

ОКОЛОЗЕМНАЯ ГРАНИЦА ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ

© 2000 г. Я. И. Фельдштейн¹, Л. А. Дремухина¹, А. Т. Ю. Луи²

¹ *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН,
Троицк (Московская обл.)*

² *Лаборатория прикладной физики Университета Джона Гопкинса, США*

Поступила в редакцию 06.04.1999 г.

После доработки 29.06.2000 г.

Анализируется динамика внутренней границы плазменного слоя в интервале магнитной бури с использованием экспериментальных данных, полученных на спутнике AMPTE/CSE. Показано, что во время магнитной бури внутренняя граница в околополуночном секторе приближается к Земле. С удалением от полуночного меридиана к утренним и вечерним часам MLT расстояние до кромки плазменного слоя увеличивается, причем такое увеличение максимально на фазе восстановления магнитной бури. Положение внутренней границы плазменного слоя достаточно хорошо описывается в рамках параболической модели магнитосферного магнитного поля в предположении дипольности силовых линий.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что граница структурных форм аврорального свечения, или экваториальная граница овала полярных сияний, смещается к экватору в активную фазу магнитосферных суббурь и магнитных бурь [1]. Эта граница в околополуночном секторе практически совпадает с границей устойчивого захвата электронов с энергиями 40 кэВ, наблюдаемой на низковысотных спутниках [2], и проектируется в магнитосферу вблизи околоземного края токового слоя в хвосте магнитосферы [3, 4]. Для электронов авроральных энергий граница устойчивого захвата практически совпадает с границей изотропных вторжений [5, 6].

В фазы развития авроральных суббурь область дискретных форм полярных сияний в ночном секторе не только движется к полюсу [7], но и одновременно расширяется к экватору [8]. Такое экваториальное расширение области с активными формами полярных сияний должно быть естественно связано с приближением к Земле внутренней границы плазменного слоя. Действительно, наблюдения на геостационарных спутниках показали, что все без исключения магнитосферные суббури сопровождаются появлением плазмы авроральных энергий в ночном секторе на геоцентрических расстояниях $6.6R_E$ [9]. Чем интенсивней суббуря, тем в большем временном интервале в околополуночном секторе на геостационарной орбите наблюдалась плазма с энергиями, характерными для плазменного слоя. Результаты наблюдений интерпретировались в рамках дина-

мики внутренней границы плазменного слоя, смещающейся к Земле в интервалы суббурь.

Во время магнитных бурь экваториальная граница овала полярных сияний и соответствующих плазменных вторжений смещается вплоть до средних широт [10]. Проектирование этой границы в магнитосферу по любой магнитосферной модели геомагнитного поля свидетельствует о приближении ее к Земле до геоцентрических расстояний $\sim(3.5-4)R_E$. Однако, в связи с ограниченностью имеющихся экспериментальных данных, до сих пор в литературе отсутствуют систематические сведения о прямых измерениях расположения границы плазменного слоя во время магнитных бурь. Это обусловлено тем, что граница в околополуночном секторе располагается внутри орбит геосинхронных спутников, и для ее регистрации требуются наблюдения со спутников, двигающихся по эллиптическим орбитам с апогеем $\sim 10R_E$.

В данной статье по экспериментальным данным оценено положение внутренней границы плазменного слоя в интервалах магнитных бурь.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Магнитная буря 24–27 ноября 1986 г.

Расположение внутренней (околоземной) границы токового слоя в хвосте магнитосферы определялось по наивысшему энергетическому электронному каналу спектрометра HPCE (hot plasma and composition experiment) на спутнике AMPTE/CSE, который перекрывал интервал энергии 15–25 кэВ.

Таблица 1. Расположение внутренней границы токового слоя в хвосте магнитосферы в околополночном секторе во время магнитной бури по наблюдениям АМРТЕ/ССЕ (R_L) и по расчетам с использованием параболической модели магнитного поля (R_M)

Дата	UT	θ_0 , град	d_0 , град	MLT	R_L, R_E	R_M, R_E	$\Delta R, R_E$
24.11.1986	21.50	23.4	3.0	22.68	4.91	5.04	0.13
25.11.1986	14.10	25.4	2.8	00.06	3.71	4.31	0.6
27.11.1986	12.00	20.1	5.7	22.68	5.61	5.38	0.23

