

УДК 53.098

## ВЛИЯНИЕ $B_z$ -КОМПОНЕНТЫ ММП НА ПОЛОЖЕНИЕ И ГЕОМЕТРИЮ НЕЙТРАЛЬНОГО СЛОЯ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ

М.В. Амосова, В.А. Сергеев, Е.И. Гордеев

### POSITION AND GEOMETRY CHANGES OF THE TAIL NEUTRAL SHEET CAUSED BY IMF $B_x$ -COMPONENT

M.V. Amosova, V.A. Sergeev, E.I. Gordeev

По результатам глобального МГД-моделирования исследовано влияние  $B_x$ -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) на конфигурацию хвоста и положение нейтрального слоя (НС). В двух симуляциях с изменяемым параметром  $B_z$  ММП при наличии ММП  $B_x = \pm 6$  нТл расчеты показали наличие больших смещений НС вдоль координаты  $z$ , зависящих от знака  $B_x$ -компоненты ММП (вверх/вниз при отрицательной/положительной  $B_x$ ). Величина смещения оказалась также связана со знаком и величиной  $B_z$  ММП. Амплитуда смещений НС зависит от радиального расстояния и увеличивается с удалением от Земли, достигая величин порядка 2–2.5  $R_E$  на расстоянии  $x = -30R_E$ . Обработка данных спутника Geotail за 1995–2005 гг. подтвердила, что  $B_x$  ММП оказывает влияние на положение НС и наблюдаемые смещения соответствуют расчетным и имеют амплитуду порядка  $1R_E$ .

Using global MHD simulation we investigated the influence of interplanetary magnetic field (IMF)  $B_x$ -component on the configuration of the magnetotail and neutral sheet (NS) location. IMF  $B_z$ -component varied in time while other solar wind parameters were fixed, two simulations were run with  $B_x = -6$  nT,  $B_x = 6$  nT. Calculations showed large  $z$ -displacements of the tail NS depending on IMF  $B_x$  sign (goes up for  $B_x < 0$ , down for  $B_x > 0$ ). The shifts are also associated with sign and value of  $B_z$  component. The magnitude of NS shift also depends on radial distance and increases in tailward direction achieving values 2–2.5  $R_E$  at  $x = -30R_E$ . Processing of Geotail observations data for 1995–2005 confirms that IMF  $B_x$  influence the position of NS. The observed shifts have magnitude  $1R_E$  and the same direction as obtained from MHD simulation.

Одним из основных направлений развития физики магнитосферы является разработка глобальных моделей, позволяющих описать возмущенную магнитосферу посредством трехмерного магнитогидродинамического (МГД) моделирования. Численные МГД-модели успешно описывают накопленную информацию о глобальных системах электрического тока, конвекции плазмы в магнитосфере и ионосфере, формировании плазменного и граничного слоев, динамике полярных шапок и т. д. [S.W.H., 1981]

Эффекты, связанные с наличием  $u$ -компоненты в ММП, были предсказаны на качественном уровне [Raeder, 2003]. Однако зависимость положения нейтрального слоя (НС) от величины и знака  $x$ -компоненты ММП пока не изучена. Применяя МГД-моделирование и спутниковые данные, мы исследуем положение НС в зависимости от ММП.

#### Моделирование

Расчеты проводились в координационном центре ССМС (Годдарский космический центр, США), который обеспечивает доступ к современным научным моделям для международного исследовательского сообщества. Численные расчеты проводились с использованием кода BATS-R-US программой, созданной компьютерной МГД-группой университета Мичиган, которая широко применяется для глобального численного моделирования солнечно-земных систем, магнитосферно-ионосферных связей и т. д. (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov>).

Расчетная область исследования лежит в следующих пределах:  $33R_E < x < -40R_E$ ,  $-35R_E < y$ ,  $z < 35R_E$ , с шагом  $0.25R_E$ . Ионосферная проводимость задавалась однородной, магнитный диполь перпендикулярен оси  $X$  в системе координат GSM (геоцентрическая солнечно-магнитосферная). Начальные условия для большинства параметров были фиксированными: плотность солнечного ветра (СВ)  $n = 5.00 \text{ см}^{-3}$ , темпе-

ратура  $T = 100000 \text{ K}$ , скорость СВ  $V_x = -400.00 \text{ км/с}$ ,  $V_y = 0$ ,  $V_z = 0$ ,  $B_x = 6$  нТл либо  $B_x = -6$  нТл,  $B_y = 0$ . Единственным изменяющимся параметром являлась  $z$ -компонента ММП (рис. 1). В начальный момент  $B_z = -3$  нТл, через 20 мин  $B_z = 3$  нТл, затем через каждые 40 мин в течение 2 ч 40 мин магнитное поле меняется ступенчато при следующих значениях ступенек:  $B_z = [-6; 3; -9]$  нТл.

