

УДК 551.510.537

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПРОТОНОВ В ПЛАЗМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ВДОЛЬ ОРБИТЫ СПУТНИКА ИНТЕРБОЛ-1

© 2012 г. М. И. Веригин, Г. А. Котова, В. В. Безруких, О. С. Акенъгиева

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований РАН, г. Москва
e-mail: kotova@iki.rssi.ru*

Поступила в редакцию 22.03.2012 г.

На основе экспериментальных данных, полученных в 1995–2000 гг. на космическом аппарате Интербол-1 с помощью прибора АЛЬФА-3, разработана полуэмпирическая двумерная модель плазмосферы Земли, которая позволяет по измерениям температуры и плотности протонов вдоль орбиты спутника восстановить распределение плазмы во всей меридиональной плоскости. Модель также тестирована на данных космического аппарата IMAGE. В модели использованы теоретические выражения [Lemaige and Scherer, 1974], описывающие распределение плазмы в плазмосфере для случаев теплового равновесия и бесстолкновительного начального частичного заполнения плазмосферных оболочек, поэтому параметры построенной модели имеют ясный физический смысл, позволяя, в частности, оценить степень заполненности плазмосферы.

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени накоплен большой объем экспериментальных данных по характеристикам тепловой плазмы в плазмосфере Земли, на основании которого построен ряд эмпирических моделей распределения плотности в зависимости от параметра L , местного времени, сезона наблюдения и уровня геомагнитной активности [Carpenter and Anderson, 1992; Gallagher et al., 2000; Reinisch et al., 2009]. Однако почти все имеющиеся модели ограничиваются экваториальной плоскостью плазмосферы. Изменение плотности плазмы в плазмосфере вдоль силовых линий геомагнитного поля экспериментально исследовано довольно плохо. Gallagher et al. [2000] на основании статистического анализа данных спутника DE-1 считают, что изменение плотности плазмы вдоль магнитных оболочек при $L > 3$ начиная с высоты в $1 R_E$ незначительно, однако это очень усредненный результат, так как при анализе данные не разделялись ни по условиям в магнитосфере, ни по мировому, ни по местному времени. Фактически первые экспериментальные распределения плотности плазмы вдоль силовых линий магнитного поля были получены по данным радиозондирования с космического аппарата IMAGE с помощью прибора RPI (radio plasma imager) [Reinisch et al., 2001; Tu et al., 2003]. Распределения плотности вдоль силовых линий $L = 2.2–3.2$ показывают, что плотность мало меняется в пределах геомагнитной широты $\pm 20–25^\circ$, и затем

возрастает в 1.5–2 раза к широтам $\sim \pm 40^\circ$, что соответствует высотам $\sim 4000–5000$ км.

Прибор RPI при работе в активной моде излучал импульсные радиосигналы в диапазоне 3 кГц–3 МГц во всех направлениях и регистрировал отклики на эти радиосигналы. Измерялась зависимость задержки прихода откликов радиосигнала от частоты. Оказалось, что наиболее сильные отклики приходили при приеме вдоль магнитного поля. Это позволило определять плотность плазмы в определенном месте силовой линии, на которой находился космический аппарат. Для периодов, когда IMAGE находился вблизи экваториальной плоскости, можно восстановить распределение плотности плазмы вдоль силовой линии в обеих полусферах [Reinisch et al., 2001]. На основе таких измерений Huang et al. [2004], Reinisch et al. [2004] предложили эмпирическую двумерную модель распределения плотности в плазмосфере. Эта модель неплохо описывает экспериментальные данные, полученные с помощью RPI/IMAGE, однако она основана на чисто эмпирических соотношениях, которые невозможно интерпретировать с точки зрения физики происходящих процессов.

В настоящей работе предложена полуэмпирическая модель, основанная на физических уравнениях заполнения плазмосферы, которая описывает как данные, полученные на ИНТЕРБОЛЕ-1 с помощью прибора АЛЬФА-3, так и данные космического аппарата IMAGE.

