

УДК 523.62-726

Влияние радиальной компоненты межпланетного магнитного поля на положение нейтрального слоя хвоста магнитосферы Земли

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

Санкт-Петербургский Государственный Университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9,
e-mail: evgeny.i.gordeev@spbu.ru

Аннотация. Исследован эффект смещения нейтрального слоя (НС) хвоста магнитосферы под действием радиальной компоненты ММП, который на сегодняшний день остается мало изученным. Для этого были использованы результаты глобального магнитогеодинамического моделирования, зарекомендовавшего себя как эффективный инструмент исследования крупномасштабных физических процессов в магнитосфере. Показано, что существует довольно значительное вертикальное смещение НС даже в ближней области хвоста, связанное с несимметричной загрузкой южной и северной долей магнитным потоком из солнечного ветра. Кроме этого, были обнаружены два дополнительных, ранее неизвестных эффекта: 1) более слабое смещение НС ($0.2-0.8 R_E$) при северной ориентации B_z ММП, ассоциированное с несимметричной разгрузкой хвоста за счет магнитного пересоединения за каспами, и 2) дополнительный режим смещения НС в периоды развития взрывной фазы суббури, который можно объяснить структурой МГД разрывов, образованных в ходе несимметричного магнитного пересоединения в токовом слое хвоста.

Ключевые слова: крупномасштабная динамика магнитосферы, нейтральный (токовый) слой хвоста, магнитное пересоединение, глобальное МГД моделирование.

Influence of interplanetary magnetic field radial component on the position of the Earth's magnetotail neutral sheet

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

Saint Petersburg State University,
7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034 Russia
e-mail: evgeny.i.gordeev@spbu.ru

Abstract. Using the first principle global magnetohydrodynamic simulation we try to take the first steps in study of the large-scale magnetotail dynamics associated with IMF B_x component. Displacement of the dayside reconnection line away from the equatorial plane due to presence of the B_x IMF component leads to significant modification of the magnetopause draping and results in the global asymmetrization of entire magnetospheric system. Complicated changes in the magnetosheath and magnetotail lobes cause the geometrical reformation of all magnetospheric boundaries and initiate the neutral sheet vertical displacement that can be addressed to the three complementary processes. The first can be referred to the hypothesis of asymmetrical loading of the magnetotail lobes with the reconnected magnetic flux on the dayside magnetopause. The second is the non-symmetrical magnetic field draping that leads to the pressure difference in the opposite magnetosheath sides and displacement of the entire magnetotail together with embedded neutral sheet. And the third process is closely links to the substorm expansion: the asymmetrical loading of the opposite lobes causes an asymmetry in the magnetic and plasma parameters about the

tail neutral sheet surface and the additional effective displacement of the neutral sheet can be qualitatively explained in terms of asymmetrical reconnection theory.

Keywords: large-scale magnetospheric dynamics, neutral (current) sheet, magnetic reconnection, global MHD simulation.

Введение

Направление и величина межпланетного магнитного поля (ММП) является ключевым фактором, определяющим режим взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы Земли, что, в свою очередь, определяет состояние и динамику хвоста магнитосферы. При южной ориентации ММП, магнитное поле солнечного ветра объединяется с магнитосферным в результате магнитного пересоединения на дневной магнитопаузе и переносится в хвост солнечным ветром [1]. В результате этого процесса в хвосте магнитосферы аккумулируется энергия, поступающая из солнечного ветра. При северном направлении ММП происходит обратный перенос энергии из хвоста на дневную сторону магнитосферы за счет магнитного пересоединения полей солнечного ветра и долей хвоста [2]. Однако характер обтекания магнитосферы определяется не только V_z компонентой ММП, но двумя другими компонентами, V_x и V_y . Если исследования, связанные с влиянием V_z и V_y компонент ММП на состояние и динамику магнитосферы, активно ведутся с самого начала космической эпохи, то влиянию V_x компоненты было уделено довольно скудное внимание. Это связано, в первую очередь, с тем, что V_x ММП плохо коррелирует с индексами геомагнитной активности. Поэтому нет очевидного подтверждения, что эта компонента оказывает значительное действие на магнитосферную систему. Влияние V_x компоненты не включено ни в одну эмпирическую модель связи магнитосферных параметров с параметрами солнечного ветра.