Для наглядного представления исследуемого эффекта рассмотрим серию расчетов [[http://ccmc.gsfc.nasa.gov/database\\_MHD/Masha\\_Amosova\\_021610\\_1.php](http://ccmc.gsfc.nasa.gov/database_MHD/Masha_Amosova_021610_1.php)] и проследим за основными конфигурационными изменениями в хвосте магнитосферы. На рис. 2 представлены результаты моделирования обтекаемой солнечным ветром магнитосферы, даны разрезы в меридиональной плоскости в разные моменты времени, которые соответствуют разным значениям  $B_z$ -компоненты ММП. Для выделения магнитных полей разных источников использована цветовая кодировка\*: синий цвет – для межпланетных силовых линий, черный – для открытых силовых линий (начинающихся с Земли и уходящих в СВ), красный – для замкнутых (на Землю) силовых линий. Величина плазменного давления показана на рис. 2 цветом, стрелками обозначены вектора скорости. Нейтральный слой, который расположен в центре хвоста магнитосферы, отмечен зеленым цветом, что соответствует максимальному плазменному давлению. Стоит отметить, что термином НС мы называем центр токового слоя, при пересечении которого  $x$ -компонента магнит-

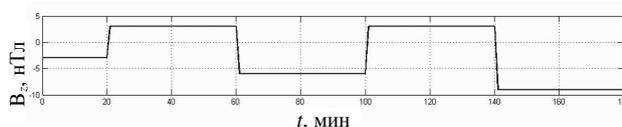


Рис. 1. Вариации изменения  $z$ -компоненты ММП в период рассматриваемой симуляции [[http://ccmc.gsfc.nasa.gov/database\\_MHD/Masha\\_Amosova\\_021610\\_1.php](http://ccmc.gsfc.nasa.gov/database_MHD/Masha_Amosova_021610_1.php)].

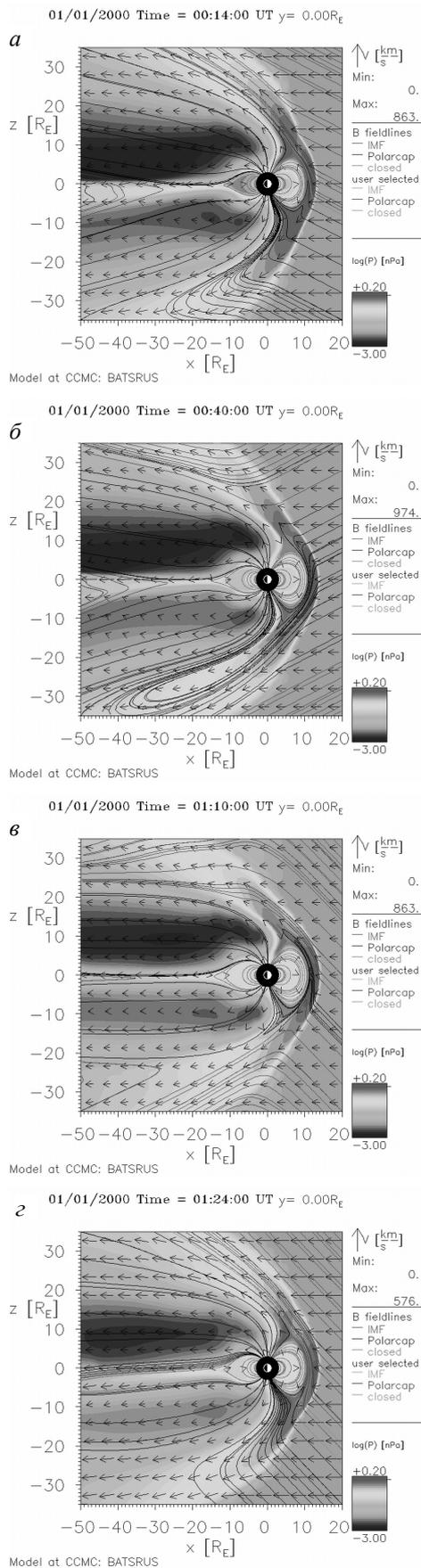


Рис. 2. Структурные изменения магнитных силовых линий (изоконтуры), векторов скорости (стрелки) и распределение давления (цвет) в хвосте магнитосферы в сечении XZ, симуляция [http://ccmc.gsfc.nasa.gov/database\_MHD/Masha\_Amosova\_021610\_1.php].

