

УДК 550.385.4 : 551.510.535/.537

## Роль вытянутых в хвост магнитосферы магнитных силовых линий в усилении конвекции в области разрыва Харанга

М.А. Волков

Политехнический факультет МГТУ, кафедра физики

**Аннотация.** Рассмотрены процессы формирования электрических полей и токов в разрыве Харанга во время подготовительной фазы суббури. Разделение зарядов в этой области происходит из-за различия в дрейфах электронов и протонов в неоднородном магнитном поле Земли. Вследствие этого градиенты давления плазмы и магнитного поля (или объема магнитных силовых трубок) становятся неколлинеарными, возникают токи вдоль магнитных силовых линий. В рамках заданного распределения давления в магнитосфере выполнены расчеты токов и электрических полей для модели магнитосферы с вытянутыми в хвост магнитными силовыми линиями и для дипольной модели магнитного поля. Показано, что вытягивание магнитных силовых линий в хвост приводит к усилению конвекции и токов в разрыве Харанга, что позволяет объяснить результаты наблюдений токов и полей в этой области во время подготовительной фазы суббури.

**Abstract.** The formation of the electric fields and currents in the Harang discontinuity during the substorm growth phase has been considered. The charge separation in this region of the magnetosphere is the result of various protons and electrons drift in the inhomogeneous magnetic field. As a consequence, the gradients of the plasma pressure and the magnetic field (or the volume of magnetic flux tubes) are no collinear and the field-aligned currents appear. Calculations of the electric fields and currents for the model of the magnetosphere with the tailward magnetic field lines and for the dipole magnetic field model have been performed for the plasma pressure distribution model. It has been shown that stretching of the magnetic field lines in the tail leads to the increasing convection and currents in the Harang discontinuity, it can explain the observations of the currents and the electric fields in this region during the substorm growth phase.

**Ключевые слова:** магнитосфера, суббури, продольные токи

**Key words:** magnetosphere, substorm, field-aligned currents

### 1. Введение

В работе рассматривается влияние вытянутых в хвост магнитных силовых линий на формирование электрического поля и токов в области разрыва Харанга. В ряде работ формирование токовой системы и электрического поля конвекции в области разрыва Харанга связывают с размытой внутренней границей плазменного слоя (Волков и др., 1985; Atkinson, 1986). Уменьшение интегрального содержания заряженных частиц в магнитных силовых трубках по направлению к Земле приводит к появлению вытекающего из ионосферы тока в результате магнитосферно-ионосферной конвекции. Интенсивность продольного тока в этих работах рассчитывалась из уравнения непрерывности для холодных магнитосферных электронов, проинтегрированного вдоль магнитной силовой линии в стационарных условиях. Вытекающий из ионосферы ток в этой области приводит к схождению векторов электрического поля конвекции, поле направлено к экватору на приполюсной границе разрыва и к полюсу – на экваториальной границе. В результате линии конвекции (или линии равного электрического потенциала) в полуночном секторе вытягиваются на восток и принимают форму "языка". Особенно это ярко проявляется в период суббури, во время подготовительной фазы суббури (Hughes, Bristow, 2003), когда магнитные силовые линии ещё больше вытягиваются в хвост магнитосферы. В результате этого вытягивания увеличиваются как объем магнитных силовых трубок, так и радиальный градиент изменения их объема. В работе рассчитывается эффект от вытягивания магнитных силовых линий в хвост в усилении конвекции и тока в области разрыва Харанга.

### 2. Описание модели

Исследовать влияние магнитного поля на токи и электрические поля в области разрыва Харанга будем используя формулу для продольного тока  $j$  Василюнуса-Тверского (Vasyliunas, 1970; Тверской, 1982):

$$j = (e_z[\nabla V \times \nabla p]), \quad (1)$$

где  $\mathbf{e}_z$  – единичный вектор, направленный вдоль магнитного поля;  $V = \int dl/B$  – объем магнитной силовой трубки с единичным магнитным потоком, интегрирование проводится от ионосферы до экваториальной плоскости в магнитосфере;  $p$  – плазменное давление.