Однако в ряде работ было показано, что V_x компонента ММП оказывает значительное влияние на состояние магнитосферной системы. В частности, по данным спутниковых наблюдений, в периоды преобладающей радиальной компоненты ММП положение магнитопаузы в подсолнечной точке наблюдается на $\sim 20\%$ дальше, а положение головной ударной волны на $\sim 10\%$ ближе к Земле, чем предсказывают

эмпирические модели [3]. Соответственно ширина переходной области в таких условиях оказывается в 3 раза меньше [4].

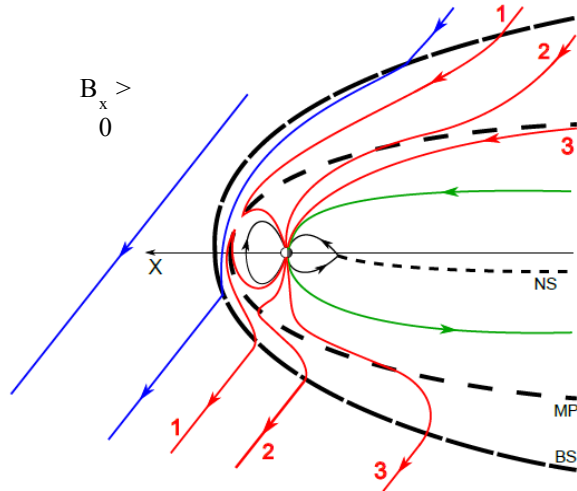


Рис. 1. Схема асимметричной (за счет наличия положительной V_x компоненты ММП) конвекции пересоединенных на дневной магнитопаузе плазменных трубок в хвост магнитосферы, приводящая к изменению баланса давлений поперек хвоста и вертикальному смещению нейтрального слоя от первоначального положения. Рисунок построен в соответствии с данными глобального МГД моделирования и в общих чертах соответствует геометрии, предложенной в работе [8].

Кроме особенностей в положении основных границ магнитосферы, наличие V_x компоненты ММП в солнечном ветре приводит также к ряду эффектов, связанных с образованием асимметрии в разных областях магнитосферной системы. Так, для V_x ММП направленной к Солнцу, вихри ионосферной конвекции в северном полушарии сдвинуты в сторону полуночного меридиана, а в южном в сторону полуденного, и наоборот для V_x направленной от солнца [5]. Асимметрия также наблюдается и в геометрии полярных сияний, и в их интенсивности. Одновременное наблюдение обоих полушарий с помощью камер на спутниках IMAGE и POLAR в условиях преобладающей V_x компоненты ММП показало, что структура, интенсивность и динамика сияний в разных полушариях значительно различается [6]. На основании статистического исследования снимков северного полушария со спутника Polar (~60,000 снимков, сделанных с января 1997 г. по август 1998 г.) в ультрафиолетовом диапазоне показано, что интенсивность сияний зависит от величины и направления V_x ММП [7].

Одна из первых работ, указывающих на значимость роли V_x компоненты ММП в формировании глобальной асимметрии магнитосферной системы, это работа [8]. В этой работе на основании умозрительного эксперимента, используя магнитогидродинамические представления о взаимодействии солнечного ветра с

магнитосферой, был предсказан эффект вертикального смещения нейтрального слоя хвоста под действием ММП имеющего южное направление и ненулевую V_x -компоненту поля. Предложенный механизм заключается в следующем. Смещение линии пересоединения на дневной магнитопаузе, при наличии компоненты V_x ММП, в более высокоширотную область, приводит к несимметричной конвекции вновь открытых трубок относительно плоскости экватора (Рис. 1). Это, в свою очередь, ведет к неравномерной загрузке долей хвоста и аккумуляции разного количества магнитного потока в северной и южной долях. В результате, для сохранения баланса давлений поперек хвоста, происходит вертикальное смещение нейтрального слоя в сторону доли с запаздывающим поступлением потока. До сих пор этот физический механизм не нашел достоверного подтверждения и остается в разряде гипотез. В этой работе мы попытаемся обнаружить и исследовать его, используя численное моделирование.

