

# Скейлинг энергии ионных пучков в низковысотном пограничном плазменном слое

Р. А. Ковражин<sup>1)</sup>, М. С. Долгоносков, Ж.-А. Сово<sup>+</sup>

Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 16 января 2012 г.

Работа посвящена анализу скейлинга (масштабирования) энергии ионных пучков бимлетов в резонансных областях низковысотного пограничного плазменного слоя по результатам измерений с космических аппаратов ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER на расстояниях 3.0–6.0 радиусов Земли и численного моделирования процессов ускорения ионов в токовом слое геомагнитного хвоста Земли. Экспериментальная проверка теоретически предсказанного ранее скейлинга  $W_N \sim N^A$  (где  $W_N$  – энергия на  $N$ -м резонансе,  $A \sim 1.33$ ) показала, что реальный скейлинг резонансных энергий имеет широкие вариации ( $A \in [0.61; 1.75]$ ) и не зависит от геомагнитных индексов  $K_p$  и  $AE$ . Модельные расчеты с учетом электрического поля  $E_z$ , перпендикулярного токовому слою, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Они свидетельствуют об увеличении скейлинга при доминировании ионного тока и его уменьшении при доминировании электронного тока ( $A > 1.33$  либо  $A < 1.33$  соответственно).

**Введение.** При переносе частиц плазменной мантии в пограничный плазменный слой (PSBL) они ускоряются на геоцентрических расстояниях порядка  $(30\text{--}100)R_E$  (где  $R_E$  – радиус Земли), а затем распространяются вдоль магнитных силовых линий в авроральную зону в форме ионных продольных пучков. Вблизи внешней границы плазменного слоя потоки ионов со скоростями вплоть до 2000 км/с были зарегистрированы на многих высокоапогейных космических аппаратах [1–3]. В токовом слое формирование ионных популяций происходит с образованием внутренних мелкомасштабных пучков (так называемых бимлетов [4, 5]), ускоряющихся электрическим полем на разных расстояниях вдоль магнитосферного хвоста в конечных выделенных резонансных областях. В работе [6] было продемонстрировано, что природа этих резонансных областей связана со свойствами детерминированного хаоса, возникающего в системе. Именно такие регулярные резонансные области и могут быть источниками бимлетов, покидающих токовый слой.

В результате исследований механизма ускорения частиц в токовом слое была найдена связь между энергией бимлета  $W_N$  и номером  $N$  соответствующей резонансной области:  $W_N \sim N^{4/3}$  [7]. Эта зависимость (скейлинг, или масштабирование энергии бимлетов) оказывается инвариантной относительно модели магнитного поля и первоначальной функции распределения частиц. Таким образом, за-

кон распределения энергий зависит от расположения вдоль хвоста магнитосферы источников, генерирующих ионные пучки, распространяющиеся к Земле. Он носит некий универсальный характер и не зависит от электрического поля. Как указывают авторы [7], найденный закон отражает достаточно идеализированную модель токового слоя из-за нескольких ограничений: геометрии модели, ее линейности, пренебрежения волновыми явлениями. Действительно, добавление электрического поля  $E_z$ , перпендикулярного токовому слою, приводит к изменению скейлинга энергии бимлетов [8], причем показатель может быть как больше, так и меньше  $4/3$ . В первом случае резонансные области смещаются к Земле, во втором – от Земли. Результаты численного моделирования показали, что происходит смещение резонансных областей генерации ионных пучков из-за нелинейных эффектов в результате влияния  $E_z$  [8].