В формулу (1) входит градиент объема магнитной силовой трубки, который для заданной модели магнитного поля можно рассчитать. При вытягивании магнитных силовых линий в хвост увеличиваются объемы магнитных силовых трубок и их радиальные градиенты в полуночном секторе магнитосферы. Однако этого не достаточно для появления или усиления токов согласно формуле (1). Это возможно только при наличии азимутальных или долготных градиентов плазменного давления, направленных с утренней на вечернюю сторону магнитосферы (с востока на запад) (Erickson et al., 1991). В этом случае в распределении плазменного давления в магнитосфере должен быть максимум. Действительно, по результатам измерений такой максимум обнаруживается в предполуночных часах во время предварительной фазы суббури (Wing et al., 2007), предсказывается существование такого максимума и результатами численного моделирования (Erickson et al., 1991; Volkov et al., 1998). В работе распределение плазменного давления в магнитосфере задавалось модельно с учетом существования такого максимума.

На рис. 1 показаны линии равного плазменного давления в проекцию на ионосферу в полярной системе координат, центр которой совпадает с магнитным полюсом Земли. Величины давлений приведены в нПа, изолинии давлений проведены через 0.4 нПа. Максимум давления лежит в предполуночном секторе при 21 MLT. Смещение максимума давления к вечерним часам можно объяснить следующим образом: плазма (горячие ионы), которая инжектируется из хвоста магнитосферы по направлению к Земле, за счет градиентного дрейфа смещается к западу, в результате этого инжектируемое плазменное облако приближается к Земле уже в вечерние часы.

Магнитное поле задавалось модельно, для модели с вытянутыми в хвост магнитными силовыми линиями использовалась эмпирическая модель магнитосферы Цыганенко 96 (Tsyganenko, 1995), в другом случае использовалась модель дипольного магнитного поля Земли. Возникает вопрос, будут ли модели магнитного поля и давления согласованы друг с другом, т.е. будет ли выполняться условие баланса давлений. Ответ: скорее нет. Даже в случае численного моделирования (Erickson et al., 1991; Volkov et al., 1998) полученное давление не согласуется с магнитным полем, поскольку в формулу (1) входит не магнитное поле, а интегральная величина – объем магнитной силовой трубки, который может быть одинаковым при разных конфигурациях магнитного поля. Вместо уравнения (1) можно использовать уравнение непрерывности, но его также придется интегрировать вдоль магнитной силовой линии. Как мы видим, эта задача ещё далека от решения.

С другой стороны, для решения нашей задачи нужно знать не магнитное поле, а объемы магнитных силовых трубок, которые можно согласовать с моделью плазменного давления с помощью формулы (1).

Электрический потенциал в области разрыва рассчитывался из уравнения непрерывности для ионосферного тока, пренебрегая движением нейтрального газа:

$$j = -\text{div} \Sigma \nabla \varphi, \quad (2)$$

где  $\Sigma = \Sigma_p + [\mathbf{e}_z \Sigma_h]$ ,  $\Sigma_p$  – интегральная ионосферная проводимость Педерсена и Холла,  $\varphi$  – электрический потенциал ионосферы. Интегральная ионосферная проводимость задавалась модельно.

Электрическое поле магнитосферной конвекции задавалось однородным внутри полярной шапки.

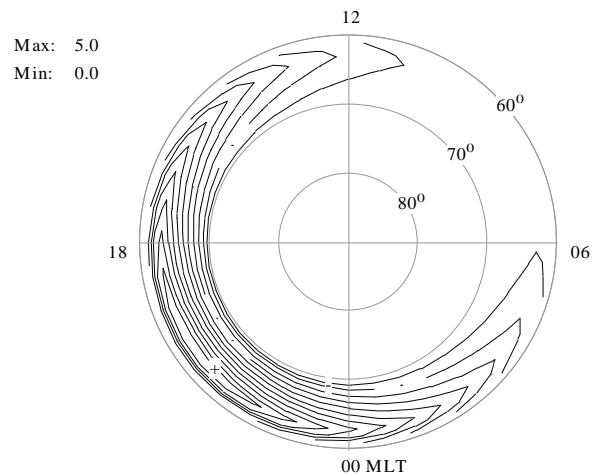


Рис. 1. Модельное распределение плазменного давления в магнитосфере в проекции на ионосферный уровень. Знаком "+" отмечен максимум давления, принятый равным 5 нПа