1. Методы исследования

В качестве инструмента мы использовали модель BATS-R-US [9] – одну из глобальных МГД моделей (ГМГД), находящихся в открытом доступе через сетевой ресурс Центра Моделирования НАСА [<http://ccmc.gsfc.nasa.gov>]. На текущий день ГМГД модели являются единственным численным инструментом, позволяющим моделировать всю магнитосферу целиком как открытую систему. В работе [10] было показано, что ГМГД модели достаточно хорошо воспроизводят крупномасштабную структуру и динамику магнитосферной системы. В частности, положение и форма нейтрального слоя хвоста хорошо соответствует спутниковым наблюдениям. Это дает основания полагать уместным использование ГМГД моделей для анализа динамики нейтрального слоя хвоста, индуцированной V_x компонентой ММП.

2. Результаты глобального МГД моделирования

2.1. Обнаружение и визуализация эффекта

Для обнаружения и исследования механизмов смещения нейтрального слоя хвоста магнитосферы, связанных с V_x компонентой вектора ММП, были использованы

результаты двух симуляций с противоположным направлением V_x ММП (+6 нТ и -6 нТ). Условия симуляций были выбраны таким образом, чтобы единственной возможной причиной нарушения симметрии конфигурации магнитосферы относительно экваториальной плоскости было наличие V_x компоненты ММП: направление солнечного ветра чисто радиальное ($V_y=V_z=0$); V_y компонента ММП отсутствует ($V_y=0$); момент магнитного поля Земли направлен перпендикулярно направлению потока солнечного ветра и не изменяется в течение симуляций ($\Psi=0$); а так же зафиксированы входные параметры: $V_x = -400$ км/с, $N = 5$ см⁻³, $T = 100,000$ °К. Единственный переменный параметр солнечного ветра – это V_z компонента ММП (Рис.3, верхняя панель), для исследования динамических характеристик смещения НС хвоста.

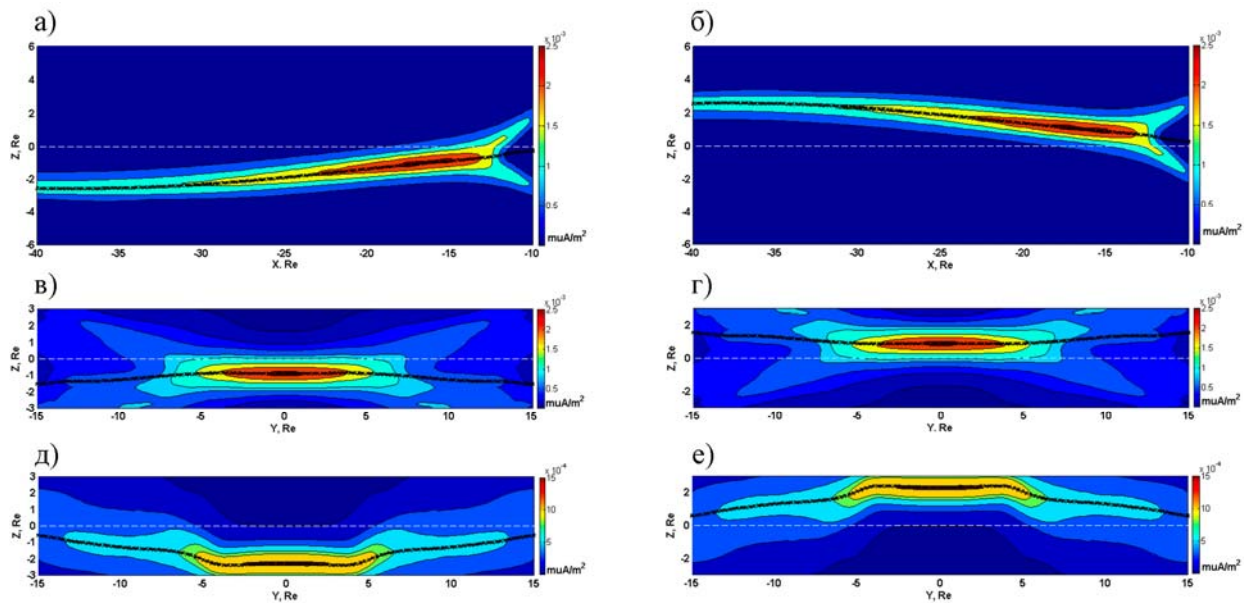


Рис. 2. Демонстрация смещения нейтрального слоя по данным ГМГД моделирования. Показаны результаты для двух симуляций в момент времени 158 мин. во время действия южной V_z ММП = -10 нТ. В левом ряду результаты симуляции для V_x ММП = +6 нТ, в правом – для V_x ММП = -6 нТ. На панелях (а) и (б) представлено сечение в плоскости XZ, (в) и (г) – сечение YZ для $X=-15 R_E$, (д) и (е) – сечение YZ для $X = -30 R_E$. Цветом показана плотность тока. Жирной черной линией – текущее положение нейтрального слоя, белой пунктирной прямой – положение НС, ожидаемое для ММП с нулевой V_x компонентой.