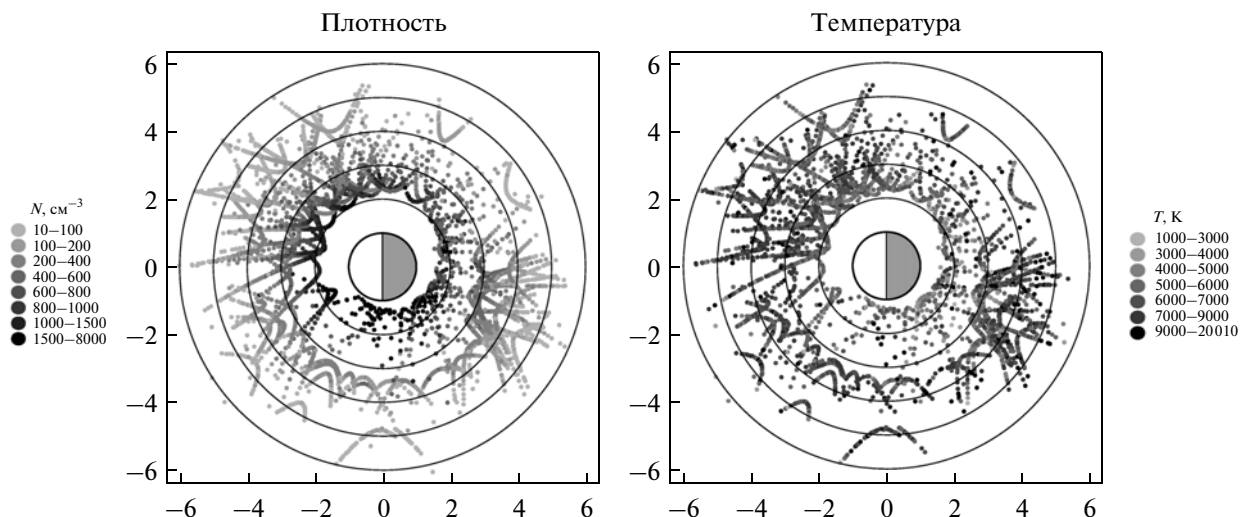


Рис. 1. Проекция вдоль силовых линий геомагнитного поля точек измерения спектров ионов в плазмосфере на плоскость геомагнитного экватора. Измерения, сгруппированные вдоль кривых линий, проведены на отдельных пролетах ИНТЕРБОЛ-1 через плазмосферу. Оттенками серого показаны значения плотности (слева) и температуры (справа). Тонкими окружностями отмечены величины $L = 2, 3, 4, 5, 6$. Расстояние по осям указано в радиусах Земли.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

По данным прибора АЛЬФА-3/ИНТЕРБОЛ-1 (1995–2000 гг.) создана база данных, включающая: плотность протонов, температуру протонов, потенциал космического аппарата, координаты спутника, индексы солнечной активности, параметры солнечного ветра. ИНТЕРБОЛ-1 пересекал плазмосферу (при достаточно низком перигее) раз в 4 дня. В эксперименте АЛЬФА-3 энергетические спектры ионов измерялись за 2 сек с периодом от 18 сек до 2 мин [Безруких и др., 1998]. При расчете плазменных параметров по измеренным спектрам предполагалось, что в тепловой области частицы распределены по энергиям по максвелловскому закону с учетом частичного экранирования потенциалом спутника, учитывались скорость совращения плазмы с Землей и скорость космического аппарата.

Полная база данных включает ~10 тыс. измерений спектров. На рисунке 1 показано пространственное покрытие мест измерения спектров в проекции на экваториальную плоскость. Видно естественное уменьшение плотности к периферии плазмосферы и увеличение температуры в сторону полуденного меридиана при $L < 3$ [Kotova et al., 2002; Котова, 2007]. Рисунок 1 показывает, что объем имеющихся данных достаточно большой, и на его основе возможно построение эмпирической модели плазмосферы.

3. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Представляется целесообразным рассмотреть модель, описывающую распределения плазмы вдоль магнитных силовых линий, полученные по измерениям, и основанную на физически обоснованных соотношениях.

Если бы вращающаяся плазмосфера находилась в состоянии диффузионного равновесия, когда ионы изотропны везде вплоть до экваториальной плоскости, то для описания распределения концентрации плазмы $N_e(L, \lambda)$ на фиксированной L -оболочке в зависимости от геомагнитной широты λ можно было использовать следующее простое выражение [Lemaire, 1976]:

$$N(L, \lambda) = N_0 e^{-q(L, \lambda)}, \quad (1)$$

где $q(L, \lambda) = \frac{m_p g_e R_E}{2k T_p L} \left[\frac{1}{\cos^2 \lambda_0} - \frac{1}{\cos^2 \lambda} + \frac{1}{3} \left(\frac{L}{L_R} \right)^3 \times \left(\cos^6 \lambda_0 - \cos^6 \lambda \right) \right]$ – приведенная потенциальная энергия, m_p и T_p – масса и температура протонов, соответственно, g_e – ускорение свободного падения на поверхности Земли, k – постоянная Больцмана, R_E – радиус Земли, $L_R = 5.78$ – предел Роша, N_0 – концентрация протонов на экзобазе, и $\lambda_0 = \arccos \sqrt{\frac{R_E + h_{ex}}{L R_E}}$ – геомагнитная широта экзобазы, расположенной на высоте h_{ex} .

В другом предельном случае – бесстолкновительного заполнения опустошенной плазмосферы

ры потоком протонов с экзобазы, для $N(L, \lambda)$ можно использовать несколько более сложное выражение [Lemaire and Scherer, 1974]:

$$N(L, \lambda) = N_0 e^{-q(L, \lambda)} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \eta(L, \lambda)} e^{\frac{\eta(L, \lambda) q(L, \lambda)}{1 - \eta(L, \lambda)}} \right\} \quad (2)$$

с параметром $\eta(L, \lambda) = \frac{B(L, \lambda)}{B(L, \lambda_0)} = \sqrt{\frac{4 - 3 \cos^2 \lambda}{4 - 3 \cos^2 \lambda_0}} \times \frac{\cos^6 \lambda_0}{\cos^6 \lambda}$, равным отношению величины магнитного поля $B(L, \lambda)$ к величине поля на экзобазе $B(L, \lambda_0)$ и обратно пропорциональным зависимости площади поперечного сечения силовой трубки геомагнитного поля от λ . Выражение (2) применимо только при $L < L_R$. При $L > L_R$ вместо (2) необходимо использовать более сложное выражение, также приведенное в статье [Lemaire and Scherer, 1974].