“Автографы” продольных ионных пучков в авроральной зоне были исследованы по дисперсионным структурам с энергиями 1–20 кэВ по данным спутника Ореол-3 [9–11] на высотах 500–2000 км вблизи полярной границы ночной авроральной области (так называемые VDIS, Velocity Dispersed Ion Structures). Затем энергодисперсионные структуры были зарегистрированы другими низкоапогейными спутниками [12–14]. Наиболее подробно их характеристики были исследованы выше авроральной зоны на геоцентрических расстояниях  $(3\text{--}7)R_E$ , т.е. в самом низковысотном PSBL, с помощью космических аппаратов ИНТЕРБОЛ-2, CLUSTER и POLAR [15–17]. На-

<sup>1)</sup> e-mail: rkovrazh@iki.rssi.ru

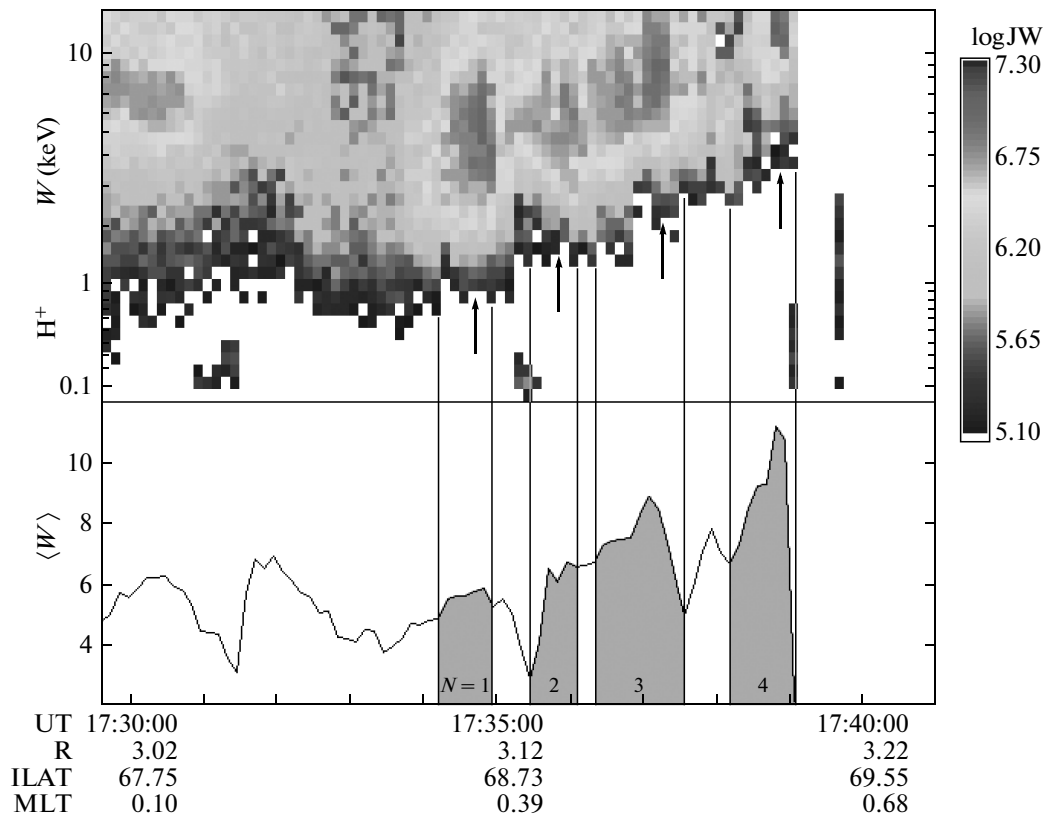


Рис. 1. Энерговременная спектрограмма ионов по данным спутника ИНТЕРБОЛ-2, 26.07.1997 г. ( $R$  – геоцентрическое расстояние в радиусах Земли; ILAT – инвариантная широта; MLT – магнитное местное время;  $\log JW$  – код, соответствующий логарифму дифференциального потока энергии, в  $\text{кэВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{кэВ}^{-1}$ )

блюдаются VDIS в магнитно-спокойные периоды и на фазе восстановления суббурь. Их основным свойством является увеличение энергии с повышением инвариантной широты. Было показано, что VDIS состоят из нескольких мелкомасштабных субструктур [18], формирующихся при распространении ионных пучков из экваториальной области PSBL.

