

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМОСФЕРЕ

Е.Б. Романова, А.В. Тащилин

MODELLING STRUCTURAL PECULIARITIES OF ELECTRON DENSITY DISTRIBUTION IN THE PLASMASPHERE

E.B. Romanova, A.V. Tashchilin

На основе численной модели ионосферно-плазмосферного взаимодействия исследованы структурные особенности распределения электронной концентрации в плоскости геомагнитного экватора в плазмосфере при низкой и высокой геомагнитной активности для двух сезонов и двух моментов UT. Результаты расчетов позволили исследовать вариации формы и размеров плазмопаузы при низкой и высокой геомагнитной активности на фоне умеренной солнечной активности.

Based on the ionosphere-plasmasphere interaction model, we studied the electron density distribution structure peculiarities in the geomagnetic equator plane in the plasmasphere for two seasons at low and high geomagnetic activity, and for two Universal Time instants. The calculation results allowed us to investigate the variation in the shape and the size of the plasmapause at low and high geomagnetic activity against moderate solar activity.

Введение

Первые систематические экспериментальные данные о структуре плазмосферы, полученные с помощью регистрации свистящих атмосфериков, позволили исследовать закономерности распределения концентрации заряженных частиц вблизи плоскости геомагнитного экватора и, в частности, выделить особенности в изменениях формы и размеров плазмопаузы [Lemaire, Gringauz, 1998]. Более поздние измерения на спутниках «Интербол-1, -2», «Интеркосмос-24, -25», Activny, CRRES, CLUSTER и IMAGE позволили получить новые данные о распределении температуры и концентрации электронов в плазмосфере, об ионном составе, а также выделить тонкую структуру плазмопаузы [Tu et al., 2003; Котова, 2007; Darrouzet et al., 2009].

Несмотря на то, что достигнут значительный прогресс в исследованиях плазмосферы, в настоящее время все еще нет четкой и полной физической и морфологической картины вариаций крупномасштабной структуры плазмосферы. Поэтому исследования плазмосферы на основе численных моделей являются актуальными и представляют наиболее эффективный способ как интерпретации данных наблюдений, так и проверки существующих теорий.

Целью данной работы является исследование структурных особенностей распределения концентрации электронов в плазмосфере и внутренней магнитосфере на L-оболочках от 2 до 10 в спокойные и возмущенные геомагнитные периоды методом численного моделирования.

Описание модели и варианты расчетов

Для достижения указанной цели была использована численная модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия, разработанная в ИСЗФ СО РАН [Tashchilin, Romanova, 2002]. Эта нестационарная численная диффузационная модель описывает распределения параметров плазмы в дрейфующих дипольных плазменных трубках произвольного размера на высотах больше 150 км. Модель является трехмерной и учитывает ионообразование и потери ионов в химических реакциях, диффузию плазмы вдоль геомагнитных силовых линий, осуществляющую за-

полнение плазмосферы, взаимодействие с горизонтальным термосферным ветром. На высоких широтах учитывается влияние магнитосферных источников, таких как поперечный дрейф плазмы под действием электрического поля магнитосферной конвекции и ударная ионизация высыпающимися электронами. Для расчета скоростей фотоионизации термосферных составляющих и энергетических спектров первичных фотоэлектронов использован справочный спектр КУФ Солнца EUVAC, представленный в [Richards et al., 1987]. Для описания пространственно-временных вариаций температуры и концентрации нейтральных компонентов O, O₂, N₂, H, He, N использовалась глобальная эмпирическая модель термосферы MSIS-86 [Hedin, 1987], а скорость горизонтального термосферного ветра определялась по модели HWM-93 [Hedin et al., 1996]. Пространственно-временные вариации электрического поля магнитосферной конвекции получены с помощью эмпирической модели, представленной в работе [Weimer, 1995].

На основе модели [Tashchilin, Romanova, 2002] были рассчитаны восемь вариантов глобальных распределений характеристик тепловой плазмы во внутренней магнитосфере для двух сезонов (равноденствие и декабрьское солнцестояние), двух моментов мирового времени (04:00 и 16:00 UT), двух уровней геомагнитной активности ($K_p=2$ и 5). Все варианты соответствовали среднему уровню солнечной активности ($F10.7=120$). Каждый вариант представлен набором 792 дипольных силовых линий, распределенных по MLT через 1 ч и по параметру Мак-Иллвейна в пределах от L=2 до L=10 с шагом 0.25.

