

Моделирование магнитосферно-ионосферной конвекции с использованием открытой модели магнитосферы, сравнение с данными наблюдений

М.А. Волков^{1,2}, Н.Ю. Романова²

¹ Политехнический факультет МГТУ, кафедра физики

² Полярный геофизический институт

Аннотация. Выполнены расчеты магнитосферно-ионосферной конвекции для открытой модели магнитосферы с эллипсоидальной формой магнитопаузы и однородного межпланетного магнитного поля (IMF), проникающего в магнитосферу Земли. В качестве открытой модели магнитосферы использовалась модель Tsyanenko 96. Модельные расчеты сопоставлялись с данными ионных дрейфов в ионосфере. Расчеты правильно воспроизводят горловину в картине конвекции на дневной стороне, направление конвекции в полярной шапке в зависимости от знака компоненты IMF B_y и конвекцию в полуночном секторе ионосферы. В то же время модельные расчеты предсказывают положение фокусов конвекции для $B_y < 0$ в более поздних часах, чем дают результаты наблюдений, примерно на 3 часа, а для $B_y > 0$ – в более ранних часах. В работе делается вывод о невозможности объяснить эти особенности конвекции в рамках данной модели магнитосферы.

Abstract. The simulation of the magnetosphere-ionosphere convection has been produced using the open magnetospheric model with the ellipsoidal form of the magnetopause for the homogeneous interplanetary magnetic field (IMF), penetrating into the Earth magnetosphere. The open magnetospheric model Tsyanenko 96 has been used. The modelling calculations have been compared with the ionospheric ion drift data. The calculations correctly reproduce a "throat" in the convection pattern in the dayside ionosphere, the convection direction depending from the sign of the IMF component B_y in the polar cap and convection near midnight. However, the modelling calculations predict the location of the convective focuses in more late hours for $B_y < 0$ then the experimental data and in more early hours for $B_y > 0$. The conclusion has been made that it is impossible to explain these features of the convection by the magnetospheric model Tsyanenko 96.

1. Введение

Хорошая корреляция между величиной и направлением IMF и разностью электрического потенциала поперек полярной шапки свидетельствует об определяющем значении IMF в генерации электрических полей магнитосферно-ионосферной конвекции. Источником магнитосферно-ионосферной конвекции может быть индукционное электрическое поле солнечного ветра, которое проникает вдоль магнитных силовых линий в магнитосферу и ионосферу Земли. Часть магнитных силовых линий Земли в этом случае связана с IMF, т.е. эти магнитные силовые линии являются разомкнутыми. Такая модель магнитосферы получила название открытой. В работе (Stern, 1973) рассчитана конвекция в полярной шапке для магнитного поля, представляющего собой сумму магнитного поля земного диполя и однородного IMF. Даже в рамках такой упрощенной модели магнитосферы получена зависимость конвекции в полярной шапке от компонент IMF. В работе (Toffoletto, Hill, 1993) для более реалистичной модели магнитосферы удалось воспроизвести горловину, наблюдаемую в картине конвекции на дневной стороне. В настоящей работе продолжено моделирование конвекции в полярной шапке с использованием открытой модели магнитосферы, в частности, модели Tsyanenko 96 (Tsyanenko, Stern, 1996). В отличие от упомянутых выше работ, рассчитывается конвекция как на разомкнутых магнитных силовых линиях в полярной шапке, так и на замкнутых. Результаты модельных расчетов сопоставляются с экспериментальными данными, и делается вывод о применимости данной модели магнитосферы к описанию магнитосферно-ионосферной конвекции.

2. Описание модели

При моделировании конвекции использована открытая модель магнитосферы Tsyanenko 96. В этой модели учитывается влияние на дипольное магнитное поле Земли кольцевого тока, токов хвоста магнитосферы, магнитного поля IMF и экранирующих токов, текущих по магнитопаузе. Граница магнитопаузы задается в виде эллипсоида, параметры которого определяются из экспериментальных данных. Вне магнитосферы магнитное поле IMF считается однородным. Согласно экспериментальным

данным, лишь небольшая часть IMF должна проникать в магнитосферу Земли. В данных расчетах коэффициент ослабления IMF принимался равным $k = 0.1$. При этом значении удается получить согласие между расчетными данными разности потенциалов поперек полярной шапки и наблюдаемыми в экспериментах. Считая скорость солнечного ветра v_{sw} всюду однородной, выражение для электрического потенциала солнечного ветра ϕ на поверхности магнитосферы в геоцентрической солнечно-эклиптической системе координат будет иметь вид:

$$\phi = k(v_{sw}B_{zsw}y - v_{sw}B_{ysw}z),$$

где B_{zsw} , B_{ysw} – компоненты межпланетного магнитного поля, ось x направлена к Солнцу, ось z направлена вверх в северном полушарии перпендикулярно плоскости эклиптики.

