

ВЛИЯНИЕ ВЫТЯНУТЫХ В ХВОСТ МАГНИТНЫХ ЛИНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ТОКОВ В РАЗРЫВЕ ХАРАНГА

М.А. Волков (*Murmansk State Technical University, 13 Sportivnaya Str., Murmansk, 183010, e-mail: volkovma@mstu.edu.ru*)

Abstract. This work is focused on the formation of the electric fields and currents in the Harang discontinuity. The charge separation in this region of the magnetosphere is the result of various protons and electrons drift in the inhomogeneous magnetic field. Within the research the magnetic field model with the tailward magnetic fields lines has been used. In the magnetosphere model the hot ions have velocity component directed away from Earth to the evening sector of the magnetosphere at the distance of ~10 Re. As the result, the negative charge, electric fields and currents have been appearing in this region with the typical distribution of these electric fields and currents for the Harang discontinuity.

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 М. 1985, Atkinson G 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. При этом предполагается, что ток в основном переносится электронами, а его интенсивность определяется из уравнения непрерывности для холодных магнитосферных электронов, проинтегрированного вдоль замкнутой магнитной силовой линии в стационарном случае. Для этого характерное время рассматриваемых процессов должно быть больше времени движения ионов вокруг Земли за счет градиентного дрейфа, что составляет несколько часов (при энергии ионов в 10 кэВ - 6 часов для $L=10$). Вытекающий из ионосферы ток в этой области приводит к дивергенции 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 во время суббуревой активности, во время подготовительной фазы суббури [J. M. Hughes, W. A. Bristow 2003], когда магнитные силовые линии ещё больше вытягиваются в хвост магнитосферы. В результате этого вытягивания увеличивается как объем магнитных силовых трубок, так и радиальный градиент изменения их объема. В работе рассмотрено как это влияет на токи в области разрыва Харанга.

Описание модели

Безусловно, магнитное поле и его градиенты влияют на формирование этого тока. Даже в рамках упомянутой выше стационарной модели от магнитного поля зависит интегральное содержание частиц в магнитной силовой трубке, что напрямую связано с интенсивностью вытекающего из ионосферы тока в этой области. Когда время рассматриваемых процессов составляет 1-2 часа более корректно пользоваться формулой для плотности продольного тока j Василунуса-Тверского:

$$j = (\vec{e}_z [\nabla V \times \nabla p]) , \quad (1)$$

где $\vec{e}_z$ -единичный вектор, направленный вдоль магнитного поля, $V = \int_{z_0}^l \frac{dl}{B}$ -объем магнитной силовой

трубки с единичным магнитным потоком, интегрирование проводится от ионосферы z_0 до экваториальной плоскости в магнитосфере, p - плазменное давление в магнитосфере.

Формула (1) показывает, что вытянутые в хвост магнитные силовые линии, приводящие к значительному увеличению объемов магнитных силовых трубок, существенно влияют на интенсивность токов, текущих в этой области. Следует также сказать, что это возможно только при наличии долготных градиентов плазменного давления, направленных с утренней на вечернюю сторону магнитосферы (с востока на запад) [Erickson G.1991]. В работе распределение плазменного давления в магнитосфере задавалось модельно. На рис. 1 показаны линии равного плазменного давления в проекции на ионосферу в полярной системе координат, центр которой совпадает с магнитным полюсом Земли. Величины давлений приведены в nPa , изолинии давлений проведены через $0.4 nPa$. 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 в предполуночном секторе. Расчеты распределения электрического потенциала и продольных токов выполнены для дипольного магнитного поля и магнитного поля с вытянутыми в хвост магнитными силовыми линиями. В последнем случае использовалась модель магнитного поля Цыганенко 96. Продольные токи рассчитывались по формуле (1), а электрический потенциал определялся из уравнения непрерывности для ионосферного тока:

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

где $\hat{\Sigma} = \Sigma_p + [\vec{e}_z \times \Sigma_h]$, $\Sigma_{p,h}$ – интегральная ионосферная проводимости Педерсена и Холла, φ – электрический потенциал ионосферы. Интегральная ионосферная проводимость задавалась модельно.