Положение нейтрального слоя хвоста мы определили, как поверхность, на которой происходит смена знака радиальной компоненты магнитного поля V_r . Для этого в каждой точке XY плоскости мы провели интерполирование профиля $V_r(Z)$ кубическим сплайном с последующим определением корня функции.

В результате ГМГД моделирования был обнаружен явно выраженный и довольно сильный эффект, связанный с B_x ММП. Смещение нейтрального слоя в плоскости полуночного меридиана для выполненных симуляций достигает значительной амплитуды и составляет $\Delta Z \sim 1R_E$ на расстоянии $X = -15R_E$ и $\Delta Z \sim 2.5R_E$ в дальнем хвосте на расстоянии $X = -30R_E$ (Рис. 2). Кроме того, ближе к флангам хвоста амплитуда вертикального смещения больше, чем в центральной части (Рис. 2, панели в, г), и нейтральный слой имеет параболическую форму в сечении YZ . Однако, на панелях (д) и (е) видно, что на расстоянии $X = -30R_E$ слой выгнут в обратную сторону, по сравнению с ситуацией на расстоянии $X = -15R_E$ (панели (в) и (г)). Связано это с тем, что НС еще не занял положения своего равновесия и, в представленный момент времени ($t = 158$ мин.), находится в движении. Это хорошая демонстрация одного из динамических элементов изменения геометрии НС – лидер-эффекта, заключающегося в том, что центральная часть НС хвоста быстрее реагирует на изменение условий в солнечном ветре, чем фланги [11].

2.2. Исследование механизмов смещения нейтрального слоя

Результаты глобального МГД моделирования подтверждают гипотезу, предложенную в [8]. На рисунке 3 показано, что в периоды южной ориентации ММП нейтральный слой имеет максимальное смещение (вторая панель) относительно ожидаемого положения $Z = 0$, а соответствующая разница между величинами магнитного потока в северной и южной долях достигает величины $\sim 20\%$ (третья панель). Смещение слоя происходит за счет возникающего градиента давлений между противоположными долями хвоста при перевороте ММП к югу (нижняя панель, красные затененные области) из-за разной скорости закачки магнитного потока.

Результаты численного эксперимента позволяют оценить динамические характеристики предсказанного эффекта смещения. В момент переворота B_z -компоненты ММП к югу, нейтральный слой начинает смещаться в сторону южной доли (при положительной B_x ММП) и достигает максимальной величины смещения через ~ 8 минут: $\Delta Z \sim 1R_E$ на расстоянии $X = -15R_E$ и $\Delta Z \sim 2.5R_E$ в дальнем хвосте на расстояниях $X = -30 : -40 R_E$. В это же время достигает максимума и разность магнитного потока между северной и южной долями хвоста ($\Delta F_T \sim 20\%$). Далее НС испытывает возвратное движение, при

неизменной величине ΔF_T , в стремлении занять некоторое положение равновесия. Здесь роль противодействующей силы играют магнитные натяжения Максвелла, которые уравнивают образовавшуюся разность давлений между долями. Кроме этого, как уже было упомянуто выше, НС имеет неравномерное смещение вдоль Y координаты, образуя искривленную поверхность. При этом в момент переворота B_z ММП к югу, центральная часть слоя реагирует на возмущение быстрее, чем фланги, что приводит к образованию МГД волны в токовом слое типа флэппинг-колебаний [12] с изгибной модой, распространяющейся от центра к флангам хвоста.