Результаты расчетов и их обсуждение

На рис. 1 представлены рассчитанные профили электронной концентрации $n_e(L)$ в плоскости геомагнитного экватора вдоль меридианов полдень– полночь и утро–вечер для двух моментов UT при низком ($K_p=2$) и высоком ($K_p=5$) уровнях геомагнитной активности. Плазмопауза идентифицируется в профиле $n_e(L)$ как резкий спад («колено») и является переходной областью между плазмосферой и внутренней магнитосферой. Положения плазмопаузы

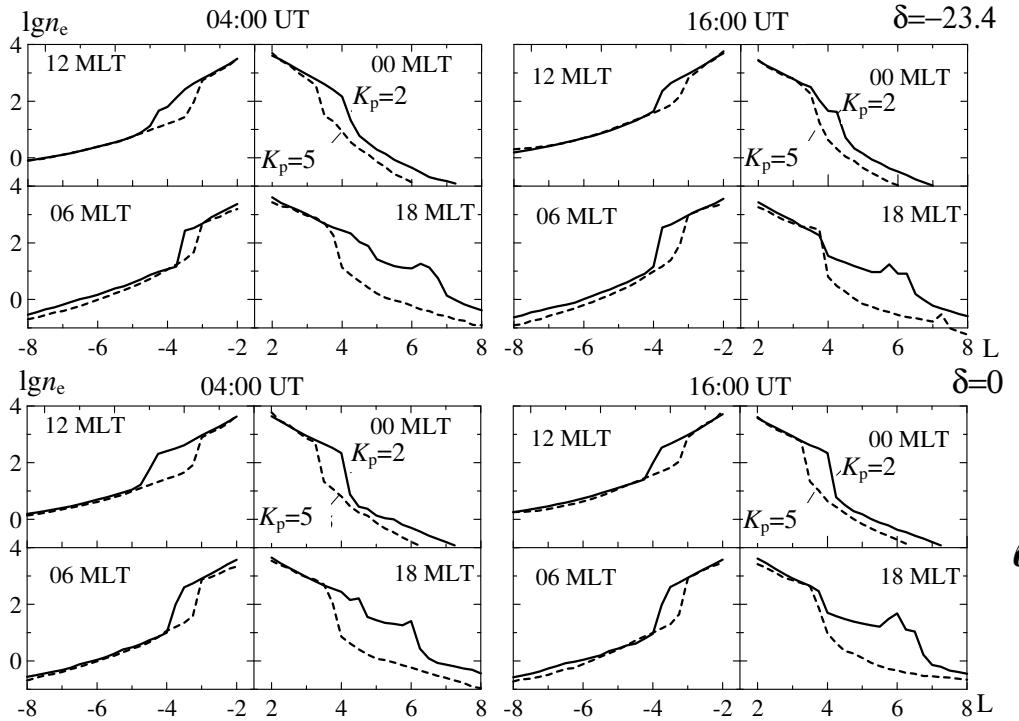


Рис. 1. Рассчитанные профили электронной концентрации для декабрьского солнцестояния (а) и равноденствия (б) в плоскости геомагнитного экватора вдоль меридианов полдень– полночь и утро–вечер для двух моментов UT при низком ($K_p=2$) и высоком ($K_p=5$) уровнях геомагнитной активности.

как средней точки на спаде n_e в 04:00 UT и 16:00 UT, рассчитанные согласно методике из работы [Tu et al., 2006], показаны на рис. 2 для двух сезонов и двух уровней геомагнитной активности $K_p=2$ (кружки) и 5 (ромбики).

Спокойные геомагнитные условия

Дневной профиль $n_e(L)$ более пологий, чем ночной (рис. 1). Плазмопауза в дневном профиле $n_e(L)$ лучше выражена в равноденствие ($\delta=0$), когда она наиболее удалена от Земли в 04:00 UT и находится на расстоянии $\sim 4.5R_E$. В ночном профиле спад n_e присутствует во всех вариантах расчетов. Также плазмопауза более выражена в равноденствие, но зависимость положения плазмопаузы от UT незначительна (рис. 1, 2). В этот период плазмопауза находится на расстоянии $\sim(4\text{--}4.2)R_E$. Различие свойств полуденной и полуночной областей было подтверждено по данным спутников [Decreau et al., 1982]. Было отмечено, что наиболее резкая плазмопауза наблюдается на ночной стороне, а наиболее плавная – на дневной. Так, по данным ISEE-1 [Carpenter, Anderson, 1992] различие между расстоянием до дневной и ночной плазмопаузы составляет не более $0.5R_E$. По нашим расчетам это различие составляет $(0.3\text{--}0.5)R_E$ для всех рассмотренных случаев, т. е. достаточно хорошо согласуется с наблюдениями. В утреннем профиле $n_e(L)$ плазмопауза хорошо выражена во всех рассмотренных случаях. Форма спада n_e имеет незначительные сезонные и UT-вариации (рис. 1), тогда как положение плазмопаузы на утренней стороне ($\sim 4R_E$) остается неизменным во всех вариантах расчетов (рис. 2). Вечерний профиль $n_e(L)$ (рис. 1) более пологий, чем утренний, и плазмопауза расположена на $(0.5\text{--}0.7)R_E$

