

УДК 52-854, 523.726

Л. В. Козак<sup>1</sup>, А. Т. Луи<sup>2</sup><sup>1</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
03022 Киев, пр. Глушкова 6<sup>2</sup>Университет Джона Хопкинса, Лаборатория прикладной физики  
Лаурел, Мэриленд, США**Статистический анализ турбулентности плазмы  
по спутниковым измерениям магнитного поля**

*Исследуются особенности функции плотности вероятности флуктуаций магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли на различных временных масштабах по данным спутника «Geotail» за 1997, 1999 и 2000 гг. Изучались изменения формы и параметров функции плотности вероятности для периодов до и во время разрыва токового слоя. В качестве характеристики эволюции на разных временных шкалах исследовались изменения высоты максимума функции плотности вероятности  $P(0)$ . Было найдено два асимптотических режима  $P(0)$ , которые характеризуются разными степенными законами: на больших временных масштабах изменение максимума функции плотности вероятности соответствует гауссовому процессу, при малых масштабах наблюдаемые особенности описываются распределением Леви. Пересечение двух асимптот соответствует значению временной шкалы около 1 с. Предложенный подход является универсальным и может использоваться для анализа флуктуаций других параметров и другой природы.*

**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ПЛАЗМИ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ВИМІРЮВАННЯМИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ, Козак Л. В., Луї А. Т.** — Досліджуються особливості функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля у хвості магнітосфери Землі на різних часових масштабах за вимірами супутника «Geotail» за 1997, 1999 і 2000 рр. Вивчалися зміни форми і параметрів функції густини ймовірності для періодів до і під час розриву струмового шару. Як характеристика еволюції на різних часових шкалах досліджувалася зміна висоти максимуму функції густини ймовірності  $P(0)$ . Було знайдено два асимптотичних режими  $P(0)$ , які характеризуються різними степеневими законами: на великих часових масштабах зміна максимуму функції густини ймовірності відповідає гауссовому процесу, при малих масштабах спостережувані особливості описуються розподілом Леві. Перетин двох асимптот відповідає значенню часової шкали приблизно 1 с. Запропонований підхід є універ-

сальним і може бути використаний для аналізу флуктуацій інших параметрів іншої природи.

*STATISTICAL ANALYSIS OF PLASMA TURBULENCE ON THE BASIS OF SATELLITE MEASUREMENTS OF MAGNETIC FIELD, by Kozak L. V., Lui A. T. — We carried out the investigation of probability density function features for magnetic field fluctuations in the Earth's magnetosphere tail on different time scales on the basis of the satellite Geotail data for 1997, 1999 and 2000. The changes of shape and parameters of probability density function for the periods before and during the current disruption were studied. As an evolution characteristic for different time scales the changes of maximum probability density function values  $P(0)$  were investigated. Two asymptotic modes for  $P(0)$  corresponding to two different power laws were found: the changes of probability density function maximums correspond to the Gauss process on large time scales and to the Levy distribution on small time scales. The intersection of the two asymptotes corresponds to a time scale value of 1 sec. The proposed approach is universal and can be used for the analysis of fluctuations of other parameters being of other nature.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Глобальные процессы взаимодействия солнечного ветра с геомагнитосферой успешно описываются в рамках магнитогидродинамических (МГД) моделей. Но описание мелкомасштабных плазменных неустойчивостей, триггеррирующих суббурь и взаимодействие многомасштабных процессов в различных пространственных доменах магнитосферы, имеющих существенно различные физические характеристики, вызывает много вопросов. Для описания этих процессов нужно использовать теорию нелинейного магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Работа посвящена исследованию флуктуаций магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли в периоды разрушения токового слоя и оцениванию временных масштабов, при которых система уже не может описываться уравнениями МГД, и необходимо использовать уравнения нелинейной МГД.

#### МОДЕЛИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СУББУРИ

Магнитосфера Земли — сложная динамическая нелинейная система, одним из главных проявлений которой являются суббури. Магнитная буря обычно наблюдается одновременно по всей Земле, но ее проявления в разных местах земной поверхности могут быть неодинаковыми. На низких и средних широтах во время магнитной бури наблюдается внезапное уменьшение горизонтальной составляющей геомагнитного поля (главная фаза бури). Иногда перед началом бури наблюдается кратковременное увеличение горизонтальной составляющей (резкое начало бури). Если же выделить такое начало нельзя, то бурю относят к бурям с постепенным началом. На высоких широтах, особенно вблизи зоны полярных сияний, уменьшение значения горизонтальной составляющей почти не наблюдается. В этих широтах возникают сильные и очень быстрые колебания геомагнитного поля. Эти изменения имеют характер неправильных колебаний (флуктуаций), которые накладываются на относительно медленные изменения геомагнитного поля (бухты). Колебания в пределах «бухты» могут быть как

положительными, так и отрицательными.

Возмущения геомагнитного поля вызываются электрическими токами, часть из которых находится на высоте 100 км в ионосфере, а часть течет из магнитосферы в ионосферу и обратно (вертикальные токи). Эти токи создают замкнутую систему. Кроме того, в некоторых местах происходит сгущение тока (электроструя, электроджет), а в других — растекание по поверхности ионизированного слоя атмосферы, где их сила уменьшается. Эта сложная система электротоков встроена относительно направления на Солнце.

Схематически изменения конфигурации магнитного поля хвоста магнитосферы в ходе типичной суббури представляют следующим образом:

а) суббурия начинается, когда Земля встречается с неоднородностью солнечного ветра;

б) в ходе начальной фазы суббурии происходит вытяжение хвоста и накопление магнитной энергии;

в) открытый магнитный поток переносится с дневной стороны в доли хвоста, что увеличивает давление и ведет к утончению нейтрального слоя и уменьшению тока в нем;

г) процесс постепенно развивается и заканчивается разрывом токового слоя хвоста, что эквивалентно пересоединению антипаралельных магнитных полей двух долей хвоста.

В результате большая часть хвоста образует гигантский плазмод, который отрывается от магнитосферы и уносится в антисолнечном направлении; длина хвоста при этом уменьшается, но восстанавливается на последующей релаксационной фазе суббурии.

Ключевым элементом суббурии является понятие **токового клина**. Эта токовая система часто объясняется частичным разрушением системы токов в хвосте магнитосферы. Токи хвоста объединяются с токами, направленными вдоль поля. Эти токи направлены вниз к ионосфере на утренней стороне, и вверх к магнитосфере на вечерней стороне.

Описанный выше процесс пересоединения в нейтральном слое хвоста составляет основное содержание суббурии в рамках классической модели NENL (near-Earth neutral line) [10] и ее современной версии [1]. Однако ряд наблюдательных фактов нельзя объяснить современной версией классической модели [1], поскольку не наблюдаются проявления пересоединения открытого магнитного потока и образования крупномасштабной NENL, по крайней мере не наблюдаются как признаки основного процесса. Есть ряд экспериментальных данных, из которых следует, что источники суббурь локализованы в ближнем хвосте, где пересоединение магнитного потока никогда не наблюдалось.

В альтернативных моделях основной взрывной механизм суббурии вызывается нелинейной магнитосферно-ионосферной связью, энергия которой берется из магнитного поля в замкнутом хвосте. Согласно такому подходу пересоединение открытого магнитного потока не играет основной роли, оно может произойти как следствие первого, или не произойти вовсе. Термин «пересоединение» при этом заменяется терминами «current disruption» (CD), или «разрыв токового слоя» [4, 8].

Основным отличием данных моделей есть то, что в моделях CD основные процессы суббурии — это мелкомасштабные разрывы в ближнем и замкнутом хвосте, тогда как в вариантах модели NENL суббурю создают крупномасштабные процессы в среднем хвосте, которые включают пересоединение открытых областей.

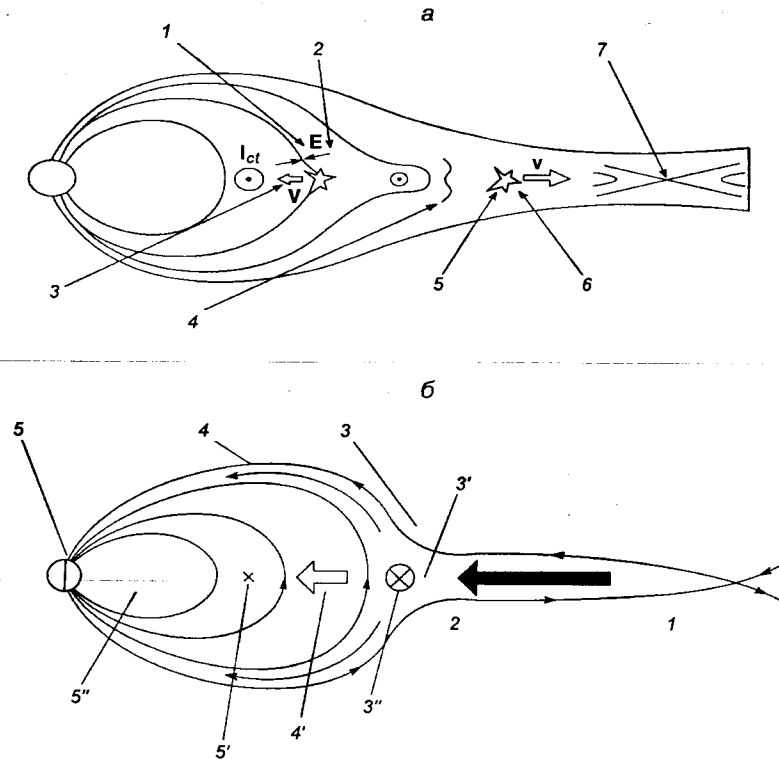


Рис. 1. Схематическое представление последовательности процессов при возникновении суббури: а — в рамках модели CD (1 — разрыв токового слоя, 2 — авроральная арка в направлении к экватору, что ассоциируется с наиболее широким поперечно хвостовым током, 3 — CD в случае суббури при инжекции высоко энергетических частиц, 4 — CD при вытяжении (утончении) плазмового слоя, 5 — многократный CD при утончении токового слоя, 6 — турбулентность в случае CD, 7 — возникновение нейтральной линии X-типа и последующая релаксация слоя); б — в рамках модели NENL (1 — X-тип пересоединения на расстоянии 20—30 радиусов Земли  $R_3$ , 2 — высокоскоростной поток ионов в нейтральном слое на расстоянии 10—20  $R_3$ , 3 — изменение потока на границе между дипольным и хвостоподобным полем (10—20  $R_3$ ), 4 — токовый клин вдоль магнитного поля, 5 — полярное сияние, 3' — инерционный ток вниз, 4' — уплотнение, 5' — инжекция частиц на расстоянии  $6.6R_3$ , 5'' — Pi2-пульсации)

Кроме того, суббурю можно рассматривать как стохастический процесс в системе с мелкомасштабной ячеистой структурой и случайным распределением избранного параметра ячеек (таким параметром может быть напряженность магнитного поля). Под воздействием внешней причины возмущение в подобной системе начинается в малом числе ячеек, где параметр к началу процесса имел критическое значение. Результатом является сброс и временная релаксация каждой возмущенной ячейки, но за счет этого не одна, а ряд соседних ячеек достигает критического уровня избранного параметра и переходит в режим возмущения.

Таким образом, при сохраняющемся внешнем воздействии возмущение охватывает все большее число ячеек, распространяясь подобно лавине. Такой процесс получил название самоорганизованной критичности. На

сегодняшний день известны многочисленные наблюдения, предполагающие ячеистую мелкомасштабную структуру магнитного поля хвоста и токовой системы нейтрального слоя [2, 6, 7, 9].

Схематическое представление возникновения суббури в рамках двух рассмотренных моделей представлено на рис. 1, где цифрами отмечена последовательность происходящих процессов.

#### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА «ГЕОТАЙЛ»

Для описания процессов, в которых мы имеем дело с турбулентностью (аномальная диффузия, хаотический перенос в ламинарных потоках жидкостей и др.), используется распределение Леви.

Характеристическая функция данного распределения имеет вид

$$L_{\alpha}(k, \gamma) = -\gamma |k|^{\alpha} (1 + i\beta \omega(\alpha, k)),$$

где  $0 < \alpha \leq 2$  — характеристический индекс, который определяет форму кривой,  $-1 \leq \beta \leq 1$  — параметр, определяющий симметрию кривой,  $\gamma > 0$  — параметр масштаба,

$$\omega(\alpha, k) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(k) \operatorname{tg}(a\pi/2) & \text{для } \alpha \neq 1, \\ (2/\pi) \ln |k| & \text{для } \alpha = 1. \end{cases}$$

В случае симметричного распределения Леви ( $\beta = 0$ ) обратным фурье-преобразованием характеристической функции получаем функцию распределения:

$$L_{\alpha}(x, \gamma) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-\gamma k^{\alpha}) \cos(kx) dk.$$

Важным является тот факт, что при  $\alpha = 1$  из симметричного распределения Леви получаем распределение Коши, а при  $\alpha = 2$  — распределение Гаусса.

Плотность вероятности нормально распределенной случайной величины для распределения Гаусса имеет вид

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $x_0$  — параметр смещения,  $\sigma^2$  — дисперсия, а для распределения Коши

$$p(x) = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right) + \frac{1}{2},$$

где  $x_0$  — параметр смещения,  $\gamma$  — параметр масштаба.

Для исследования особенностей функции плотности вероятностей флуктуаций магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли, использовались данные, полученные с помощью спутника «Geotail» в 1997, 1999 та 2000 гг.

Спутник «Geotail» был запущен 24 июля 1992 г. Главной целью эксперимента было исследование структуры и динамики хвоста магнитосферы с помощью различного набора научных приборов. Для этого орбита спутника была выбрана таким образом, чтобы охватить магнитосферу в широком диапазоне расстояний от  $8R_3$  до  $210R_3$ . Такая орбита также давала

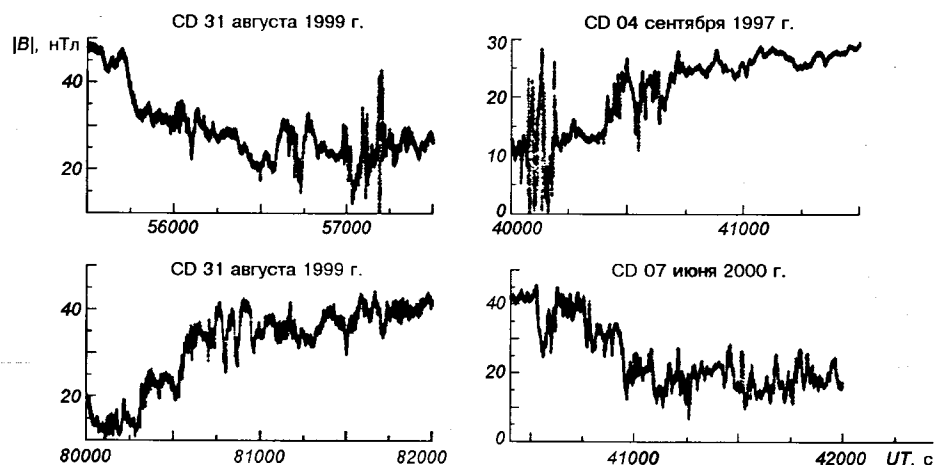


Рис. 2. Изменение абсолютного значения индукции магнитного поля  $B$  для разных моментов разрыва токового слоя

#### Характеристика рассмотренных CD

Дата	UT	UT, с	$R/R_3$	$f_{ci}$ , Гц
99/08/31	15:25:00 — 15:54:10	55500—57250	9.1	0.73
97/09/04	11:06:40 — 11:23:20	40000—41000	8.4	0.77
00/06/07	11:25:00 — 11:35:50	40500—41750	7.2	0.89
99/08/31	22:15:00 — 22:46:40	80100—82000	9.8	0.7

возможность исследовать области магнитосферы при прохождении вблизи перигелия. Использовались данные исследовательской установки, состоящей из 3-осевого индукционного и 3-осевого феррозондового магнитометра. Магнитометры расположены на 6-метровых штангах.

Данные представлены с разрешением 0.062—0.063 с. Рассматривались события, когда космический аппарат находился в токовом слое. Кроме того, при анализе предполагалось, что наблюдаемые флуктуации являются временными, а не пространственными [3].

Проанализированные моменты разрыва токового слоя 1997, 1999 и 2000 гг. представлены на рис. 2.

В рассмотренных событиях разрыва токового слоя скачок абсолютного значения магнитного поля превышает 25 нТл. Для событий с меньшим значением изменения магнитного поля статистические особенности не наблюдались. Более детальная информация рассмотренных разрывов токового слоя представлена в таблице.

События характеризуются продолжительностью от нескольких минут до десятков и локализованы в области от 8 до 10  $R_3$ , таким образом, имел место разрыв токового слоя в ближней магнитосфере.

Проведено исследование особенностей функции плотности вероятности флуктуаций магнитного поля в хвосте магнитосферы Земли для разных временных масштабов. При этом исследовались изменения формы и параметров функции плотности вероятности для периодов до и во время разрыва токового слоя (как в фазе возрастания, так и уменьшения магнитного поля,

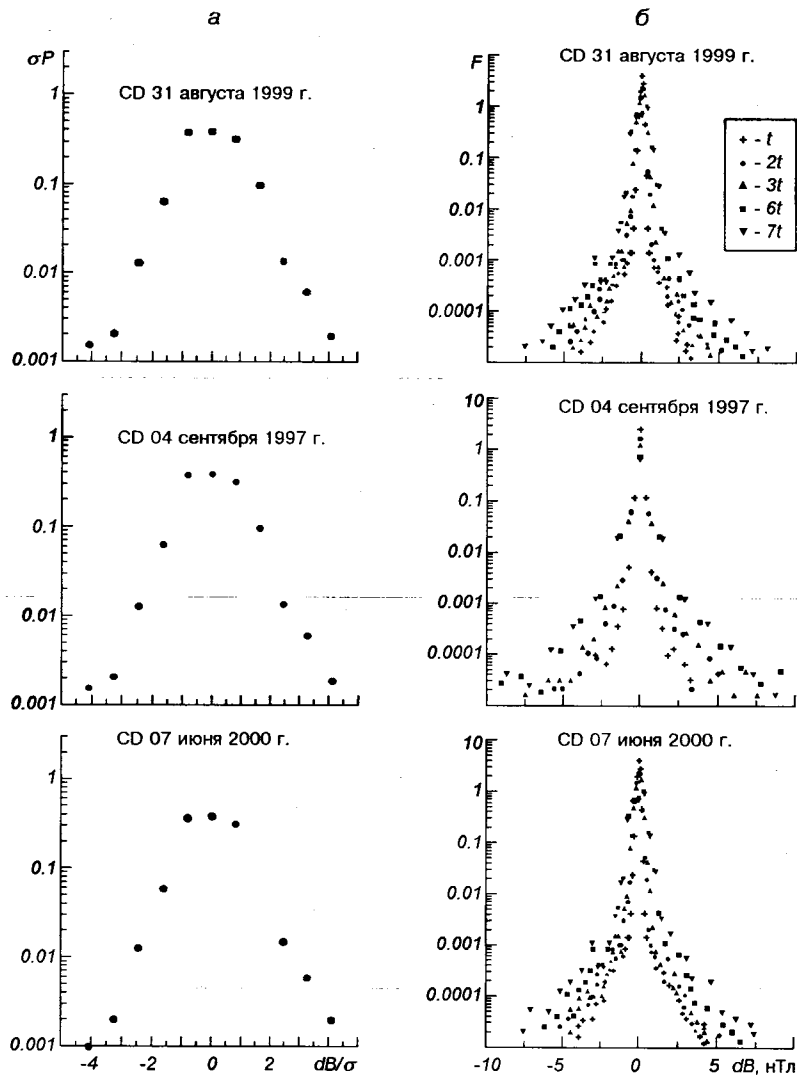


Рис. 3. *a* — нормированная функция  $\sigma P$  распределения плотности вероятности флуктуаций магнитного поля для временного масштаба  $t = 0.0625$  до CD 31 августа 1999 г., 04 сентября 1997 г. и 07 июня 2000 г.; *б* — функции  $F$  распределения плотности вероятности флуктуаций магнитного поля для разных значений шага  $\Delta t$  при наличии CD

т. е. при любом изменении системы токов). Рассмотрена эволюция абсолютного значения магнитного поля  $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ , где  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  — компоненты вектора  $B$ .

Для исследования поведения изменения величины  $B$  выбирался разный шаг по  $\Delta t$ , кратный  $t = 0.0625$ , и анализировалось изменение функции  $P(dB, \Delta t) = B(t_0 - \Delta t) - B(t_0)$ .

На рис. 3, *б* представлена эволюция функции  $F$  плотности вероятности для разных временных масштабов, а на рис. 3, *а* — нормированное значение  $\sigma P$  функции плотности вероятности флуктуаций магнитного поля до момента возникновения суббури. Следует отметить, что распределения на рис. 3,

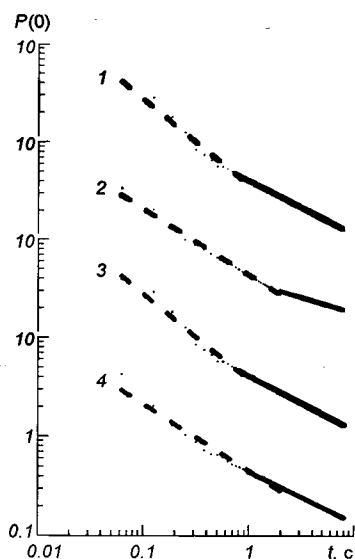


Рис. 4. Зависимости значений  $P(0)$  максимума функции распределения плотности вероятности флуктуаций магнитного поля от шага по времени, кусочно аппроксимированные двумя прямыми вида  $P(0) \propto t^{-s}$  (1 — CD 31 августа 1999 г.,  $s = 0.9$  и  $0.5$  соответственно для штрихового и сплошного отрезков; 2 — CD 04 сентября 1997 г.,  $s = 0.8$  и  $0.49$ ; 3 — CD 07 июня 2000 г.,  $s = 0.88$  и  $0.45$ ; 4 — CD 31 августа 1999 г.,  $s = 0.74$  и  $0.5$ )

$a$  — это нормальные распределения Гаусса. Для того чтобы лучше были видны крылья распределений, данные представлены в логарифмической шкале.

На всех графиках рис. 3, б наблюдается уменьшение высоты максимума функции плотности вероятности (точка перегиба). Именно зависимость высоты максимума распределения  $P(0)$  от временного масштаба  $t$  и рассматривалась в качестве характеристики эволюции функции плотности вероятности. Как видно из рис. 4, в этой зависимости выделяются два асимптотических режима  $P(0)$ , которые можно описать разными степенными законами: на больших временных масштабах  $P(0) \propto t^{-0.5}$ , при малых масштабах —  $P(0) \propto t^{-0.9}$ . Пересечение двух асимптот соответствует значению времени около 1 с.

#### ВЫВОДЫ

Подводя итоги, можно отметить следующее.

1. Максимум функции плотности вероятности  $P(0)$  зависит от шага  $t$  по времени. В этой зависимости выделяются два асимптотических участка, которые характеризуются разными степенными законами: на больших временных масштабах изменение максимума функции плотности вероятности соответствует типичному гауссовому процессу ( $P(0) \propto t^{-0.5}$ ), при малых масштабах — распределению Леви ( $P(0) \propto t^{-0.9}$ ).

2. Пересечение двух асимптот соответствует значению  $t \approx 1$  с, которое может быть связано с ионной циклотронной частотой.

3. Наличие двух асимптотических режимов указывает на два разные физические процессы: для описания процессов с характерными временными масштабами более  $1/f_{ci}$  мы можем использовать уравнения магнитогидродинамики, а для описания процессов с малыми характерными временными масштабами нужны уравнения нелинейной магнитогидродинамики.

4. Упомянутые особенности наблюдались для событий, когда амплитуда возмущений магнитного поля составляла более 25 нТл. Для событий с



меньшим значением возмущения магнитного поля описанный эффект не наблюдался.

Авторы признательны В. Н. Ивченку и П. Н. Козаку за обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта CRDF № UKP2-2644-KV-05.

1. Baker D. N., Pulkkinen T. J., Angelopoulos V., et al. Neutral line model of substorms: past results and present view // *J. Geophys. Res.*—1996.—101A, N 6.—P. 12975—13010.
2. Chang T. Multiscale intermittent turbulence in the magnetotail // *International Conference on Substorms-4.* — Tokyo: Terra Sci. Publ. Comp., 1998.—P. 431—436.
3. Consolini, G., M. Kretzschmar, A. T. Y. Lui, et al. On the magnetic field fluctuations during magnetospheric tail current disruption: A statistical approach // *J. Geophys. Res.*—2005.—110.—A07202. Doi:10.1029/2004JA010947.—18 p.
4. Erickson, G. M., Maynard N. C., Burke W. J., et al. Electromagnetics of substorm onset in the near-geosynchronous plasma sheet // *J. Geophys. Res.*—2000.—105A, N 11.—P. 25265—25290.
5. Hones E. W. Plasma flow in magnetotail and its implications for substorm theories // *Dynamics of the magnetosphere.*—1978.—78.—P. 545—562.
6. Klimas A. J., Valdivia J.A, Vassiliadis D., et al. Self-organized criticality in the substorm phenomenon and its relation to localized reconnection in the magnetospheric plasma sheet // *J. Geophys. Res.*—2000.—105A, N 8.—P. 18765—18780.
7. Kropotkin A. P. Explosion-type dynamics of the magnetotail current sheet: role of mode coupling in substorm onsets (invited review) // *Proc. of the Fifth Inter. Conf. on Substorm*, 16—20 May, 2000, S-Petersburg. — Noordwijk: ESA Publ. Division (ESA SP-443), 2000.—P. 127—133.
8. Lui A. T. Y. Current controversies in magnetospheric physics // *Rev. Geophys.*—2001.—39.—P. 535—563.
9. Milovanov A. V., Zelenyi L. M., Zimbardo G. Fractal structures and power law spectra in the distant Earth's magnetotail // *J. Geophys. Res.*—1996.—101A, N 9.—P. 19903—19910.
10. Russell C. T., McPherron R. L. Magnetic reconnection in space and laboratory plasmas // *Space Sci. Rev.*—1973.—15.—P. 205—266.

Поступила в редакцию 12.11.07