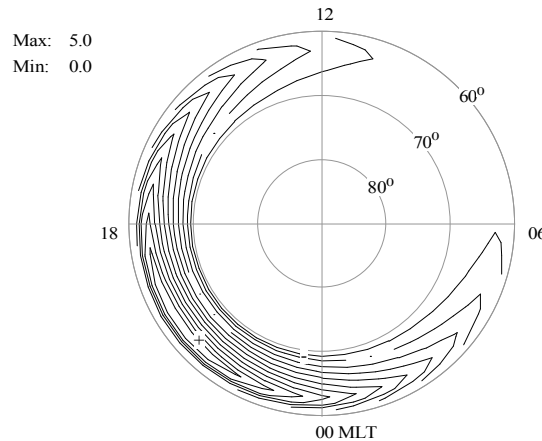


Рис. 1 Модельное распределение плазменного давления в магнитосфере в проекции на ионосферный уровень, максимальное значение давления отмечено знаком (+) и принято равным 5 нПа.

Результаты расчетов

Численные решения системы уравнений (1-2) в случае однородной конвекции в полярной шапке представлены на рис.2 (а,б) и рис.3 (а,б). На рис.2 представлены расчеты потенциала (а) в кВ и продольных токов (б) в А/км², выполненные для магнитного поля по модели Цыганенко 96 [Tsyganenko N. 1995]. Хорошо видно, что линии равного электрического потенциала вытянуты на восток в полуночном секторе, в

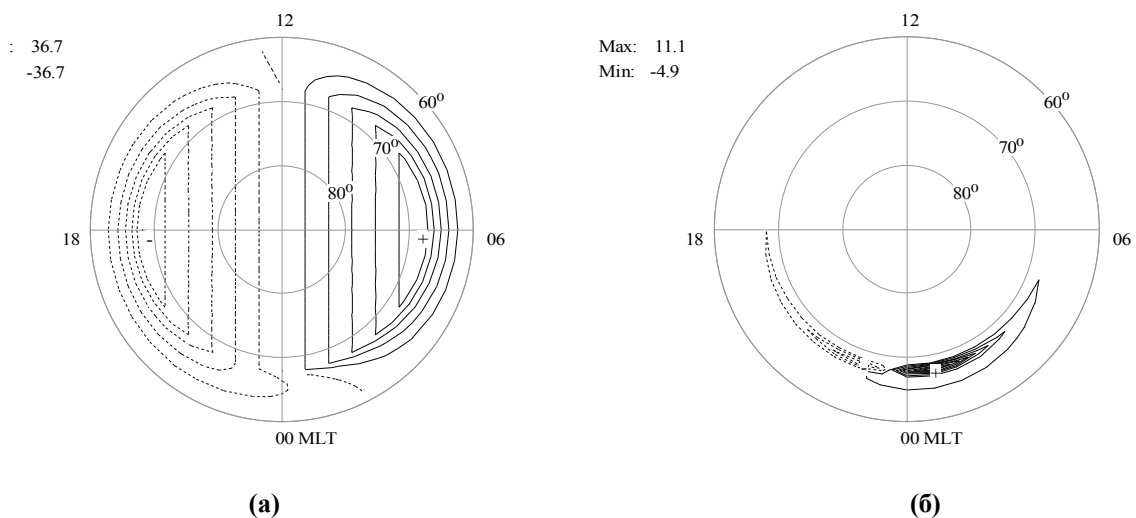


Рис. 2 Распределение электрического потенциала (а) (линий магнитосферно-ионосферной конвекции) в полярной шапке и авроральной зоне и продольных токов (б) втекающих (-) и вытекающих (+) из ионосферы, рассчитанных с использованием модели магнитосферы Цыганенко 96. Максимальные значения этих величин приведены в левом верхнем углу каждого из рисунков, потенциал измеряется в кВ, ток в А/км².