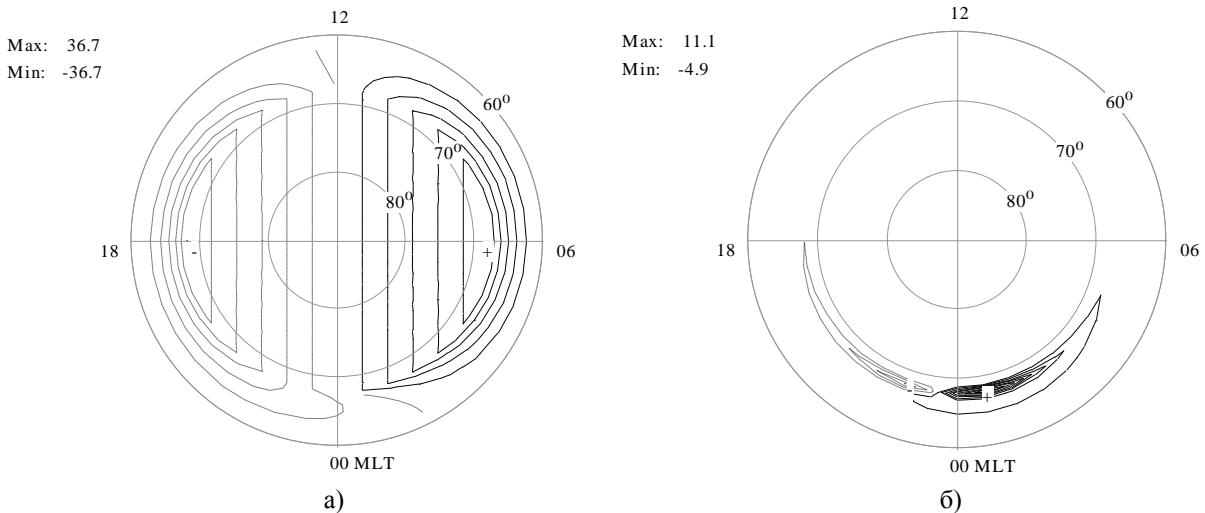


Рис. 2. Распределение электрического потенциала (а) (линий магнитосферно-ионосферной конвекции) в полярной шапке и авроральной зоне и продольных токов (б), втекающих "-" и вытекающих "+" из ионосферы, рассчитанных с использованием модели магнитосферы Цыганенко 96

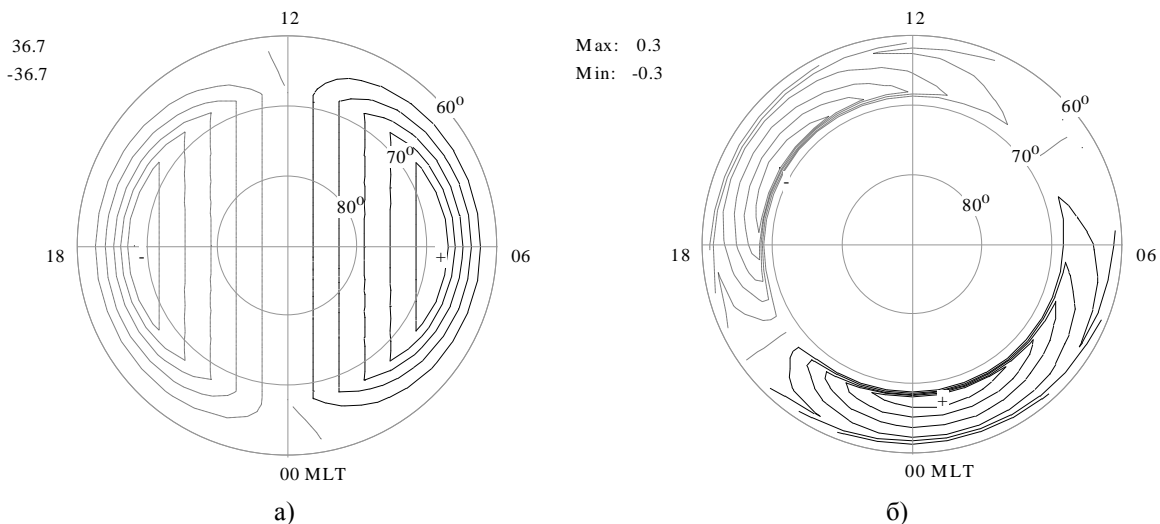


Рис. 3. Распределение электрического потенциала (а) (линий магнитосферно-ионосферной конвекции) в полярной шапке и авроральной зоне и продольных токов (б), втекающих "-" и вытекающих "+" из ионосферы, рассчитанных с использованием дипольной модели магнитосферы