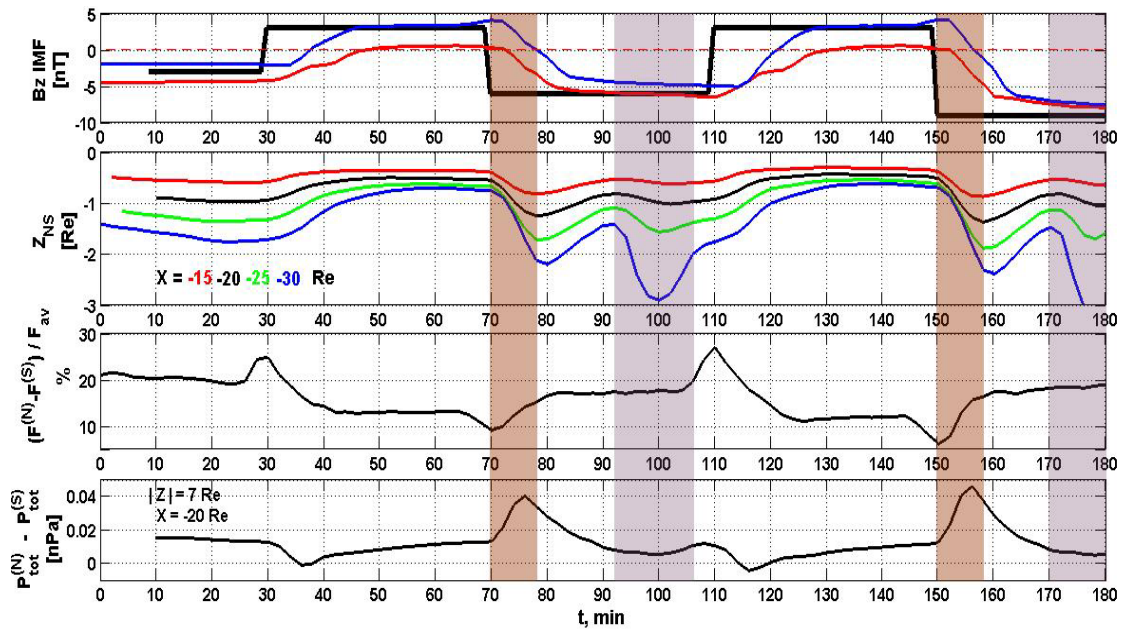


Рис. 3. Особенности динамики хвоста в присутствии B_x -компоненты ММП ($B_x = +6$ нТ). Представлены результаты симуляции Masha_Amosova_021610_1 [http://ccmc.gsfc.nasa.gov].

Верхняя панель: изменение B_z -компоненты ММП в течение симуляции: *черная жирная линия* – значения B_z ММП, перенесенные из солнечного ветра к рассматриваемому сечению ($X = -20 R_E$) со скоростью V_x ; *красная и синяя линии* – величина B_z в переходной области на расстоянии $1 R_E$ от магнитопаузы (в плоскости $Y=0$, на расстоянии $X=-20 R_E$) соответственно с северной и южной стороны хвоста.

Вторая панель: положение нейтрального слоя в плоскости $Y=0$ на различных расстояниях в хвосте ($X = -15, -20, -25, -30 R_E$, см. подпись на панели).

Третья панель: относительная разница между величинами магнитного потока в северной и южной долях хвоста на расстоянии $X = -20 R_E$.

Нижняя панель: разность величин полного давления ($P_{tot} = P_{magn} + P_{plasm}$) в долях на одинаковом расстоянии от нейтрального слоя $|Z| = 7 R_E$ в плоскости $Y=0$ и сечении хвоста $X = -20 R_E$.

Затененные области: *красные* – интервал активизации смещения нейтрального слоя при перевороте ММП к югу, *синими областями* отмечены периоды активного магнитного пересоединения в хвосте (суббуря).

Кроме того, результаты, представленные на рисунке 3, демонстрируют два дополнительных эффекта, не обсуждавшиеся ранее в литературе. Первый – это наличие смещения НС с меньшей амплитудой (порядка $0.2-0.8 R_E$ в зависимости от расстояния X) при северной ориентации ММП (интервалы $t = 30-70$ и $110-150$ мин. на Рис.3). Причиной этого смещения является несимметричная разгрузка долей хвоста за счет магнитного пересоединения за каспами. То есть этот эффект имеет ту же самую природу, что и описанный выше, но другой механизм реализации. Меньшие амплитуды смещения связаны с меньшей интенсивностью процесса пересоединения, характерной для северного направления ММП.