Так как распределение энергий субструктур VDIS зависит от инвариантной широты, т.е. от номера  $N$  субструктуры, чрезвычайно интересно провести экспериментальную проверку закона распределения энергий ионных пучков, теоретически предсказанного в [7], и его сравнение с результатами численного моделирования резонансной генерации бимлетов. Именно такое сравнение и является целью данной работы.

Известно, что измерения плазмы при медленном движении высокоапогейных спутников в хвосте магнитосферы не дают возможности проследить динамику процессов в различных областях PSBL, т.к. временная шкала формирования пучков составляет не более одного или нескольких десятков минут [18]. Поэтому мы выбрали для анализа измере-

ния субструктур VDIS со спутников ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER на высотах  $(3.0\text{--}6.0)R_E$ , на которых проекция всей области PSBL пересекается спутником в течение не более двух десятков минут. Это позволяет исследовать процессы формирования ионных пучков практически во всем плазменном слое.

**Экспериментальные результаты.** Анализ скейлинга резонансной энергии субструктур VDIS проводился по измерениям ионов спектрометрическими комплексами ИОН на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 вблизи его апогея на геоцентрических расстояниях  $R = (3.0\text{--}4.5)R_E$  и CIS на спутниках CLUSTER на перигейной части их орбит на  $R = (4.0\text{--}6.0)R_E$ . Комплекс ИОН состоял из двух датчиков ионов  $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^{++}$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{O}^+$  (использовался фильтр Вина) в диапазоне  $5\text{--}14000$  эВ/заряд и двух датчиков электронов в диапазоне энергий  $10\text{--}22000$  эВ. Полное описание спектрометров ИОН приведено в [19]. В этой работе анализируются данные по протонам. Полный спектр частиц сканировался за 7.5 с. Комплекс CIS состоял из двух спектрометров: CIS-HIA, который измерял ионы без разделения по массе (использовался сферический электростатический анализатор) в диапазоне

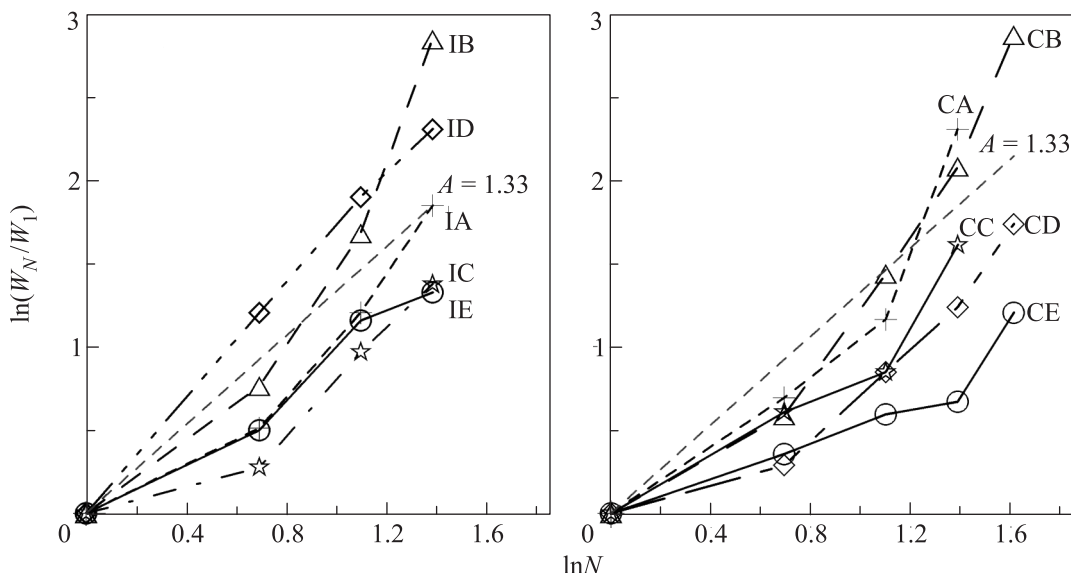


Рис. 2. Зависимости энергий  $W_N$  от номера резонанса  $N$  для различных наблюдений бимлетов на спутниках ИНТЕРБОЛ-2 (события IA, IB, IC, ID, IE) и CLUSTER (события CA, CB, CC, CD, CE). Теоретическая зависимость отмечена штриховой прямой с  $A = 1.33$