Вне полярных шапок, где магнитные силовые линии замкнуты, электрический потенциал может быть найден из решения уравнения непрерывности для тока в ионосфере. Ионосферные токи состоят из поперечных токов Педерсена и Холла и продольного тока, текущего вдоль магнитной силовой линии. Проинтегрированное вдоль магнитной силовой линии уравнение непрерывности имеет следующий вид:

$$\text{div}(\Sigma \text{grad } \phi) = -j,$$

где Σ – тензор интегральной ионосферной проводимости, j – плотность тока, текущего вдоль магнитной силовой линии в ионосфере, ток, вытекающий из ионосферы, принимается положительным.

В работе используется эмпирическая модель ионосферной проводимости Σ (Hardy et al., 1987), тогда как ток j рассчитывается. Токи j , втекающие и вытекающие из ионосферы на замкнутых магнитных силовых линиях, связаны с поляризацией плазменного слоя. Для расчетов этих токов используется гидродинамическая модель плазменного слоя (Волков, Намгаладзе, 2001). Входными параметрами модели плазменного слоя являются распределение электрического потенциала, концентрации и давления магнитосферной плазмы на границе полярной шапки. В модельных расчетах концентрация и давление плазмы на границе полярной шапки считались всюду одинаковыми и равными 3 см^{-3} и 0.2 нПа , соответственно. Магнитные силовые линии принимаются эквипотенциальными, давление вдоль силовой линии – постоянным и изотропным, а движение магнитосферной плазмы описывается движением трубок плазмы, вытянутых вдоль магнитных силовых линий (Волков, Намгаладзе, 2001).

3. Результаты моделирования

Модельные расчеты электрического потенциала проводились для случаев, когда $B_z < 0$, а $B_y > 0$ или $B_y < 0$. В ионосфере плазма дрейфует практически вдоль линий равного потенциала, поэтому расчеты сопоставлялись с результатами измерений ионного дрейфа в ионосфере по данным наблюдений радаров SuperDarn. На рисунке показаны распределения модельного электрического потенциала и скоростей ионного дрейфа, наблюдаемых во время 19:30-19:32 UT (12.12.2001) (рис. 1а) и 05:20-05:22 UT (10.10.2001) (рис. 1б). В случае рис. 1а $B_y = -4.3 \text{ нТ}$, $B_z = -4.3 \text{ нТ}$, в случае рис. 1б $B_y = 4.3 \text{ нТ}$, $B_z = -2.5 \text{ нТ}$.

Модельные расчеты воспроизводят горловину в картине конвекции на дневной стороне, дают правильное направление конвекции внутри полярной шапки в зависимости от знака компоненты IMF B_y и хорошее согласие между расчетными данными и наблюдаемыми скоростями дрейфа в полуденном секторе ионосферы. В то же время имеются расхождения между расчетными и экспериментальными данными в положении горловины и фокусов конвекции. Для случая $B_y < 0$ (рис. 1а) фокусы вечернего и утреннего вихрей конвекции лежат в более ранних часах, чем предсказывает моделирование. Для $B_y > 0$ (рис. 1б) ситуация обратная. Согласно расчетам, распределения потенциала при $B_y > 0$ и $B_y < 0$, как это видно на рис. 1а, б, являются зеркально симметричными относительно полуночно-полуденного меридиана, что вполне объяснимо в рамках модели магнитосферы, обладающей такой же зеркальной симметрией относительно плоскости x, z . Однако данные наблюдений ионных дрейфов не подтверждают такое свойство конвекции. Отклонение оси Земного магнитного диполя от оси z приведет к некоторой асимметрии магнитосферы, но для рассмотренных выше случаев, когда компонента B_y приблизительно равна или больше компоненты B_z , этот эффект становится несущественным. Таким образом, хотя в рамках данной модели магнитосферы удастся объяснить ряд важных особенностей в поведении конвекции внутри полярной шапки, остается некоторое несоответствие между расчетными и наблюдаемыми данными. На наш взгляд, это связано с неточностью модели магнитосферы и поля пересоединения.