Во время магнитной бури 24–27 ноября 1986 г. отмечалось три пересечения границы в околополночном секторе 22–24 MLT, когда имелись данные по питч-угловому распределению энергичных электронов. Определялось место резкого изменения питч-углового распределения от анизотропного в радиационном поясе к изотропному в плазменном слое, при этом изменения интегральных по всем питч-углам потоков частиц находились в пределах фактора 2. В табл. 1 приведены определенные по измерениям спектрометра на спутнике границы резкого изменения питч-углового распределения к изотропии (MLT и R_L в радиусах Земли), а также соответствующие даты и UT измерений. Геоцентрическое расстояние до внутренней границы токового слоя в хвосте магнитосферы R_M , являющееся входным параметром параболической модели магнитного поля, вычислялось по полуночному расположению границы между диффузными и структурированными вторжениями авроральной плазмы (границы $b3a$ по идентификации [11]). Граница $b3a$ определялась по энергетическим спектрограммам плазменных вторжений в интервале от 0.03 до 25 кэВ вдоль траектории спутников DMSP, методика расчетов расположения границы в полночь изложена в [12]. θ_0 и d_0 в табл. 1 – полученные из наблюдений радиус полярной шапки и смещение центра шапки относительно исправленного геомагнитного полюса вдоль полуночного меридиана в угловой мере, соответственно. По полуночному значению исправленной геомагнитной широты границы $b3a$ определялось геоцентрическое расстояние до внутренней границы токового слоя в полночь. Предполагалось, что граница $b3a$ связана магнитными силовыми линиями с внутренней границей токового слоя, и в полночь эти силовые линии являются дипольными. Затем по параболической модели магнитного поля вычислялись приведенные в табл. 1 значения R_M , являющиеся модельными величинами геоцентрических расстояний в экваториальной плоскости (в радиусах Земли) до внутренней границы токового слоя в местное геомагнитное время, где спутник АМРТЕ/ССЕ пересекал границу областей с разными питч-угловыми распределениями. Там же приведены разности ΔR между R_L и R_M , составляющие несколько десятых радиуса Земли.

Из приведенных в табл. 1 данных следует:

1) граница областей в околополночной магнитосфере с различными питч-угловыми распределениями энергичных электронов располагается во время магнитной бури на относительно малых геоцентрических расстояниях $R_L \sim 4R_E$. Существование такой границы свидетельствует об изменении характера магнитных силовых линий от квазидипольного во внутренней магнитосфере с анизотропным распределением энергичных электронов по питч-углам к вытянутым в хвост во внешней магнитосфере с изотропным распределением по питч-углам. Изменение характера магнитных силовых линий обусловлено существованием в плазменном слое хвоста токового слоя, околоземный край которого располагается на геоцентрических расстояниях до $4R_E$;

2) геоцентрическое расстояние до внутренней границы токового слоя можно определять в предположении дипольности магнитной силовой линии, пересекающей эту границу, начиная с геомагнитной широты “приземления” силовой линии. Это означает, что неточность в определении одного из входных параметров параболической модели магнитного поля в магнитосфере (геоцентрического расстояния до внутренней кромки плазменного слоя в полночь R_2), составляет всего несколько десятых долей земного радиуса, т.е. $\sim 10\%$ от величины R_2 ;

3) расположение внутренней границы токового слоя изменяется в течение бури от $\sim 5R_E$ в начале главной фазы бури (24 ноября 1986 г.) до $\sim 3.7R_E$ в максимуме главной фазы (25 ноября 1986 г.) и до $\sim 5.6R_E$ на заключительной стадии фазы восстановления (27 ноября 1986 г.).

Параболическая модель магнитного поля использовалась для определения расположения внутренней границы токового слоя в другие интервалы местного геомагнитного времени в течение трех изучаемых пролетов АМРТЕ/ССЕ. В табл. 2 приведены значения R_M для ночного сектора магнитосферы. Внутренний край токового слоя удаляется от Земли при смещении от полуночи к утренним и вечерним часам. Такое увеличение R_M минимально в максимуме главной фазы ($\sim 0.9R_E$), составляет $\sim 2R_E$ в начале главной фазы и увеличивается до $\sim 4.7R_E$ на фазе восстановления. Наблюдения на спутнике АМРТЕ/ССЕ подтверждают

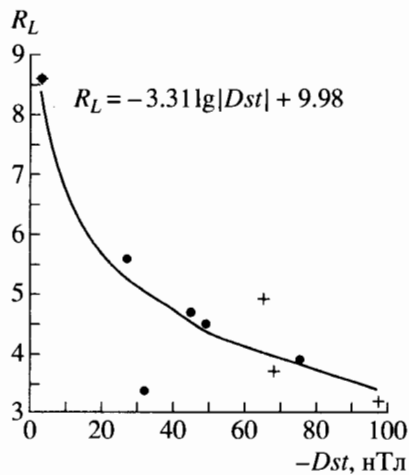


Рис. 1. Геоцентрическое расстояние до внутренней границы токового слоя R_L в экваториальной плоскости магнитосферы в радиусах Земли по данным спутника AMPTE/CSE в зависимости от $|Dst|$ (в нТл). Крестики – главная фаза магнитных бурь, кружки – фаза восстановления.