5–31000 эВ/заряд, и CIS-CODIF, измерявшего ионы  $H^+$ ,  $He^{++}$ ,  $He^+$ ,  $O^+$  по времени пролета в диапазоне 15–38000 эВ/заряд. Описание комплекса CIS дано в работе [20]. Трехмерная функция распределения ионов измерялась за 4 с.

На верхней панели рис. 1 представлена спектрограмма энергия–время, полученная по измерениям ионов со спутника ИНТЕРБОЛ-2. Структура VDIS наблюдалась начиная с UT=17:33 и вплоть до полярной границы PSBL в UT=17:39. Она состоит из четырех субструктур, показанных затененными вертикальными полосами на нижней панели. Для дальнейшего анализа зависимости  $W_N$  от  $N$  выбиралась энергия обрезания дифференциального потока энергии JW для каждой субструктуры, т.е. наименьшая энергия соответствующего ускоренного пучка. Отметим, что средняя энергия VDIS увеличивается с повышением инвариантной широты ILAT, так же как и энергия субструктур увеличивается с номером резонанса  $N$ . Этот пролет является типичным примером сечения области низковысотного PSBL в периоды регистрации VDIS и их субструктур.

На рис. 2 представлены зависимости  $\ln W_N$  субструктур VDIS от  $\ln N$  для пяти событий ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER (левая и правая панели соответственно). Значения  $W_N$  нормированы на величину  $W_1$ . Кривые скейлинга отношений энергий аппроксимированы линейной зависимостью  $\ln(W_N/W_1) = A \ln N$ . Диапазон наклона  $A$  для всех VDIS изменяется от 0.61 до 1.75 (соответствующие параметры приведены в таблице). Отметим, что для

приведенных событий нам не удалось обнаружить корреляции  $A$  с геомагнитной обстановкой во время измерений (с индексами  $K_p$  и  $AE$ , приведенными для экспериментальных событий в таблице). Результат скейлинга энергий во VDIS свидетельствует о достаточно больших вариациях экспериментального значения  $A$  по данным обоих спутников. Таким образом, наклон  $A$  отличается от аналитически полученного значения 1.33 [7].

**Численное моделирование бимлетов.** Приведенные в работе [8] результаты численного моделирования были получены для расстояния  $10.0R_E$ . Однако данные для бимлетов, использованные в этом исследовании, получены для PSBL ближе к Земле,  $R \sim (3.0–6.0)R_E$ . Поэтому нами было проведено численное моделирование процесса генерации бимлетов для расстояния  $6.0R_E$ .

Система координат была выбрана следующим образом: ось  $x$  проходит в направлении Солнце–Земля, ось  $z$  – с юга на север, а ось  $y$  дополняет систему до правой тройки векторов.

Магнитное поле было задано двумерной аналитической моделью магнитосферы [21]:

$$B_x = A_z F(x) \tanh[zF(x)], \quad F(x) = \frac{1}{L} \left[ \frac{x}{x_L} \right]^{-q}, \quad (1)$$

$$B_z = A_z \frac{dF(x)}{dx} \left\{ \frac{1}{F(x)} - z \tanh[zF(x)] \right\}. \quad (2)$$

Переменные  $q, x_L, L, A_z$  являются свободными параметрами данной модели. Однако для того, чтобы