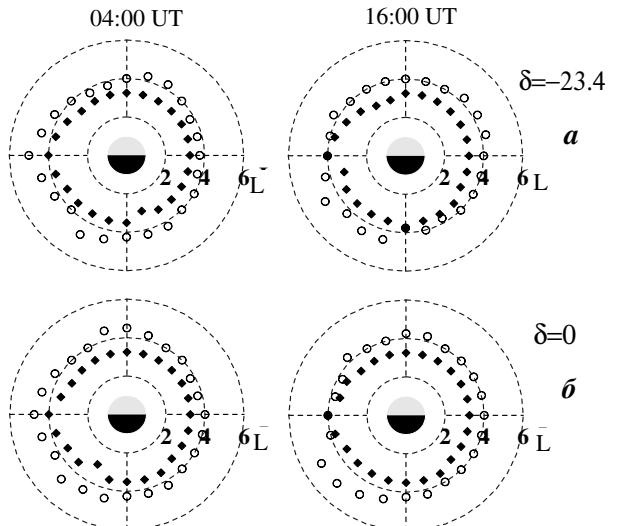


Рис. 2. Положения плазмопаузы в плоскости магнитного экватора для декабрьского солнцестояния (а) и равноденствия (б) при двух уровнях геомагнитной активности $K_p=2$ (кружки) и 5 (ромбики) в 04:00 UT и 16:00 UT.

далее от Земли в вечернем секторе, чем в утреннем, что согласуется с данными наблюдений [Carpenter, Anderson, 1992]. В расчетах в вечернем профиле $n_e(L)$ (рис. 1) присутствует повышение n_e на значительном удалении от Земли $\sim 6R_E$. Так как согласно наблюдениям на спутниках выступы в вечернем профиле $n_e(L)$ наблюдаются только при высокой геомагнитной активности [Carpenter et al., 1993], это может быть следствием зависимости распределения электронной концентрации в экваториальной плоскости от вида модели электриче-

ского поля магнитосферной конвекции [Ташилин, Романова, 2013].

Высокий уровень геомагнитной активности

При возрастании геомагнитной активности плазмосфера сжимается, и при сильных бурях плазмопауза может приблизиться к Земле до расстояния $2R_E$ [Lemaire, Gringauz, 1998]. Наибольшее сжатие плазмосферы получено в равноденствие в 04:00 UT, когда плазмопауза изменила свое положение на $1.2R_E$. В остальных случаях плазмопауза приближается к Земле только на $\sim 0.75R_E$ (рис. 2) и в основном находится на расстоянии $3.25R_E$. В дневном профиле $n_e(L)$ (рис. 1) появляется крутой спад в 04:00 UT в период декабрьского солнцестояния. Также сохраняется асимметрия формы плазмопаузы в направлениях полдень– полночь и утро–вечер (рис. 1, 2).

Заключение

Таким образом, результаты расчетов позволили описать вариации формы и размера плазмопаузы при низкой и высокой геомагнитной активности и показать, что размер плазмосферы зависит главным образом от сектора MLT и уровня геомагнитной активности, а наибольшая зависимость от UT проявляется в равноденствие; плазмосфера асимметрична в направлениях полдень– полночь и утро–вечер. Полученные результаты хорошо согласуются со спутниковыми наблюдениями, что свидетельствует о возможности использования модели для исследования плазмосферы в различных геофизических условиях.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты РФФИ № 10-05-00786, № 11-05-00908).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Котова Г.А. Плазмосфера Земли. Современное состояние исследований: Обзор // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47, № 4. С. 435–449.

Ташилин А.В., Романова Е.Б. Моделирование свойств плазмосферы при спокойных и возмущенных условиях // Геомагнетизм и аэрономия. 2013 (в печати).

Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/Whistler Model of Equatorial Electron Density in the Magnetosphere // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 1097–1108.

Carpenter D.L., Giles B.L., Chappell C.R., et al. Plasmaspheric dynamics in the duskside bugle region: A new look at an old topic // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 19243–19271.

Darrouzet F., Gallagher D.L., Andre N., et al. Plasmaspheric density structure and dynamics: Properties observed by the CLUSTER and IMAGE missions // Space Sci. Rev. 2009. V. 145, N 1. P. 55–106.

Decreau P.M.E., Beghin C., Parrot M. Global characteristics of the cold plasma in the equatorial plasmapause region as deduced from the GEOS 1 mutual impedance probe // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 695–712.

Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, N 5. P. 4649–4662.

Hedin A.E., Fleming E.L., Manson A.H. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58, N 13. P. 1421–1447.

Lemaire J.F., Gringauz K.I. The Earth's plasmasphere. Cambridge University Press, 1998. 350 p.

Richards P.G., Fennelly J. A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N A5. P. 8981–8992.

Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere // Proc. COSPAR. Colloquia Series. 2002. V. 14. P. 315–325.

Tu J.N., Horwitz J.L., Song P., et al. Simulating plasmaspheric field-aligned density profiles measured with IMAGE/RPI: Effects of plasmasphere refilling and ion heating // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. doi:10.1029/2002ja009468.

Tu J., Song P., Reinisch B.W., et al. Empirical specification of field-aligned plasma density profiles for plasmasphere refilling // J. Geophys. Res. 2006. V. 11. A06216. doi:10.1029/2005ja011582.

Weimer D.R. Models of high-latitude electric potentials derived with a least error fit of spherical harmonic coefficients // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 19595–19607.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия