Письма в ЖЭТФ, том 111, вып. 4, с. 223 – 227 © 2020 г. 25 февраля

Аномальный скейлинг энергии ионных пучков в токовом слое

Р. А. Ковражкин[1)], *А. Л. Глазунов, Г. А. Владимирова*

Институт космических исследований РАН, 11799 Москва, Россия

Поступила в редакцию 17 октября 2019 г.
После переработки 23 января 2020 г.
Принята к публикации 23 января 2020 г.

Работа посвящена анализу скейлинга – масштабирования энергии ионных пучков – бимлетов $W_{\rm N} \sim \sim {\rm N}^{\rm A}$ в резонансных зонах N токового слоя по данным SC-1 и SC-4 спутников CLUSTER. Был исследован случай 05.02.2003 г. по энергодисперсионным мелкомасштабным субструктурам – сигнатурам бимлетов 1–20 кэВ в авроральной магнитосфере на геоцентрических расстояниях (4.5–5.3)R_E, где R_E – радиус Земли. Этот случай является аномальным, так как энергии бимлетов в резонансных зонах (выделено семь зон N = 1–7 с резонансами R = 1−7; зона с R = 7 находится в наиболее высокоширотной авроральной области) не подчиняются одному закону скейлинга. Для зон с резонансами R = 1−4 показатели A составляют 0.04 и 0.40, а для зон с R = 5−7 они составляют 0.83 и 1.14 по данным спутников SC-1 и SC-4 соответственно. Полученные по спутникам CLUSTER показатели отличаются от значения A = 1.33, предсказанного теорией (Письма в ЖЭТФ **85**, 225 (2007)). Для зон с R = 5−7 скейлинги энергии бимлетов могут быть объяснены при учете электрического поля E_z, перпендикулярного плоскости токового слоя. Наблюдаемые показатели A в зонах N = 1–4 могут быть связаны с тем, что нормальная составляющая магнитного поля B_z, контролирующая приращение энергии ионных пучков в токовом слое, в области этих резонансных зон имеет меньшее пространственное спадание, чем в области, содержащей зоны N = 5–7.

DOI: 10.31857/S0370274X20040037

Введение. При поступлении плазмы солнечного ветра в хвост магнитосферы осуществляется нагрев и ускорение частиц в пограничном плазменном слое (PSBL – Plasma Sheet Boundary Layer) на геоцентрических расстояниях порядка (30−100)R_E, где R_E – радиус Земли. В токовом слое вдоль хвоста формируются выделенные резонансные зоны, содержащие мелкомасштабные ионные пучки, так называемые “бимлеты” [1]. Образование резонансных зон связано со свойствами детерминированного хаоса в системе, возникающего в плазменном слое [2]. Динамика частиц в нем определяется интегралом действия, который является приближенным инвариантом движения частиц. Хаос вызывается скачками этого инварианта, что приводит к захвату частиц в токовый слой. При определенных параметрах (основным из них является компонента магнитного поля B_z, перпендикулярная плоскости токового слоя) в слое образуются зоны, в которых скачки инварианта движения скомпенсированы при входе частиц в слой и выходе их из него. Так формируются N “регулярных” резонансных зон, где образуются бимлеты со своим энергетическим спектром. Энергия $W_{\rm N}$ в каждой зоне (обычно рассматривается минимальная энергия) возрастает с увеличением номера N по мере удаления зоны от Земли по координате $-X$ вдоль хвоста магнитосферы.

Бимлеты ускоряются в токовом слое электрическим полем E_y (координата Y направлена по линии утро–вечер поперек хвоста) до $\sim$500–2000 км/с, совершая половину оборота вокруг B_z (нормальная компонента магнитного поля) в XY-плоскости. Затем эти ионы, находящиеся на так называемых “спайсеровских” орбитах [3], после нескольких осцилляций покидают токовый слой и распространяются по силовым линиям в авроральную зону. В области проекции пограничного плазменного слоя в авроральной зоне по данным спутника ОРЕОЛ-3 [4, 5] на высотах 600–2000 км была обнаружена дисперсионная структура с энергией в диапазоне 1–20 кэВ. Было показано, что эта структура сформирована в авроральной области ионными пучками, пришедшими из PSBL; она была названа VDIS – Velocity Dispersed Ion Structure. Затем VDIS были найдены по измерениям на других космических аппаратах как на низких высотах, так и на геоцентрических расстояниях (3−7)R_E [6–11]. Основным свойством структуры VDIS является дисперсия по энергии, т.е. уменьшение энергии с понижением широты вследствие дрейфового движения плазмы при конвекции в направле-

[1)]e-mail: rkovrazh@iki.rssi.ru

нии $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ при распространении пучка ионов из экваториальной области плазменного слоя до ионосферных высот. Было найдено, что VDIS состоят из мелкомасштабных субструктур – сигнатур ускоренных бимлетов из пограничного плазменного слоя [11]. Эти сигнатуры расположены вблизи полярной области авроральной зоны и наблюдаются в магнитноспокойные периоды времени и на фазе восстановления суббурь [9]. Их энергия соответствует энергии бимлетов и точно также зависит от номера резонансной зоны N; зона с максимальным N располагается в наиболее высокоширотной авроральной области.

В результате исследования механизма ускорения ионов в токовом слое [12] был установлен закон скейлинга – масштабирования энергии бимлетов W_{N} от номера N соответствующей резонансной зоны: $W_{\mathrm{N}} \sim \sim \mathrm{N}^{\mathrm{A}}$, где $\mathrm{A}=1.33$. Это соотношение отражает достаточно идеализированную модель токового слоя из-за нескольких ограничений: геометрии модели, ее линейности, пренебрежения волновыми явлениями. Экспериментальная проверка закона скейлинга энергий ионных субструктур VDIS по данным космических аппаратов ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER показала, что значения показателя A испытывают значительные вариации и находятся в диапазоне от 0.61 до 1.75 [13]. Результаты численного моделирования резонансной генерации бимлетов, проведенные в работе [13], привели к заключению, что учет электрического поля E_z, перпендикулярного плоскости токового слоя, позволяет объяснить полученные экспериментальные значения A. Добавление электрического поля E_z приводит к модификации траекторий ионов и смещению резонансных зон в токовом слое по координате $-X$ таким образом, что при сдвиге зон к Земле (от Земли) показатель A становится больше (меньше) значения $\mathrm{A}=1.33$, предсказанного теорией. Подробное рассмотрение этих эффектов дано в [14]. Электрическое поле E_z действительно наблюдалось в окрестности X-линии в хвосте по данным спутников CLUSTER [15, 16]. Эти исследования показали, что электрические поля вблизи диффузной границы области пересоединения направлены к центру токового слоя [15]. Измерения потоков плазмы свидетельствуют о наличии ускоренных пучков ионов со скоростями до 1000 км/с во время наблюдений E_z [16].

При экспериментальном исследовании большого массива данных спутников CLUSTER (2000–2008 гг.), содержащих распределения энергии бимлетов, мы выявили случай, в котором энергии бимлетов в резонансных зонах (всего выделено семь зон с резонансами $\mathrm{R}=1-7$) имеют два разных скейлинга в определенных зонах. Этот аномальный случай наблюдался 05.02.2003 г. по данным двух аппаратов SC-1 и SC-4 CLUSTER, пересекавших область проекции пограничного плазменного слоя в авроральной магнитосфере на геоцентрических расстояниях $(4.5-5.3)R_E$. Изучение этого особого случая является целью данной работы. Его рассмотрение может представлять определенный интерес для понимания динамики различных плазменных образований в токовом слое и режимов состояния основных его областей.

Экспериментальные результаты. Анализ скейлинга резонансных энергий субструктур VDIS проводился по измерениям ионов спектрометрическим комплексом CIS на спутниках CLUSTER. Комплекс CIS состоял из двух спектрометров: CIS-HIA, который измерял ионы без разделения по массе (использовался электростатический анализатор) в диапазоне 5–31000 эВ/заряд, и CIS-CODIF, измерявший ионы H^+, He^{++}, He^+, O^+ по времени пролета в диапазоне 15–38000 эВ/заряд.

На рисунке 1 представлены спектрограммы энергия–время ионов со спутников SC-1 и SC-4. Рассматриваемый случай происходил 05.02.2003 г. на фазе восстановления суббури; AE- и AL-индексы в периоды регистрации дисперсионных структур находились в пределах 150–210 нТл и $-(20-90)$ нТл соответственно. Структура VDIS наблюдалась по SC-1 в 02:19–02:32 UT, а затем по SC-4 в 02:30–02:45 UT, т.е. с задержкой по времени ~ 13 мин. VDIS на каждом из пролетов авроральной зоны включала семь субструктур, показанных номером на каждой спектрограмме. Для бимлетов наблюдается присутствие двух зон с разными наклонами по энергии: зоны с резонансами $\mathrm{R}=1-4$ имеют меньший наклон, чем зоны с резонансами $\mathrm{R}=5-7$. Первые показывают, что энергия W_{N} в них остается почти постоянной, особенно по данным SC-1, последние, что W_{N} увеличивается с номером резонанса.

Дальнейший детальный анализ скейлинга энергии бимлетов проводился для энергий "обрезания" дифференциального потока энергии ионов JW. На рисунке 2 представлены графики зависимости $\ln W_{\mathrm{N}}$ ионов для субструктур VDIS от $\ln \mathrm{N}$ по данным SC-1 и SC-4 для двух зон с резонансами $\mathrm{R}=1-4$ и с $\mathrm{R}=5-7$. Значения $\ln W_{\mathrm{N}}$ были нормированы на $\ln W_{\mathrm{N}=1}$ для рис. 2a и $\ln W_{\mathrm{N}=5}$ для рис. 2b. Графики демонстрируют, что все показатели скейлингов ниже значения $\mathrm{A}=1.33$, предсказанного теорией в [12]. Наиболее низкие значения A наблюдаются для области с резонансами $\mathrm{R}=1-4$. При пролете спутником SC-1 показатель A составляет всего 0.04, т.е.

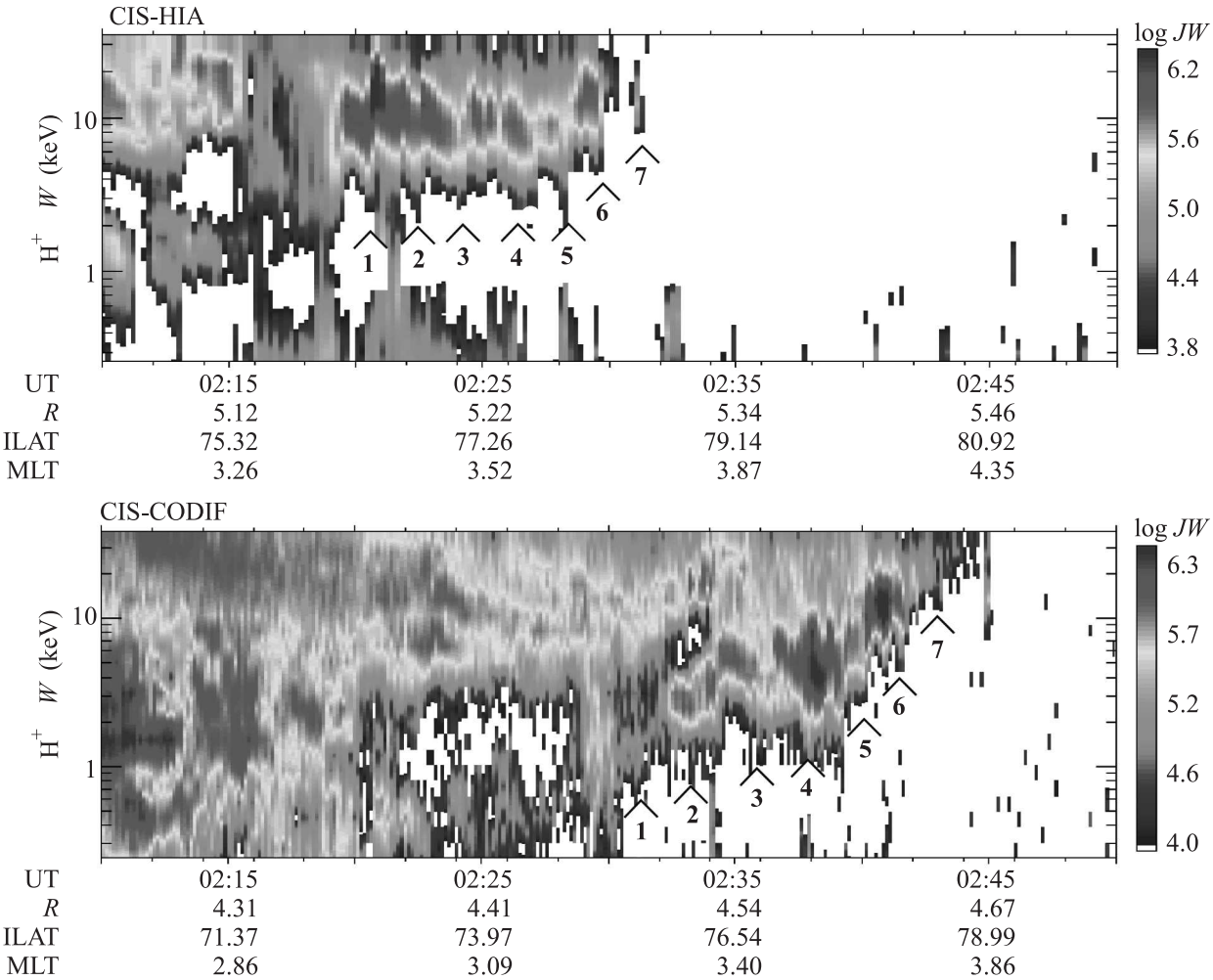

Рис. 1. (Цветной онлайн) Спектрограммы энергия–время ионов по SC-1 (прибор CIS-HIA) и SC-4 (прибор CIS-CODIF) спутников CLUSTER 05.02.2003 г. (W – энергия ионов в кэВ; R – геоцентрическое расстояние в радиусах Земли; ILAT – инвариантная широта; MLT – магнитное местное время; $\log JW$ – код, соответствующий логарифму дифференциального потока энергии в кэВ/см$^2 \cdot$ с $\cdot$ ср $\cdot$ кэВ; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – резонансные зоны ускоренных ионных пучков – бимлетов)

энергия ионов очень слабо зависит от инвариантной широты ILAT и, соответственно, от расстояния по X-координате вдоль токового слоя. При пролете спутником SC-4 с задержкой 13 мин значение A подросло до 0.40, однако оно почти в три раза меньше A, наблюдаемого в зоне резонансов R = 5–7. Можно отметить, что для типичных случаев VDIS по ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER иногда наблюдались достаточно низкие величины скейлингов энергии бимлетов [13], но значения показателей A были всегда больше представленных для зон с R = 1–4 на рис. 2.

Обсуждение результатов и выводы. Рассмотрим в этом разделе возможные механизмы формирования различных скейлингов – масштабирования энергии бимлетов токового слоя $W_{\mathrm{N}} \sim \mathrm{N}^{\mathrm{A}}$ на основе экспериментального исследования сигнатур ионных пучков в авроральной магнитосфере: 1) в области резонансных зон N = 5–7 (с R = 5–7) и 2) в области резонансных зон N = 1–4 (с R = 1–4).

1) Для области N = 5–7 значения показателей A могут быть объяснены в соответствии с результатами модельных расчетов работы [13], в которой учтено электрическое поле E_z, перпендикулярное плоскости токового слоя. Использованная в [13] добавка $E_z = -0.26$ мВ/м приводит к сдвигу резонансных зон от Земли и изменяет скейлинг энергий бимлетов таким образом, что показатели A становятся меньше 1.33. Отметим, что в этой работе было проведено сравнение экспериментальных скейлингов с расчетными для тех же самых высот, что и для рассматриваемого нами случая.

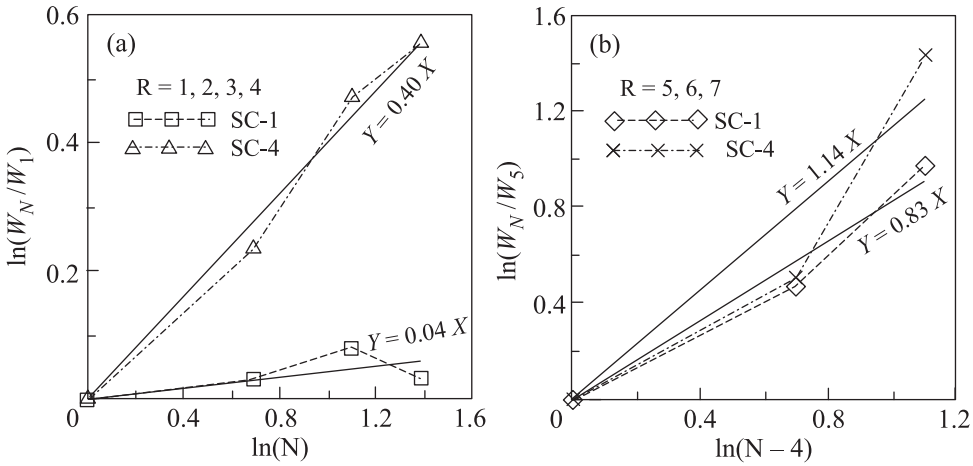

Рис. 2. Энергия ионных бимлетов в зависимости от номера резонанса N (в log-log шкалах) по данным SC-1 и SC-4 спутников CLUSTER 05.02.2003 г.; рис. 2a приведен для резонансных зон с R = 1, 2, 3, 4, рис. 2b – для зон с R = 5, 6, 7

2) Эффект от добавления поля E_z не смог бы обеспечить получение очень малых показателей скейлингов для области N = 1–4. Рассмотрим механизм ускорения и формирования бимлетов в токовом слое, который основан на присутствии небольшой составляющей магнитного поля B_z, перпендикулярной плоскости слоя. Ионы с массой m_i и первоначальной скоростью V_i после взаимодействия с токовым слоем испытывают приращение энергии порядка $2m_i \cdot E_y/B_z \cdot (E_y/B_z - V_i)$, где E_y – электрическое поле утро–вечер поперек хвоста магнитосферы [17]. Таким образом, фактор роста энергии ионов в резонансных зонах пропорционален $\sim 1/B_z^2$, поэтому необходимо исследовать поведение B_z вдоль токового слоя. Наши экспериментальные данные по сигнатурам бимлетов в авроральной области показывают, что резонансные зоны располагаются на высоких широтах. Так зона N = 7 доходит почти до полярной шапки, достигая ILAT $\cong$ 79. Резонансные зоны сигнатур из авроральной области не представляется возможным спроецировать в хвост магнитосферы ни по одной из имеющихся моделей, включая "длинную" модель T78 Цыганенко [18], работающую до $70R_E$. Таким образом, при рассмотрении поведения B_z-компоненты вдоль хвоста магнитосферы надо учитывать, что области, содержащие бимлеты, находятся на значительных расстояниях от Земли (за орбитой Луны). Наиболее полные прямые измерения магнитного поля в дальнем хвосте были выполнены на космических аппаратах ISSE-3 и GEOTAIL [19, 20], причем по ISSE-3 получены данные в протяженной области плазменного слоя от $35R_E$ до $225R_E$. Измерения показали, что в хвосте магнитосферы от 65 до $95R_E$ величина B_z изменяется от 1.45 до 1.10 нТл. В области же от 95 до $125R_E$ она изменяется от 1.10 до 0.20 нТл [19]. Таким образом, в первой из приведенных областей явно заметно более слабое спадание величины B_z-компоненты магнитного поля от расстояния вдоль оси $-X$, чем во второй. Необходимо отметить, что по данным ISSE-3 наблюдалась только одна эта область слабого спадания величины B_z на протяжении всего измеренного плазменного слоя. Учитывая результаты работы [19], мы приходим к выводу, что маленькие показатели A могут быть связаны с некоторым "выравниванием" кривой спадания B_z-компоненты магнитного поля в области хвоста магнитосферы, содержащей резонансные зоны бимлетов с номерами N = 1–4.

Исследования возможных случаев разного масштабирования энергии бимлетов в структуре токового слоя представляют интерес для отождествления механизмов его формирования и свойств его пространственной неоднородности. Поэтому работы по поискам таких случаев по данным спутников в авроральной магнитосфере целесообразно продолжить. Эти данные позволяют за один пролет спутников производить дистанционную локацию всего токового слоя и наблюдать динамику формирования плазменных популяций со временем жизни в несколько десятков минут, что невозможно осуществить на высокоапогейных космических аппаратах из-за их малой скорости вблизи экваториальной плоскости плазменного слоя.

В заключение авторы выражают благодарность проф. А. Рему – научному руководителю эксперимента CIS на спутниках CLUSTER.

Данные AL- и AE-индексов получены в Мировом Центре Данных — на WDC (World Data Center for Geomagnetism), Kyoto (Киото).

1. Л. М. Зеленый, Е. Е. Григоренко, А. О. Федоров, Письма в ЖЭТФ **80**(10), 771 (2004).
2. J. Buchner and L. M. Zelenyi, J. Geophys. Res. **94**, 11821 (1989).
3. T. W. Speiser, J. Geophys. Res. **70**, 4219 (1965).
4. Р. А. Ковражкин, Ж. М. Боске, Л. М. Зеленый, Н. В. Джорджио, Письма в ЖЭТФ **45**(8), 377 (1987).
5. L. M. Zelenyi, R. A. Kovrazhkin, and J. M. Bosqued, J. Geophys. Res. **95**(A8), 12119 (1990).
6. Y. Saito, T. Mukai, M. Hirahara, S. Machida, and N. Kaya, Geophys. Res. Lett. **19**, 2155 (1992).
7. T. G. Onsager and T. Mukai, Geophys. Res. Lett. **22**, 855 (1995).
8. R. D. Elphinstone, D. J. Hearn, L. L. Cogger, J. S. Murphree, A. Wright, I. Sandahl, S. Ohtani, P. T. Newell, D. M. Klumpar, and M. Shapshak, J. Geophys. Res. **100**, 12093 (1995).
9. R. A. Kovrazhkin and J.-A. Sauvaud, *Proc. Int. Conf. on "Auroral phenomena and solar-terrestrial relations" in memory of Prof. Galperin, February 4–7, 2003*, CAWSES Handbook-1, ed. by L. M. Zelenyi, M. A. Geller, and J. H. Allen, Boulder (2003).
10. P. Janhunen, A. Olson, W. K. Peterson, and J. D. Menietti, Ann. Geophys. **23**, 867 (2005).
11. J.-A. Sauvaud and R. A. Kovrazhkin, J. Geophys. Res. **109**, A12213 (2004); 10.1029/2003JA010333.
12. Л. М. Зеленый, М. С. Долгоносов, Е. Е. Григоренко, Ж.-А. Сово, Письма в ЖЭТФ **85**(4), 225 (2007).
13. Р. А. Ковражкин, М. С. Долгоносов, Ж.-А. Сово, Письма в ЖЭТФ **95**(5), 258 (2012).
14. M. S. Dolgonosov, G. Zimbardo, and A. Greco, J. Geophys. Res. **115**, A02209 (2010); doi:10.1029/2009JA014398.
15. A. L. Borg, M. Oieroset, T. D. Phan, F. S. Mozer, A. Pedersen, C. Mouikis, J. P. McFadden, C. Twitty, A. Balogh, and H. Reme, Geophys. Res. Lett. **32**, L19105 (2005); doi:10.1029/2005GL023794.
16. J. R. Wygant, C. A. Cattell, R. Lysak, Y. Song, J. Dombeck, J. McFadden, F. S. Mozer, C. W. Carlson, G. Parks, E. A. Lucek, A. Balogh, M. Andre, H. Reme, M. Hesse, and C. Mouikis, J. Geophys. Res. **110**, A09206 (2005); doi:10.1029/2004JA010708.
17. L. R. Lyons and T. W. Speiser, J. Geophys. Res. **87**, 2276 (1982).
18. N. A. Tsyganenko, Planet. Space Sci. **35**, 1347 (1987).
19. J. A. Slavin, E. J. Smith, D. G. Sibeck, D. N. Baker, R. D. Zwickl, and S.-I. Akasofu, J. Geophys. Res. **90**, 10875 (1985).
20. K. Maezawa, T. Hori, T. Mukai, Y. Saito, T. Yamamoto, S. Kokubun, and A. Nishida, Adv. Space Res. **20**, 949 (1997).