### 3. Результаты расчетов

Численные решения системы уравнений (1-2) в случае однородной конвекции в полярной шапке представлены на рис. 2а, б и рис. 3а, б. Электрическое поле в полярной шапке задавалось равным 15 В/км. Проводимость ионосферы задавалась однородной и равной 5 См. Это значение соответствует умеренно возмущенным условиям. При меньших значениях проводимости электрические поля в области разрыва Харанга возрастают более значительно. На рис. 2 представлены расчеты потенциала (а) в кВ и продольных токов (б) в А/км<sup>2</sup>, выполненные для магнитного поля по модели Цыганенко 96 (Tsyanenko, 1995). В ночном секторе в авроральной области конвекция имеет форму "языка", вытянутого к востоку. Данная особенность в конвекции является типичной для разрыва Харанга, рис. 2а. В этой же области текут интенсивные продольные токи, направленные из ионосферы. Величина токов достигает 10 А/км<sup>2</sup>, рис. 2б. На рис. 3 представлены те же расчеты в случае дипольного магнитного поля. Типичного для разрыва Харанга поведения конвекции в полуночном секторе в этом случае нет. Величины продольных токов значительно меньше. Знаком "+" на рис. 2б, 3б показан вытекающий из ионосферы ток, знаком "-" – втекающий. Максимальные значения этих величин приведены в левом верхнем углу каждого из рисунков, потенциал измеряется в кВ, ток – в А/км<sup>2</sup>.

#### 4. Заключение

В работе рассмотрено влияние конфигурации магнитного поля на токи и конвекцию в разрыве Харанга. Это влияние происходит через азимутальный градиент плазменного давления. Существует ли этот градиент всегда или нет, результаты наблюдений однозначного ответа не дают. Согласно результатам работы (Xing *et al.*, 2011), он формируется именно во время подготовительной фазы суббури в предполуночном секторе магнитосферы, тогда как согласно работе (Wing *et al.*, 2007), он сохраняется и после суббури.

Таким образом, в работе показано, что вытягивание в хвост магнитных силовых линий играет заметную роль в формировании токов и электрических полей в области разрыва Харанга. Наибольшее вытягивание магнитных линий в хвост происходит во время подготовительной фазы суббури. Как показывают наблюдения (Bristow *et al.*, 2001; Hughes, Bristow, 2003), именно во время суббури разрыв Харанга наиболее заметен.

Автор выражает благодарность рецензенту проф. А.А. Намгаладзе за важные замечания к работе, учтенные автором.

#### Литература

- Atkinson G.A. Theoretical model of convection with distributed Birkeland currents. *J. Geophys. Res.*, v. 91, N A5, p.5831-5838, 1986.
- Bristow W.A., Otto A., Lummerzheim D. Substorm convection patterns observed by the Super Dual Auroral Radar Network. *J. Geophys. Res.*, v. 106, p.24593, 2001.
- Erickson G.M., Spiro R.W., Wolf R.A. The physics of the Harang discontinuity. *J. Geophys. Res.*, v. 96(A2), p.1633-1645, 1991. doi:10.1029/90JA02344.
- Hughes J.M., Bristow W.A. SuperDARN observations of the Harang discontinuity during steady magnetospheric convection. *J. Geophys. Res.*, v. 108, p.1185, 2003. doi:10.1029/2002JA009681.
- Tsyganenko N.A. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause. *J. Geophys. Res.*, v. 100, p.5599-5612, 1995.
- Vasyliunas V.M. Mathematical models of magnetospheric convection and its coupling to the ionosphere, in particles and fields in the magnetosphere. Ed. B.M. McCormac. D. Reidel, Norwell, Mass., p.60-71, 1970.
- Volkov M.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.A. MHD-magnetospheric block for the global numerical model of the Earth's upper atmosphere. *Вестник МГТУ*, т. 1, № 2, с.23-85, 1998.
- Wing S., Gjerloev J.W., Johnson J.R., Hoffman R.A. Substorm plasma sheet ion pressure profiles. *Geophys. Res. Lett.*, v. 34, N L16110, 2007. doi:10.1029/2007GL030453.
- Xing X., Lyons L.R., Nishimura Y., Angelopoulos V., Donovan E., Spanswick E., Liang J., Larson D., Carlson C., Auster U. Near-Earth plasma sheet azimuthal pressure gradient and associated auroral development soon before substorm onset. *J. Geophys. Res.*, v. 116, N A07204, 2011. doi:10.1029/2011JA016539.
- Волков М.А., Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. О структуре полей и продольных токов в разрыве Харанга. *Геомагнетизм и аэронавигация*, т. 25, с.445, 1985.
- Тверской Б.А. О продольных токах в магнитосфере. *Геомагнетизм и аэронавигация*, т. 22, № 6, с.991-995, 1982.