## Параметры проанализированных событий

Интербол	Событие	Дата	UT	A	$K_p$	AE
ИНТЕРБОЛ-2	IA	02.11.1996	12:00	1.17	0+	25
	IB	03.11.1996	16:55	1.75	0+	22
	IC	03.11.1996	16:03	0.87	0+	32
	ID	02.12.1996	09:32	1.69	1	98
	IE	26.07.1997	17:37	0.96	1-	75
CLUSTER	CA	19.03.2001	11:04	1.37	3+	175
	CB	31.01.2003	08:12	1.53	3	155
	CC	03.04.2004	11:30	0.99	3-	248
	CD	28.01.2007	21:23	0.91	0+	135
	CE	19.01.2007	05:32	0.61	4+	274

полученное магнитное поле находилось в согласии с экспериментальными данными [22], в качестве рабочих значений свободных параметров были выбраны следующие:  $q = 0.4$ ,  $A_z = 55 \text{ нТ} \cdot R_E$ ,  $L = 3R_E$ ,  $x_L = 45R_E$ , где  $R_E = 6371.2 \text{ км}$  – радиус Земли. Для этих параметров нормальная компонента убывает с расстоянием от Земли,  $B_z \sim 1/x$ .

Электрическое поле имело две компоненты:  $E_y$  и  $E_z$ . Во всей области моделирования существовало постоянное электрическое поле  $E_y = -0.1 \text{ мВ/м}$ . Электрическое поле  $E_z$  имело вид

$$E_z = E_z^0 \sinh(z/\Lambda) / \cosh^3(z/\Lambda). \quad (3)$$

В зависимости от знака  $E_z^0$  в токовом слое доминирует ионный ( $E_z^0 > 0$ ) или электронный ( $E_z^0 < 0$ ) ток. В ряде экспериментальных и теоретических работ показано, что типичная величина  $\Lambda$  порядка нескольких сот километров [23–26]. Поэтому мы выбрали  $\Lambda(X) = 0.1R_E$  и  $E_z^0 = \pm 0.26 \text{ мВ/м}$ . В этом случае пик биполярного электрического поля находится на расстоянии 637.1 км от центра токового слоя, а амплитуда электрического поля в этой точке  $E_z = 0.1 \text{ мВ/м}$ .

“Мантия” имитировалась набором частиц в северном полушарии ( $x = 15R_E$ ,  $z = 3R_E$ ) с максвелловской функцией распределения ( $W_{th} = 0.3 \text{ кэВ}$ ,  $V_D = 245 \text{ км/с}$ ). В каждом численном эксперименте было использовано 100 000 частиц. Мы прекращали вычисление траектории частицы, если она пересекала границы области моделирования:  $5.8R_E < x < 100R_E$ ,  $y < -40R_E$  и  $-3.5R_E < z < 3.5R_E$ . Напомним, что структуры в северном полушарии ( $z > 0$ ) соответствуют областям с четными резонансными номерами  $N$ , а в южном – с нечетными номерами (см., например, [8], рис. 5). Это возможно только потому, что в нашей модели источник частиц находится лишь в одном (северном) полушарии. Однако анализ, приведенный выше, касается как четных, так и нечетных номеров резонансов. В модельном расчете

при пересечении частицей границы сферы  $r = 6R_E$  отмечалась информация о ее скорости и местоположении.

На рис. 3 и 4 представлены спектрограммы для значений  $E_z^0 = -0.26$  и  $0.26$  соответственно. Анализ спектрограмм показал, что распределение энер-

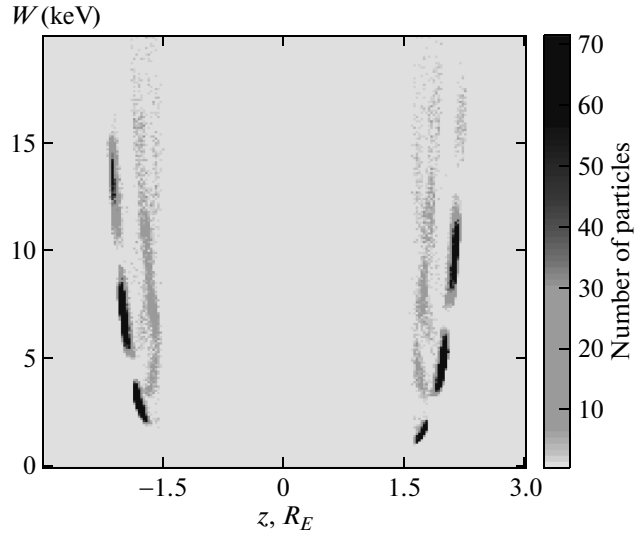


Рис. 3. Распределение ионов после взаимодействия с токовым слоем на расстоянии  $6R_E$  от Земли при  $E_z^0 = -0.26 \text{ мВ/м}$

гий для рис. 3 имеет следующий характер:  $W_1 = 1.4$ ,  $W_2 = 2.7$ ,  $W_3 = 4.0$ ,  $W_4 = 6.0$ ,  $W_5 = 8.0 \text{ кэВ}$ . Линейная интерполяция дает  $\ln(W_N/W_1) \cong 1.1 \ln N$ . Для  $E_z^0 = 0.26$  распределение энергий имеет вид:  $W_3 = 2.8$ ,  $W_4 = 4.2$ ,  $W_5 = 6.1$ ,  $W_6 = 8.2$ ,  $W_7 = 9.9 \text{ кэВ}$ . Первые два значения пропущены, так как в эти резонансные области попало статистически незначительное число частиц. Как следствие невозможно достоверно определить характерную энергию данных бимлетов. Последняя последовательность энергий бимлетов описывается уравнением  $\ln W_N/W_1 \cong 1.52 \ln N$ .

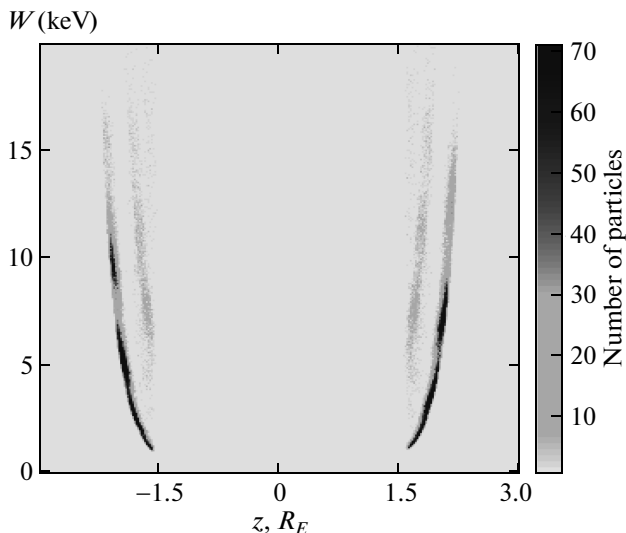


Рис. 4. Распределение ионов после взаимодействия с токовым слоем на расстоянии  $6R_E$  от Земли при  $E_z^0 = 0.26$  мВ/м

**Заключение.** В настоящей работе было проведено сравнение теоретически предсказанного скейлинга энергий ионных пучков (бимлетов) с независимыми экспериментальными данными космических аппаратов ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER и результатами численного моделирования. Анализ приведенных событий показал, что скейлинг энергий бимлетов изменяется в широком диапазоне,  $A \in [0.61; 1.75]$ , и не зависит от геомагнитных индексов  $AE$  и  $K_p$ . Данный факт говорит о том, что основные характеристики бимлетов, а именно энергия и дисперсия, могут быть не связаны с глобальными магнитосферными процессами. Вариации этих параметров могут определяться свойствами токовых слоев и, как следствие, электрического поля, направленного перпендикулярно плоскости токового слоя. Результаты моделирования ясно показывают, что увеличение скейлинга  $A > 1.33$  связано с доминированием ионного тока над электронным внутри токового слоя (и наоборот). Наблюдения ионных пучков при движении спутников ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER в низковысотном PSBL на  $3-6R_E$  осуществляются довольно быстро (порядка десятка минут). В результате спутник как бы сканирует проекцию всего дальнего геомагнитного хвоста Земли при однократном пересечении PSBL. Более детальный анализ свойств бимлетов может стать основой для дистанционного зондирования дальних областей ночной магнитосферы. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ # 10-02-93114 и 10-02-00135, а также программы поддержки научных школ # НШ-3200.2010.2.

1. T. 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 et al., *J. Geophys. Res.* **84**, 6471 (1979).
3. K. Takahashi and E. W. Hones, *J. Geophys. Res.* **93**, 8558 (1988).
4. E. E. Grigorenko, J.-A. Sauvaud, and L. M. Zelenyi, *J. Geophys. Res.* **112**, A05218 (2007); doi: 10.1029/2006JA011986.
5. Л. М. Зеленый, Е. Е. Григоренко, А. О. Федоров, Письма в ЖЭТФ **80**(10) (2004).
6. J. Büchner and L. M. Zelenyi, *J. Geophys. Res.* **94**, 11821 (1989).
7. Л. М. Зеленый, М. С. Долгоносов, Е. Е. Григоренко, Ж.-А. Сово, Письма в ЖЭТФ **85**, 225 (2007).
8. M. S. Dolgonosov, G. Zimbardo, and A. Greco, *J. Geophys. Res.* **115**, A02209 (2010); doi:10.1029/2009JA014398.
9. J. M. Bosqued, M. Ashour-Abdalla, M. El-Alaoui et al., *J. Geophys. Res.* **98**, 19181 (1993).
10. L. M. Zelenyi, R. A. Kovrazhkin, and J. M. Bosqued, *J. Geophys. Res.* **95**(A8), 12119 (1990).
11. Р. А. Ковражкин, Ж. М. Боске, Л. М. Зеленый, Н. В. Джорджио, Письма в ЖЭТФ **45**, 377 (1987).
12. R. D. Elphinstone, D. J. Hearn, L. L. Cogger et al., *J. Geophys. Res.* **100**, 12093 (1995).
13. T. G. Onsager and T. Mukai, *Geophys. Res. Lett.* **22**, 855 (1995).
14. Y. Saito, T. Mukai, M. Hirahara et al., *Geophys. Res. Lett.* **19**, 215 (1992).
15. P. Janhunen, A. Olson, W. K. Peterson et al., *Ann. Geophysicae* **23**, 867 (2005).
16. R. A. Kovrazhkin and J.-A. Sauvaud, in *Auroral Phenomena and Solar-terrestrial Relations*, CAUSES Handbook-1, 2004, p. 165.
17. O. W. Lennartsson, K. J. Trattner, H. L. Collin, and W. K. Peterson, *J. Geophys. Res.* **112**, 5859 (2001).
18. J.-A. Sauvaud and R. A. Kovrazhkin, *J. Geophys. Res.* **109**, A12213 (2004); doi:10.1029/2003JA010333.
19. J.-A. Sauvaud, H. Barthe, C. Aoustin et al., *Ann. Geophys.* **16**, 1056 (1998).
20. H. Réme, J.-M. Bosqued, J.-A. Sauvaud et al., *Space Science Reviews* **79**, 303 (1997).
21. W. Zwingmann, *J. Geophys. Res.* **88**, 9101 (1983).
22. J. A. Slavin, *J. Geophys. Res.* **90**, 10875 (1985).
23. A. Greco, R. De Bartolo, G. Zimbardo, and P. Veltri, *J. Geophys. Res.* **112**, A06218 (2007); doi:10.1029/2007JA012394.
24. M. I. Sitnov, P. N. Guzdar, and M. Swisdak, *Geophys. Res. Lett.* **30**(13), 1712 (2003); doi:10.1029/2003GL017218.
25. J. R. Wygant, C. A. Cattell, R. Lysak et al., *J. Geophys. Res.* **110**, A09206 (2005); doi:10.1029/2004JA010708.
26. L. M. Zelenyi, H. V. Malova, V. Yu. Popov et al., *Nonlin. Processes Geophys.* **11**, 579 (2004).