ного поля меняет знак (т. е. переходит через ноль). Вверху показан рассматриваемый момент времени.

В начальный момент времени 00:14 UT начинается загрузка магнитосферы плазмой солнечного ветра, что приводит к изменению токовых систем магнитосферы. На данном этапе НС лежит в плоскости  $z=0$  (рис. 2, а). После того как  $z$ -компонента ММП сменила знак, магнитные силовые трубки «оборачивают» магнитосферу и соскальзывают с ее флангов. В этом случае пересоединение происходит за каспами, отбирая магнитный поток у магнитосферы из долей и унося магнитные трубки в солнечный ветер (рис. 2, б). По мере того, как на дневной стороне магнитосферы происходит пересоединение ( $B_z < 0$ ) и следующие за ним динамические процессы в хвосте (суббури), НС опускается ниже плоскости  $z=0$  и остается там до тех пор, пока система не придет к равновесному состоянию (рис. 2, в).

Грубый анализ конфигурационных изменений показывает, что наблюдается эффект вертикального смещения НС при пересоединении на дневной стороне магнитосферы. Для подробного изучения механизма влияния  $B_x$ -компоненты на положение и геометрию НС проанализируем полученные данные более детально.

Для определения положения НС через каждую точку строились профили магнитного поля  $B_{x(z)}$  и проводилась интерполяция сплайном (ИС) данного профиля. Положение НС определялось неточно в случае больших локальных магнитных возмущений. Опытным путем было установлено, что значение коэффициента корреляции  $B_{x(z)}$  не должно превышать 0.97 [Sergeev, Tsyganenko, 2008]. В результате проведенной обработки была построена временная зависимость смещения НС в каждой точке  $(x, y)$  в процессе всей симуляции.

На рис. 3 представлено смещение НС в зависимости от времени на разных расстояниях от Земли. На верхней панели показана вариация  $B_z$ -компоненты ММП, смещенная параллельным переносом со скоростью солнечного ветра от передней границы расчетной области ( $x_f=33R_E$ ) к сечению хвоста на  $x=-25R_E$ ,  $dT=(x_f-x)/V_x$ . Амплитуда смещения НС зависит от расстояния  $x$ . Этот эффект растет с удалением от Земли. При  $x=-35R_E$  слой прогнулся до  $z=2.5R_E$ . При северной ориентации  $B_z$  ММП НС возвращается к своему начальному положению, а при последующем повороте к югу с одновременным увеличением модуля ММП увеличивается амплитуда отклонения НС. Сопоставляя изменения  $B_z$ -компоненты ММП и изменения положения НС, отметим, что эти события взаимосвязаны. При  $B_z < 0$  видны две зоны увеличения амплитуды смещения, одна из которых связана со взрывной фазой суббури (рис. 3, период  $t=90\div 102$  мин) и выделена пунктирным прямоугольником.

Согласно модели [Raeder, 2003], движущей силой смещения НС является перепад давления поперек хвоста. Можно построить нормированную величину анизотропии давления  $A_p = (P_s - P_n) / \langle P \rangle$  (рис. 4), где  $P$  – сумма магнитного и теплового на расстоянии  $\pm 7R_E$  от положения НС в долях хвоста,  $P_n$  – давление

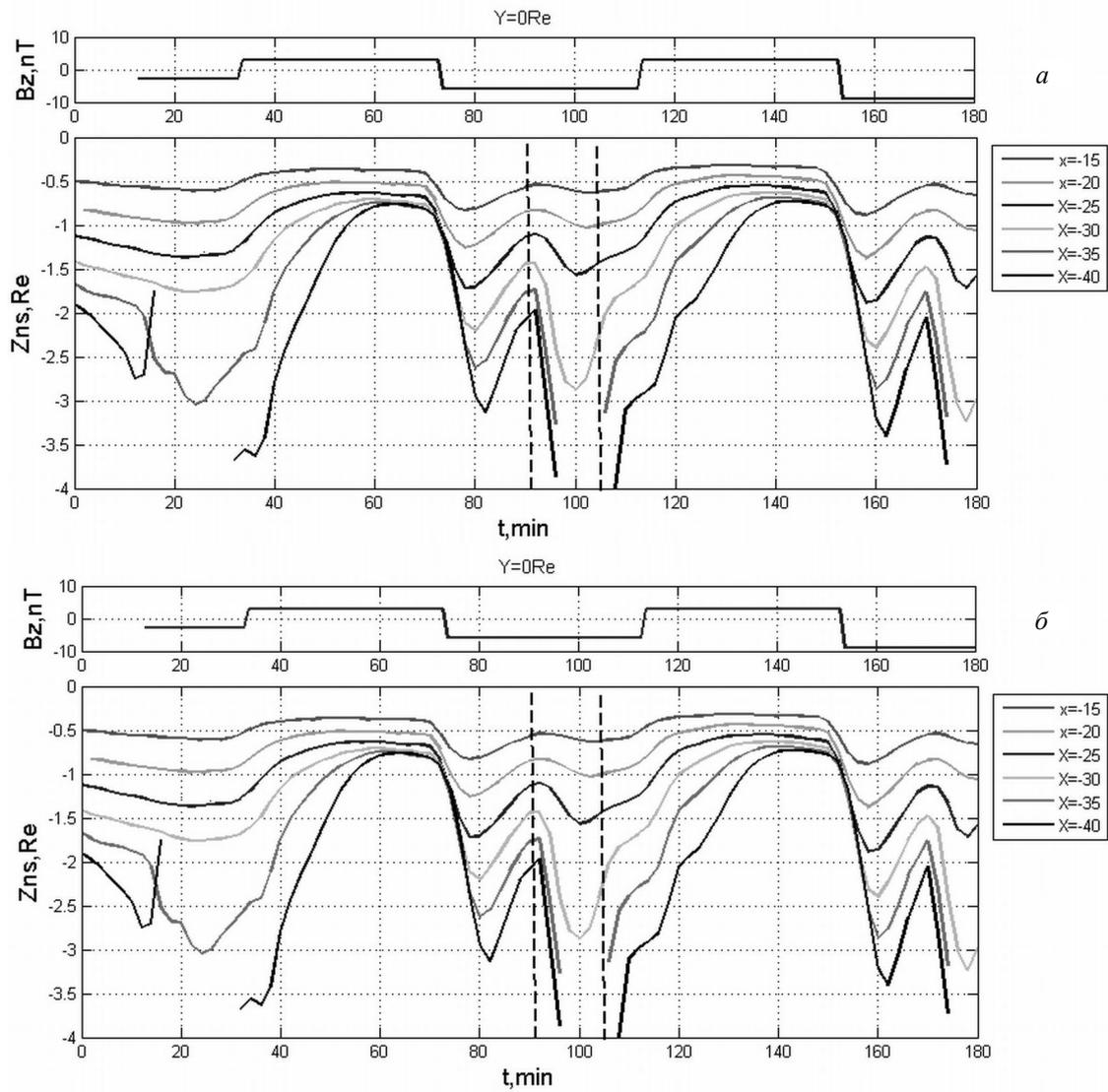


Рис. 3. Смещение  $z$ -компоненты НС по профилям координат  $x$  в плоскости  $XZ$  при  $y=0$  для случая ММП  $B_x=6$  нТл (а) и  $B_x=-6$  нТл (б). Кривые при  $x=-15, -20, \dots, -40$  расположены сверху вниз.