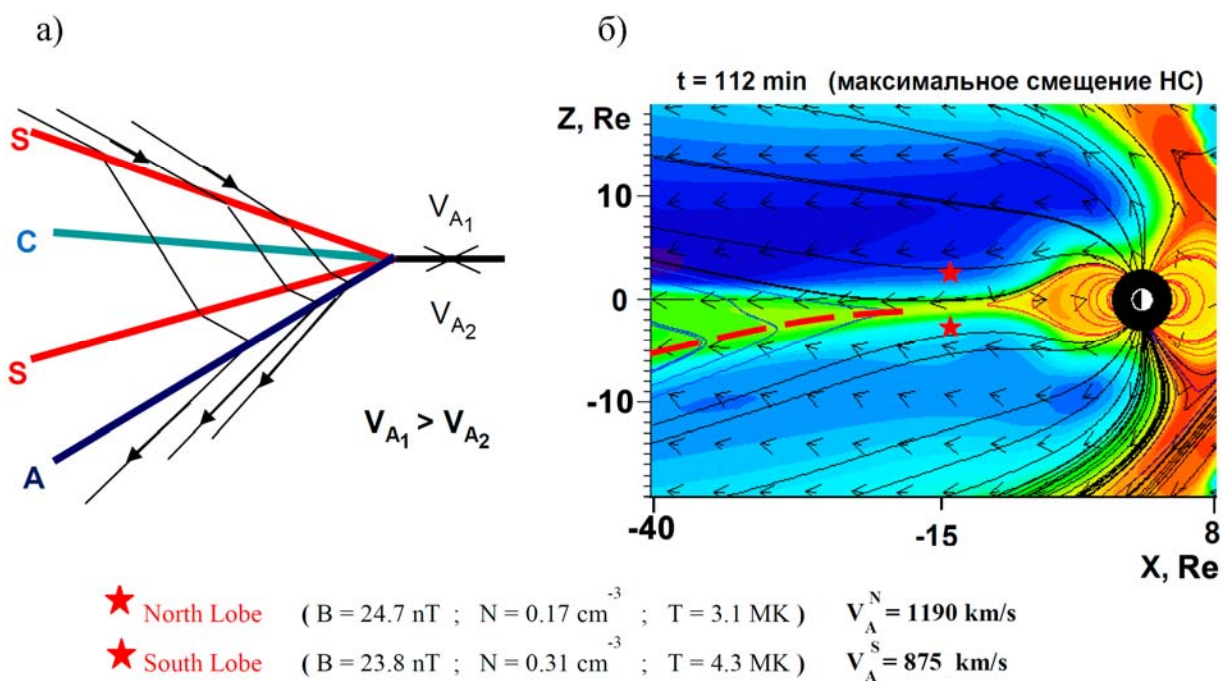


Рис. 4. Смещение нейтрального слоя хвоста в периоды взрывной фазы суббури при несимметричном, относительно плоскости нейтрального слоя, распределении магнитных и плазменных параметров.

Панель (а): схематическое изображение аналитического решения задачи Римана о распаде токового слоя для несимметричного распределения параметров: медленная ударная волна (S), контактный разрыв (C), медленная ударная волна (S), альвеновский разрыв (A). При этом альвеновский разрыв (A) является новым нейтральным слоем.

Панель (б): результаты глобального МГД моделирования – распределение параметров в плоскости центрального меридиана во время активизации магнитного пересоединения в хвосте. Цветом показана плотность тока, линиями – магнитное поле, стрелками – скорость плазмы. Красные звезды – положение виртуальных спутников в точках $X = -15 R_E$, $Y=0$, $Z = \pm 3 R_E$ от нейтрального слоя, для которых под рисунком выписаны параметры плазмы и магнитного поля.

Второй дополнительный режим смещения НС связан с активизацией пересоединения в токовом слое хвоста (взрывной фазой суббури) – интервалы $t = 90-110$ и $170-180$ минут (Рис. 3, синие затененные области). Видно, что дополнительное и значительное смещение слоя на этих интервалах происходит без изменения разности величин магнитного потока (третья панель) и полного давления (последняя панель) между долями хвоста. Этот режим смещения нейтрального слоя хвоста не имеет непосредственного отношения к механизму несимметричной загрузки хвоста магнитным потоком, однако является его следствием. Обнаруженный эффект можно объяснить в рамках теории магнитного пересоединения в токовом слое, разделяющем два полупространства с несимметрично распределенными параметрами плазмы и магнитного поля [13]. Решением задачи Римана о распаде первоначального разрыва (в результате магнитного пересоединения) с несимметричным распределением магнитных и плазменных параметров относительно плоскости разрыва, является серия вновь образованных разрывов (Рис. 4а): медленная ударная волна S, контактный разрыв C, медленная ударная волна S, альвеновский разрыв A. На образующемся альвеновском разрыве магнитное поле меняет свое направление и, следовательно, он представляет собой новый нейтральный слой. При этом теория предсказывает смещение альвеновского разрыва в процессе пересоединения в сторону меньших альвеновских скоростей, что качественно согласуется с результатами МГД моделирования (Рис. 4б).