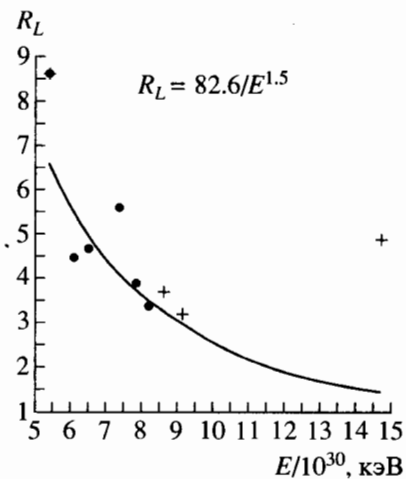


Рис. 2. Геоцентрическое расстояние до внутренней границы токового слоя R_L в экваториальной плоскости магнитосферы в радиусах Земли в зависимости от энергии ионов кольцевого тока E в 10^{30} кэВ по данным спутника AMPTE/CSE. Крестики – главная фаза магнитных бурь, кружки – фаза восстановления.

увеличение геоцентрического расстояния до внутренней границы токового слоя при переходе от околополуденных часов к вечерним. Так, 26 ноября 1986 г. в 10:50 UT граница токового слоя пересекалась в 18.86 MLT на $R_L = 7.3R_E$, а модельные расчеты дают для вечернего сектора в этом пролете $R_M = 7.25R_E$, т.е. расхождение вычисленных и наблюдаемых значений всего $0.05R_E$. Увеличение геоцентрического расстояния R_L и, соответственно, R_M в вечернем секторе относительно околополуденных часов было зарегистрировано и при других пересечениях границы токового слоя спутником AMPTE/CSE.

Статистические зависимости по данным трех магнитных бурь.

Связь R_L с интенсивностью Dst вариации исследовалась с привлечением дополнительных данных о пересечении спутником AMPTE/CSE внутренней границы токового слоя в околополуденном секторе в интервалы еще двух бурь – 28–30 января 1985 г. и 14–17 января 1988 г. На рис. 1 приведены сводные данные по всем трем бурям. Использовано и пересечение токового слоя до на-

чала магнитной бури, когда 14 января 1988 г. в 17.10 UT $Dst = -3$ нТл и $R_L = 8.6$ (оно обозначено совмещенными крестиком и кружком). Отчетливо проявляется тенденция в приближении границы слоя к Земле по мере усиления Dst вариации. Не выявлено систематических различий в зависимости R_L от Dst для главной и восстановительной фаз магнитных бурь. Зависимость R_L от Dst аппроксимируется соотношением $R_L = -3.31 \lg(-Dst) + 9.98$, полученным методом наименьших квадратов, где R_L в радиусах Земли, Dst в нТл. Коэффициент корреляции между экспериментальными значениями и аппроксимирующей кривой равен 0.88 при дисперсии $\sigma = 0.66$ нТл.

На рис. 2 приведены значения R_L в радиусах Земли в зависимости от суммарной энергии ионов $E/10^{30}$ кэВ в области кольцевого тока ($2R_E < L < 7R_E$) для тех же пролетов спутника AMPTE/CSE. Сохраняется тенденция к уменьшению R_L при увеличении суммарной энергии электронов E . Разброс данных относительно определенной методом наименьших квадратов кривой свидетельствует о том, что на динамику внутренней границы плазменного слоя в интервале магнитной бури помимо кольцевого тока могут оказывать влияние и

Таблица 2. Расположение внутренней границы токового слоя по расчетам с использованием параболической модели магнитного поля в различные MLT

MLT Дата	18	19	20	21	22	23	00	01	02	03	04	05	06
24.11.1986	6.92	6.42	5.95	5.51	5.23	5.02	4.91	5.02	5.23	5.51	5.95	6.42	6.92
25.11.1986	5.22	5.01	4.78	4.58	4.44	4.34	4.31	4.34	4.44	4.58	4.78	5.01	5.22
27.11.1986	9.89	8.44	7.24	6.35	5.67	5.28	5.14	5.28	5.67	6.35	7.94	8.47	9.89

другие крупномасштабные магнитосферные токовые системы. Более тесная связь R_L с индексом Dst , возможно, и обусловлена тем, что он отражает воздействие нескольких таких систем. На рис. 2 имеется точка, соответствующая большим значениям энергии и относительно большим значениям R_L , которая не укладывается в приведенную зависимость. Она приходится на время развития главной фазы магнитной бури, когда резко меняется как суммарная энергия ионов кольцевого тока, так и геоцентрическое расстояние до внутренней границы плазменного слоя. Следует иметь в виду, что внутренняя граница плазменного слоя характеризует положение в конкретный момент времени, а энергия представляет суммарное значение энергии ионов в интервале $2 < L < 7$, относящееся ко всему времени пролета спутника. Меньший разброс точек на рис. 1 объясняется тем, что Dst представлено среднечасовыми значениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных о положении внутренней границы токового слоя в хвосте магнитосферы, полученных со спутника АМРТЕ/ССЕ в интервалах магнитных бурь 28–30 января 1985 г., 24–27 ноября 1986 г. и 14–17 января 1988 г., изучена динамика геоцентрического расстояния R_L до внутренней кромки токового слоя. Показано, что R_L в ходе магнитной бури уменьшается, максимально приближаясь к Земле до $\sim 3.5R_E$ в максимуме главной фазы при $Dst \sim -100$ нТл. Это означает, что кольцевой ток располагается на геоцентрических расстояниях менее 3,5 земных радиусов. Замечательно, что на заре космических исследований Пушков и Долгинов [13] на лунной ракете обнаружили вариацию магнитного поля, которую они связали с кольцевым током, расположенным на $L = 3$ во время возмущения. Таким образом, измерения на новых спутниках, оснащенных современной измерительной аппаратурой, еще раз подтвердили выводы этих ученых.

Расстояние до околоземного края токового слоя можно определять в предположении дипольности силовой линии, образующей границу слоя. При проектировании границы слоя от точки “приземления” в магнитосферу дипольное приближение дает ошибку, составляющую менее 10% от величины R_L . Внутренний край токового слоя удаляется от Земли при смещении от полу-

ночных часов к утренним и вечерним, и такое изменение минимально в главной фазе магнитной бури и максимально на фазе восстановления. Связь величины R_L с Dst индексом отчетливо проявляется в уменьшении R_L с ростом Dst .

Исследование велось при частичной поддержке гранта РФФИ 99-05-65611.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акасофу С.-И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика. М.: Мир, 1975. С. 512.
2. *Feldstein Y.I., Starkov G.V.* The auroral oval and the boundary of closed field lines of geomagnetic field // *Planet. Space Sci.* 1970. V. 18. № 4. P. 501–508.
3. *Elphinstone R.D., Hearn D., Murphree J.S. et al.* Mapping using the Tsyganenko long magnetospheric model and its relationship to Viking auroral images // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № 2. P. 1467–1480.
4. *Feldstein Y.I., Elphinstone R.D.* Aurorae and large-scale structure of the magnetosphere // *J. Geomag. Geoelectr.* 1992. V. 44. № 5. P. 1159–1174.
5. *Galperin Yu.I., Feldstein Y.I.* Mapping of the precipitation regions to the plasma sheet // *J. Geomag. Geoelectr.* 1996. V. 48. № 4. P. 857–875.
6. *Yahnin A.G., Sergeev V.A., Gvozdevsky B.B. et al.* Magnetospheric source region of discrete auroras inferred from their relationship with isotropy boundaries of electric particles // *Ann. Geophys.* 1997. V. 15. № 6. P. 943–958.
7. *Akasofu S.I.* The development of the auroral substorm // *Planet. Space Sci.* 1964. V. 12. № 2. P. 273–282.
8. *Старков Г.В., Фельдштейн Я.И.* Суббурия в полярных сияниях // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1971. Т. 11. № 2. С. 560–562.
9. *Freeman J.W., Maguire J.J.* Gross local-time particle asymmetries at the synchronous orbit altitudes // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. № 21. P. 5257–5264.
10. *Feldstein Y.I., Gromova L.I., Grafe A. et al.* Auroral electrojet dynamics during magnetic storms, connection with plasma precipitation and large-scale structure of the magnetospheric magnetic field // *Ann. Geophys.* 1999. V. 17. № 4. P. 497–507.
11. *Newell P.T., Feldstein Y.I., Galperin Yu.I. et al.* The morphology of nightside precipitation // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 101. № 5. P. 10737–10748.
12. *Dremukhina L.A., Feldstein Y.I., Alexeev I.I. et al.* Structure of the magnetospheric magnetic field during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № 12. P. 28351–28360.
13. *Долгинов С.А., Пушков Н.В.* Результаты измерения магнитного поля Земли на космической ракете // *Докл. АН СССР.* 1959. Т. 129. № 1. С. 77–80.