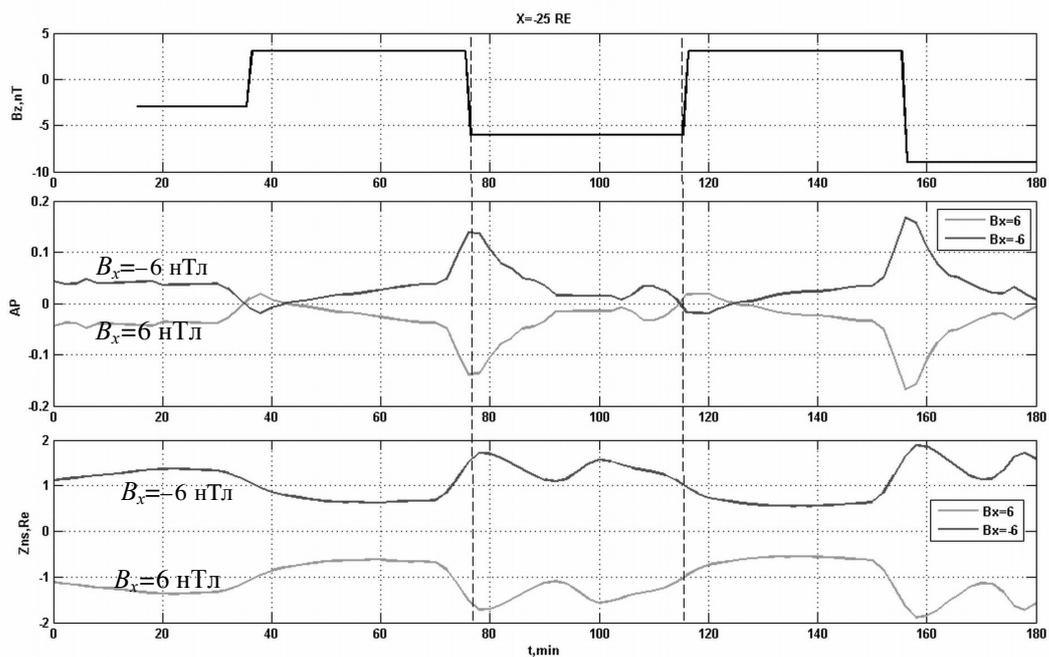


Рис. 4. Вариации нормированной анизотропии давления, положение НС ( $x=-25R_E, y=0$ ) в двух симуляциях.

в северной доле. На рис. 4 показаны случаи для разных значений:  $B_x=6$  нТл (серые кривые) и  $B_x=-6$  нТл (черные кривые). При перевороте  $B_z$ -компоненты наблюдается резкий скачок анизотропии давления, что приводит к смещению НС вниз/вверх (преобладание давления в северной доле над южной, первая штриховая линия). После разворота к северу  $B_z$ -компоненты наблюдается равномерное возвращение токового слоя к новому положению равновесия (вторая штриховая линия).

Сравнивая  $A_p$  и  $z$  видим, что связь отличается для двух мод и давление не работает для эффекта суббурь. Это стоит отметить и объяснить в будущем.

### Экспериментальные результаты

Для подтверждения результатов моделирования было исследовано поведение реального токового слоя. Использованы данные спутника Geotail за 1995–2005 гг. и отобраны случаи, когда спутник находился на расстоянии  $x=(-20 \div -30)R_E$ ,  $y=(-5 \div 5)R_E$  в GSW системе координат.

Моделирование показало, что при отрицательной/положительной компоненте  $B_x$  НС поднимается вверх/опускается вниз. Для оценки положения реального НС использовалась модель Цыганенко–Мукаи. Чтобы сохранить достаточно большое количество данных, выбирались положения спутника, когда он находился в центральной части токового слоя, где магнитное давление много меньше плазменного. Эта модель необходима для расчета плазменного давления  $P$  в зависимости от координат по известным значениям параметров СВ. Зная модельное давление, можно найти магнитное поле по формуле (2). Координата спутника соответствовала положению НС в том случае, если отношение измеренного поля к рассчитанному модельному было порядка 0.2.

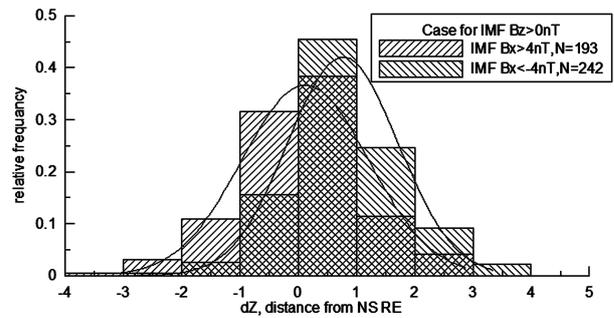
$$B = \sqrt{2\mu_0 P}. \quad (2)$$

На рис. 5 представлены гистограммы положений предполагаемого нейтрального слоя. В случае положительной  $B_z$ -компоненты ММП отклонения НС существуют и проявляются в нужную сторону в соответствии с результатами моделирования. В случае отрицательной  $B_z$  (нижняя панель рис. 5, а) отклонения есть, но они одинаковы для разных знаков  $B_x$  ММП и равны  $0.2R_E$ , что противоречит результатам моделирования. При увеличении модуля  $B_x$  происходит более существенное смещение координаты НС при одной и той же ориентации  $B_z$ -компоненты (верхний график рис. 5, б приведен для величины  $B_x < -4$  нТл, нижний график – для  $B_x < -6$  нТл).

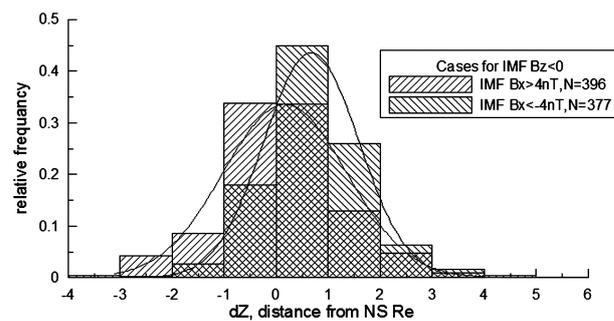
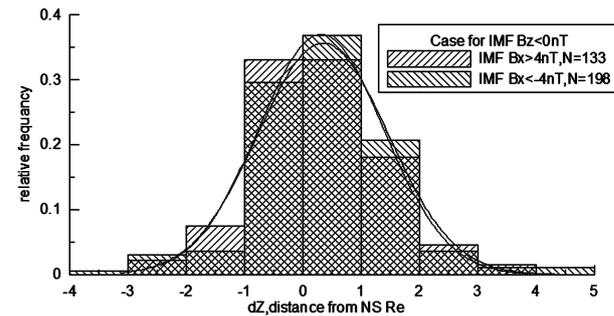
### Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Значение  $x$ -компоненты ММП является важным физическим параметром, оказывающим влияние на положение НС хвоста магнитосферы.
2. В моделировании наблюдалась явная зависимость положения НС от  $B_x$ -компоненты ММП.
3. В экспериментальных данных зависимость при определенной ориентации  $B_z$ -компоненты проявлялась



a



б

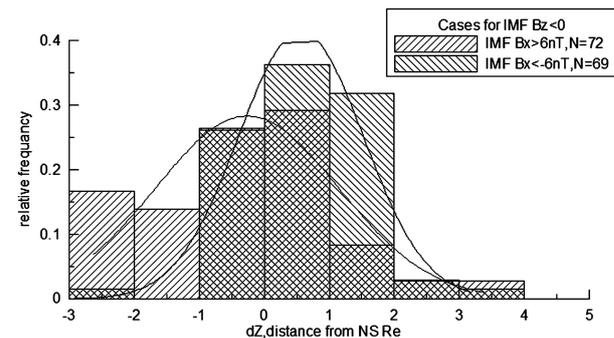


Рис. 5. Гистограммы и их огибающие для оценки положения НС в случае ММП  $B_z > 0$ ,  $B_z < 0$  и  $B_x < -4$  нТл (а) и ММП  $B_z < 0$ ,  $B_x < -4$ ,  $B_x < -6$  нТл (б),  $N$  – количество случаев.

нечетко (при выборке случаев с ММП) При увеличении модуля  $x$ -компоненты ММП наблюдается более сильное смещение положение НС (при выборке случаев с ММП  $B_x > 6$  нТл).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

S.W.H. Cowley Asymmetry effects associated with the  $x$ -component of the IMF in a magnetically open magnetosphere // Planet. Space Sci. 1981. V. 29, N. 8. P. 809–818.

Raeder J. Global Magnetohydrodynamics. A Tutorial // Space Plasma Sim. / Eds. J. Buchner, Dum C.T., Scholer M. Lecture Notes in Physics. 2003. V. 615. P. 212–246.

Sergeev V.A., Tsyganenko N.A., Angelopoulos V. Dynamical response of the magnetotail to changes of the solar wind direction: an MHD modeling respective // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 2395–2402.

<http://ccmc.gsfc.nasa.gov>.

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург*

\* Рисунок 2 в данном издании не может быть воспроизведен в цвете. За оригиналом рисунка просим обращаться к автору.