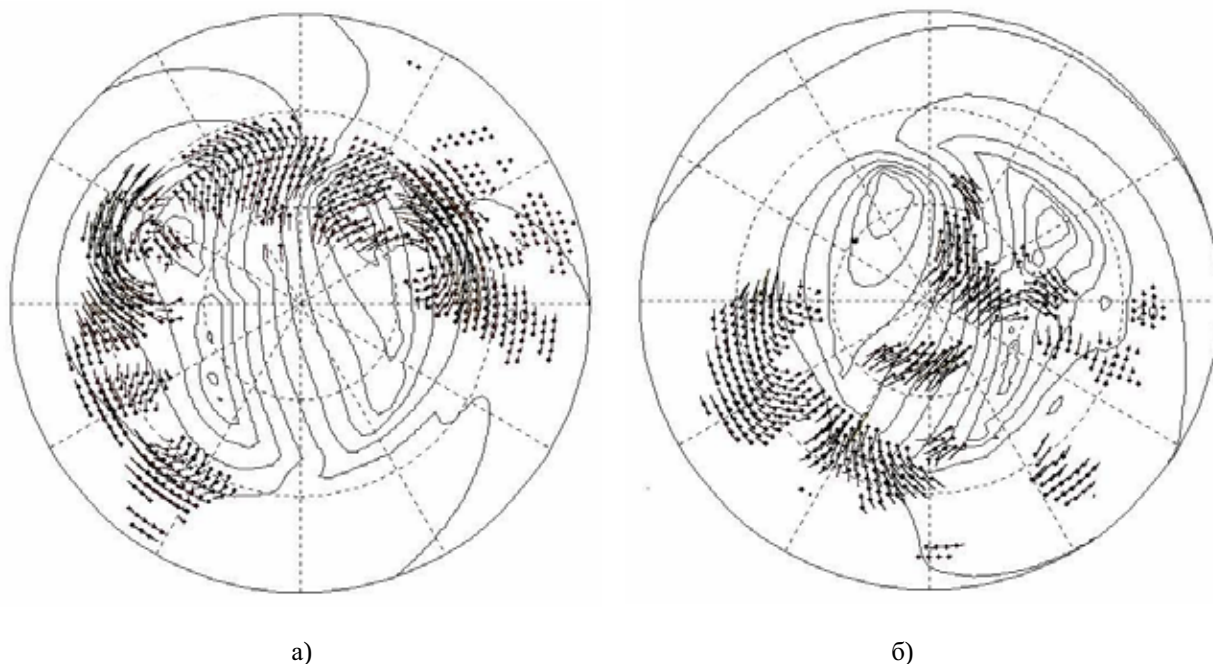


Рис. 1. Распределение модельного электрического потенциала и скоростей ионного дрейфа по данным наблюдений радаром SuperDarn, $B_y = -4.3$ нТ (рис. 1а), $B_z = -4.3$ нТ, $B_y = 4.3$ нТ, $B_z = -2.5$ нТ (рис. 1б). Линии равного потенциала проведены через 6.2 кВ. Скорости дрейфа изображены стрелками, начало стрелки отмечено точкой. Полдень находится вверху, полночь внизу.

4. Выводы

Выполнены расчеты магнитосферно-ионосферной конвекции для открытой модели магнитосферы и однородного IMF, проникающего в магнитосферу Земли (Tsyganenko 96).

Модельные расчеты правильно воспроизводят ряд важных особенностей в картине конвекции на дневной стороне, а именно, формирование горловины в картине конвекции, зависимость направления конвекции в полярной шапке от знака компоненты B_y . В полуночном секторе ионосферы модельные расчеты также хорошо согласуются с результатами наблюдений, в частности, в области разрыва Харанга.

Согласно модельным расчетам при $B_y > 0$ и $B_y < 0$ картины конвекции являются зеркально симметричными относительно полуночно-дневного меридиана, что не согласуется с результатами наблюдений. Не совпадают также расчетные и полученные из наблюдений положения фокусов конвекции. Модельные расчеты предсказывают положение фокусов конвекции для $B_y < 0$ в более поздних часах, чем дают результаты наблюдений, примерно на 3 часа, а для $B_y > 0$ – в более ранних часах. Эти расхождения между расчетом и экспериментом, на наш взгляд, обусловлены неточностью используемой модели магнитосферы и поля пересоединения.

Литература

- Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., Mc-Neil W.J. Statistical and functional representations of the pattern of auroral energy flux, and conductivity. *J.Geophys.Res.*, v.92, N A11, p.12275, 1987.
- Stern D.P. A study of electric field in an open magnetospheric model. *J.Geophys.Res.*, v.78, p.7292-7305, 1973.
- Toffoletto F.R., Hill T.W. A nonsingular model of the open magnetosphere. *J.Geophys.Res.*, v.98, p.1339-1344, 1993.
- Tsyganenko N.A., Stern D.P. Modelling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current systems. *J.Geophys.Res.*, v.101, p.27187-27198, 1996.
- Волков М.А., Намгаладзе А.А. Влияние электрического поля магнитосферной конвекции на формирование продольных токов взрывной фазы суббури. *Геомагнетизм и аэрономия*, т. 41, с.33-38, 2001.