Заключение

Эффект глобальной геометрической реконфигурации хвоста магнитосферы, и в частности смещение нейтрального слоя от номинального положения, под действием B_x компоненты межпланетного магнитного поля четко виден в результатах глобального МГД моделирования. При этом:

- 1) Механизм смещения НС в периоды южного направления ММП согласуется с предположением, высказанным в работе [8], и заключается в нарушении баланса давления поперек хвоста за счет несимметричной загрузки магнитного потока в северную и южную доли.

Обнаружено два дополнительных, ранее необсуждавшихся в литературе, режима смещения НС, так же связанных с действием B_x ММП:

- 2) Смещение слоя при северной ориентации B_z ММП, связанное с несимметричной разгрузкой хвоста за счет пересоединения за каспами.
- 3) Дополнительная независимая мода смещения НС в периоды взрывной фазы суббури. Этот процесс можно объяснить образованием нового нейтрального слоя, совпадающего с альвеновским разрывом, смещенным в полупространство с меньшим значением альвеновской скорости, в процессе магнитного пересоединения (развития суббури) с несимметричным распределением магнитных и плазменных параметров относительно плоскости первоначального токового слоя. Эта суббуревая фаза смещения НС является следствием нарушения симметрии в распределении параметров плазменного слоя за счет несимметричной загрузки хвоста магнитным потоком.

Благодарность

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-05-31380.

Литература

1. Dungey, J. W. (1961), Interplanetary magnetic fields and the auroral zones, *Phys. Rev. Lett.*, 6, P.47– 48.
2. Russell, C. T. (1972), The configuration of the magnetosphere, in *Critical Problems of Magnetospheric Physics*, edited by E. R. Dyer, p. 1, Natl. Acad. of Sci., Washington, D. C.
3. Verigin, M., G. Kotova, A. Szabo, J. Slavin, T. Gombosi, K. Kabin, F. Shugaev, and A. Kalinchenko (2001), Wind observations of the terrestrial bow shock: 3-D shape and motion, *Earth Planets Space*, 53, P.1001–1009.
4. Dušik, Š., G. Granko, J. Šafrankova, Z. Němeček, and K. Jelinek (2010), IMF cone angle control of the magnetopause location: Statistical study, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L19103, doi:10.1029/2010GL044965.
5. Holzworth R H and Meng C-I (1984), Auroral boundary variations and the interplanetary magnetic Field; *Planet. Space Sci.* 32, P.25-29.
6. Reistad, J. P., N. Østgaard, K. M. Laundal, S. Haaland, P. Tenfjord, K. Snekvik, K. Oksavik, and S. E. Milan (2014), Intensity asymmetries in the dusk sector of the poleward auroral oval due to IMF B_x , *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, P.9497–9507, doi:10.1002/2014JA020216.
7. Shue, J.-H., P. T. Newell, K. Liou, C.-I. Meng, and S. W. H. Cowley (2002), Interplanetary magnetic field B_x asymmetry effect on auroral brightness, *J. Geophys. Res.*, 107(A8), doi:10.1029/2001JA000229.
8. Cowley S.W.H. (1981), Asymmetry effects associated with the x-component of the IMF in a magnetically open magnetosphere, *Planet. Space Sci.* Vol.29, № 8, P. 809-818.
9. Tóth, G., et al. (2005), Space weather modeling framework: A new tool for the space science community, *J. Geophys. Res.*, 110, A12226, doi:10.1029/2005JA011126.
10. Gordeev, E., G. Facskó, V. Sergeev, I. Honkonen, M. Palmroth, P. Janhunen, and S. Milan (2013), Verification of the GUMICS-4 global MHD code using empirical relationships, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, P.3138–3146, doi:10.1002/jgra.50359.
11. Sergeev, V.A., N.A. Tsyganenko, and V. Angelopoulos (2008), Dynamical response of the magnetotail to changes of the solar wind direction: an MHD modeling perspective, *Annales Geophysicae*, Vol.26, Issue 8, P.395-2402.

12. Sergeev, V., A. Runov, W. Baumjohann, R. Nakamura, T. L. Zhang, A. Balogh, P. Louarn, J.-A. Sauvaud, and H. Reme (2004), Orientation and propagation of current sheet oscillations, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L05807, doi:10.1029/2003GL019346.
13. Semenov V. S., I. V. Kubyshkin, M. F. Heyn and H. K. Biernat (1983). Field-line reconnection in the two-dimensional asymmetric case. *Journal of Plasma Physics*, 30, P.321-344 doi:10.1017/S0022377800001215.

References

1. Dungey, J. W. (1961), Interplanetary magnetic fields and the auroral zones, *Phys. Rev. Lett.*, 6, P.47–48.
2. Russell, C. T. (1972), The configuration of the magnetosphere, in *Critical Problems of Magnetospheric Physics*, edited by E. R. Dyer, p. 1, Natl. Acad. of Sci., Washington, D. C.
3. Verigin, M., G. Kotova, A. Szabo, J. Slavin, T. Gombosi, K. Kabin, F. Shugaev, and A. Kalinchenko (2001), Wind observations of the terrestrial bow shock: 3-D shape and motion, *Earth Planets Space*, 53, P.1001–1009.
4. Dušik, Š., G. Granko, J. Šafrankova, Z. Němeček, and K. Jelinek (2010), IMF cone angle control of the magnetopause location: Statistical study, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L19103, doi:10.1029/2010GL044965.
5. Holzworth R H and Meng C-I (1984), Auroral boundary variations and the interplanetary magnetic Field; *Planet. Space Sci.* 32, P.25-29.
6. Reistad, J. P., N. Østgaard, K. M. Laundal, S. Haaland, P. Tenfjord, K. Snekvik, K. Oksavik, and S. E. Milan (2014), Intensity asymmetries in the dusk sector of the poleward auroral oval due to IMF B_x , *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, P.9497–9507, doi:10.1002/2014JA020216.
7. Shue, J.-H., P. T. Newell, K. Liou, C.-I. Meng, and S. W. H. Cowley (2002), Interplanetary magnetic field B_x asymmetry effect on auroral brightness, *J. Geophys. Res.*, 107(A8), doi:10.1029/2001JA000229.
8. Cowley S.W.H. (1981), Asymmetry effects associated with the x-component of the IMF in a magnetically open magnetosphere, *Planet. Space Sci.* Vol.29, № 8, P. 809-818.
9. Tóth, G., et al. (2005), Space weather modeling framework: A new tool for the space science community, *J. Geophys. Res.*, 110, A12226, doi:10.1029/2005JA011126.
10. Gordeev, E., G. Facskó, V. Sergeev, I. Honkonen, M. Palmroth, P. Janhunen, and S. Milan (2013), Verification of the GUMICS-4 global MHD code using empirical relationships, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, P.3138–3146, doi:10.1002/jgra.50359.
11. Sergeev, V.A., N.A. Tsyganenko, and V. Angelopoulos (2008), Dynamical response of the magnetotail to changes of the solar wind direction: an MHD modeling perspective, *Annales Geophysicae*, Vol.26, Issue 8, P.395-2402.
12. Sergeev, V., A. Runov, W. Baumjohann, R. Nakamura, T. L. Zhang, A. Balogh, P. Louarn, J.-A. Sauvaud, and H. Reme (2004), Orientation and propagation of current sheet oscillations, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L05807, doi:10.1029/2003GL019346.
13. Semenov V. S., I. V. Kubyshkin, M. F. Heyn and H. K. Biernat (1983). Field-line reconnection in the two-dimensional asymmetric case. *Journal of Plasma Physics*, 30, P.321-344 doi:10.1017/S0022377800001215.

Рекомендуемая ссылка на статью:

Гордеев Е.И., Сергеев В.А., Амосова М.В., Андреева В.А. Влияние радиальной компоненты межпланетного магнитного поля на положение нейтрального слоя хвоста магнитосферы Земли // Геофизические методы исследования Земли и ее недр. 2016. С. 11–21. DOI: 10.13140/RG.2.1.4821.6565

How to cite:

Gordeev, E.I., Sergeev, V.A., Amosova, M.V., Andreeva V.A. Influence of interplanetary magnetic field radial component on the position of the Earth's magnetotail neutral sheet, *Geophysical methods of survey the Earth and its subsoil*, 2016, 11–21. DOI: 10.13140/RG.2.1.4821.6565