этом же секторе текут токи, направленные из ионосферы. На рис.3 представлены те же расчеты в случае дипольного магнитного поля. Типичного для разрыва Харанга распределения электрического потенциала и токов в этом случае практически нет, интенсивность токов в полуночном секторе заметно меньше чем в случае с вытянутыми в хвост магнитными силовыми линиями. Знаком "+" на рис.2(б), 3(б) показан вытекающий из ионосферы ток, знаком "-" – втекающий.

Выводы

Таким образом, в работе показано, что вытягивание в хвост магнитных силовых линии 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 [J. M. Hughes, W. A. Bristow 2003], именно во время суббури разрыв Харанга наиболее заметен.

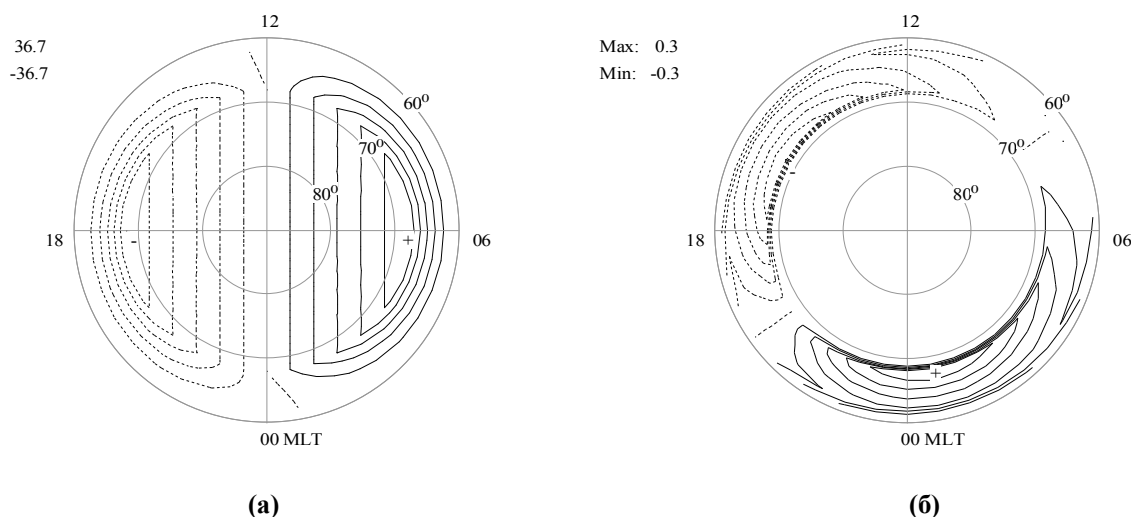


Рис. 3 Распределение электрического потенциала (а) (линий магнитосферно-ионосферной конвекции) в полярной шапке и авроральной зоне и продольных токов (б) втекающих (-) и вытекающих (+) из ионосферы, рассчитанных с использованием дипольной модели магнитосферы. Максимальные значения этих величин приведены в левом верхнем углу каждого из рисунков, потенциал измеряется в κB , ток в $A/\kappa m^2$.

Список литературы

- Волков М.А., Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. О структуре полей и продольных токов в разрыве Харанга // Геомагнетизм и аэрономия, 1985, т.25, с.445.
- Atkinson G. A Theoretical Model of Convection with Distributed Birkeland Currents // J. Geophys. Res. V. 91, NO. A5, PP. 5831-5838, 1986.
- Erickson, G. M., R. W. Spiro, and R. A. Wolf (1991), The Physics of the Harang Discontinuity, J. Geophys. Res., 96(A2), 1633–1645, doi:10.1029/90JA02344.
- Hughes, J. M., and W. A. Bristow (2003), SuperDARN observations of the Harang discontinuity during steady magnetospheric convection, J. Geophys. Res., 108, 1185, doi:10.1029/2002JA009681.
- Tsyganenko N.A., Modeling the Earth's Magnetospheric Magnetic Field Confined Within a Realistic Magnetopause, J. Geophys. Res., 100, 5599-5612, 1995.