полученными на основе другой численной схемы, опубликованной в работе [13]. Можно предположить, что геомагнитный хвост находится в квазистатическом состоянии, внутри которого, возможно, постоянно существуют нелинейные возмущения магнитного поля, подобные представленным на Рис.2, которые распространяются к Земле с некоторой фазовой скоростью.

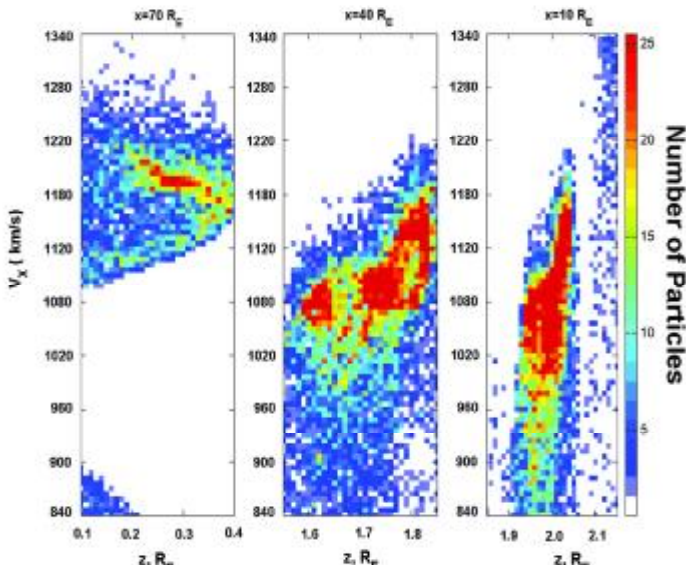


Рис.4. Спектрограмма отдельного бимлета в северном полушарии, полученная на различных расстояниях ($x=70, 40$ и $10 R_E$) при $\alpha=0.05$. Этот рисунок демонстрирует «вращение» бимлета (изменение его дисперсии) по мере движения к Земле.

северного полушария в его эволюции по мере полета к Земле для $\alpha=0.05$ на 3 различных расстояниях: $70 R_E, 40 R_E$ и $10 R_E$. Обратите внимание, что в области формирования (см.

Так как возмущение профиля магнитного поля приводит к появлению интервалов, внутри которых $dB_z(x)/dx > 0$ (см. Рис. 2), можно ожидать, что бимлеты, генерируемые внутри этих интервалов, должны были бы иметь противоположную локальную дисперсию по отношению к бимлетам, сформировавшимся на участках, где $dB_z(x)/dx < 0$). Удивительно, но в результатах нашего моделирования мы никогда не регистрировали бимлеты с отрицательной дисперсией около Земли, независимо от значения параметра нелинейности или числа итераций, менявших профиль магнитного поля. Этот результат можно объяснить процессом, который иллюстрирован на Рис.4, на котором показан один и тот же бимлет из

Рис.2) этого бимлета $dB_z(x)/dx > 0$. Рис.4 иллюстрирует влияние фильтрации частиц по скоростям, приводящее к вращению бимлета против часовой стрелки (в южном полушарии бимлет вращается по часовой стрелке) по мере приближения к Земле. Этот эффект, проявляющийся во время распространения бимлета к Земле, может маскировать формирование бимлетов с отрицательной дисперсией. Более детальное объяснение формирования "отрицательной" дисперсии бимлетов является темой последующих публикаций.

Работа поддержана грантами INTAS Nr.03-51-3738, РФФИ № 04-02-17371, НШ-5359.2006.2.

Список литературы

1. Ashour-Abdalla, M., L.M. Zelenyi, J.M. Bosqued, and R.A. Kovrazhkin. Precipitation of fast ion beams from the plasma sheet boundary layer // *Geophys. Res.Lett.* 1992. 19, No.6, 617.
2. Ashour-Abdalla, M., J. P. Berchem, J. Buchner, L.M. Zelenyi. Shaping of the magnetotail from the mantle: global and local structuring // *J. Geophys. Res.* 1993. 98, 5651.
3. Buechner J., L.M. Zelenyi .Regular and chaotic charged particle motion in magnetotaillike field reversals // *J. Geophys. Res.* 1989. 94, No.A9, 11812.
4. DeCoster, R. J., and L. A. Frank. Observation pertaining to the dynamics of the plasma sheet // *J. Geophys. Res.* 1979. 84, 5099.
5. Eastman, T.E., L.A. Frank, W.K. Paterson, and W. Lennartsson. The plasma sheet boundary layer // *J. Geophys. Res.* 1984. 89, 1553.
6. Forbes, T. G., E. W. Hones, Jr., S. J. Bame, J. R. Asbrige, G. Paschmann, N. Sckopke, C. T. Russell. Evidence for the tailward retreat of a magnetic neutral line in the magnetotail during substorm recovery // *Geophys. Res. Lett.* 1981. 8, 261.
7. Lui, A. T. Y., T. E. Eastman, D. J. Williams, and L. A. Frank (1983), Observations of ions streaming during substorms // *J. Geophys. Res.*, 88, 7753.
8. Keiling, A., et al. New properties of energy-dispersed ions in the plasma sheet boundary layer observed by Cluster // *J. Geophys. Res.*, 2004a. 109, A05215, doi: 10.1029/2003JA010277.
9. Keiling, A., H. Reme, I. Dandouras, J.M. Bosqued, G.K. Parks, M. McCarthy, L. Kistler, E. Amata, B. Klecker, A. Korth, and R. Lundin. Transient ion beamlet injections into spatially separated PSBL flux tubes observed by Cluster-CIS // *Geophys. Res. Lett.* 2004b, 31, L12804, doi:10.1029/2004GL020192.
10. Lyons, L.R. and T.W. Speiser. Evidence for current sheet acceleration in the geomagnetic tail // *J. Geophys. Res.* 1982. 87, 2276.
11. Parks, G. K., C. S. Lin, K. A. Anderson, R. P. Lin, and H. Reme. ISEE-1 and 2 particle observations of outer plasma sheet boundary // *J. Geophys. Res.* 1979, 84, 6471.
12. Parks, G.K., R.M. Song , S.L. Spencer , McCarthy M.P. Budetta, G., et al. Ion beams observed in the near-Earth plasma sheet region on May 10, 1996 // *Geophys. Res. Lett.* 1997. 24, 8, 975.
13. Perroomian V. and L.M. Zelenyi. Large-scale modeling of magnetotail dynamics // *Space Sci. Rev.* 2004b. 95, 15.
14. Sauvaud, J.-A., and R. A. Kovrazhkin. Two types of energy-dispersed ion structures at the plasma sheet boundary // *J. Geophys. Res.* 2004. 109, A12213, doi:10.1029/2003JA010333.
15. Takahashi, K., and E. W. Hones, Jr. ISEE-1 and 2 observations of ion distribution at the plasma sheet-tail lobe boundary // *J. Geophys. Res.* 1988, 93, 8558.
16. Zelenyi L.M., R.A.Kovrazkin, J.M.Bosqued .Velocity-Dispersed ion beams in the Nightside Auroral Zone: AUREOL 3 Observations // *J. Geophys. Res.*(1990. 95, No.A8, 12119.
17. Zwingmann, W. Self-consistent magnetotail theory: Equilibrium structures including arbitrary variation along the tail axis // *J. Geophys. Res.* 1983. 88, 9101.