В нашей работе для моделирования концентрации плазмы $N(L, \lambda)$ на данной L -оболочке в зависимости от геомагнитной широты λ мы будем использовать выражение

$$N(L, \lambda) = N_0 e^{-q(L, \lambda)} \times \left\{ 1 - (1 - \alpha) \sqrt{1 - \eta(L, \lambda)} e^{\frac{\eta(L, \lambda) q(L, \lambda)}{1 - \eta(L, \lambda)}} \right\}, \quad (3)$$

где коэффициент заполнения $\alpha = 1$ описывает распределение протонов при достижении ими равновесного состояния (1), а случай $\alpha = 0$ соответствует начальной стадии заполнения плазмосферы после ее опустошения (2), когда ионы, движущиеся из ионосферы в плазмосферу, не успевают изотропизоваться и имеют преимущественно продольное (вдоль магнитного поля) распределение по скоростям [Lemaire and Scherer, 1974; Pierrard and Lemaire, 2001].

Для каждого пролета ИНТЕРБОЛа-1 через плазмосферу в выражении (3) температура протонов T_p берется из экспериментальных данных, а свободными параметрами являются только концентрация протонов на высоте экзобазы N_0 и степень заполнения плазмосферы α . В расчетах распределения плазмы в плазмосфере удобнее использовать не плотность плазмы на экзобазе $N_0 = N(L, \lambda_0)$, а плотность в экваториальной плоскости $N_{eq}(L) = N(L, 0)$. Теперь соотношение (3) можно переписать таким образом:

$$N(L, \lambda) = N_{eq}(L) e^{q_{eq}-q} \left\{ \frac{1 - (1 - \alpha) \sqrt{1 - \eta} e^{\frac{\eta q}{1 - \eta}}}{1 - (1 - \alpha) \sqrt{1 - \eta_{eq}} e^{\frac{\eta_{eq} q_{eq}}{1 - \eta_{eq}}}} \right\}, \quad (4)$$

где $q_{eq} = q_{eq}(L, 0)$, $\eta_{eq} = \eta_{eq}(L, 0)$.

Изменение плотности ионов в экваториальной плоскости в зависимости от L достаточно хорошо описывается эмпирическим выражением, использованным ранее Huang et al. (2004):

$$N_{eq}(L) = A \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{L_p} \right), \quad (5)$$

где A и L_p – параметры, причем L_p – величина, связанная с положением плазмопаузы L_{pp} , при $L = L_p$ $N_{eq}(L) = 0$. Обычно по экспериментальным данным плазмопаузу определяют, как $L = L_{pp}$ – оболочку, после которой плотность плазмы падает в 5 раз или более при изменении L от L_{pp} до $L_{pp} + 0.5$. [Carpenter and Anderson, 1992; Moldwin et al., 2002]. Параметр A удобно выразить через плотность плазмы на экзобазе в экваториальной плоскости $N_{ex} = N_{eq}(1 + h_{ex}/R_E)$. В этом случае выражение (5) можно переписать:

$$N_{eq}(L) = N_{ex} \frac{\frac{1}{L} - \frac{8L_{pp} - 1}{8L_{pp}^2 + 4L_{pp}}}{\frac{R_E + h_{ex}}{R_E} - \frac{8L_{pp} - 1}{8L_{pp}^2 + 4L_{pp}}}. \quad (6)$$

Таким образом, для построения двумерной модели плотности плазмы в меридиональной плоскости необходимо определить 3 физических параметра: плотность плазмы на высоте экзобазы в экваториальной плоскости N_{ex} , положение плазмопаузы L_{pp} , и коэффициент заполнения плазмосферы α .

4. ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПРОТОНОВ В МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ПО ДАННЫМ ОДНОГО ПРОЛЕТА СПУТНИКА ИНТЕРБОЛ-1

На примере данных спутника ИНТЕРБОЛ-1 покажем применимость представленной выше модели для адекватного описания распределения плазмы в плазмосфере Земли. На рисунке 2 показано изменение плотности холодной плазмы с геомагнитной широтой при пролете ИНТЕРБОЛа-1 через плазмосферу 2 марта 1996 г. Спутник пересекает плазмосферу за ~50 мин из южного в северное полушарие, при этом минимальное значение $L = 2.3$ достигается вблизи геомагнитного экватора, местное магнитное время MLT в плазмосфере меняется незначительно в пределах от 5 до 6.5 час. Сплошная кривая на рис. 2 соответствует зависимости (4) с параметрами $N_{ex} = 1960 \text{ см}^{-3}$, $L_{pp} = 4.19$, и $\alpha = 0.86$, при которых минимально среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений от теоретической кривой $\sigma =$

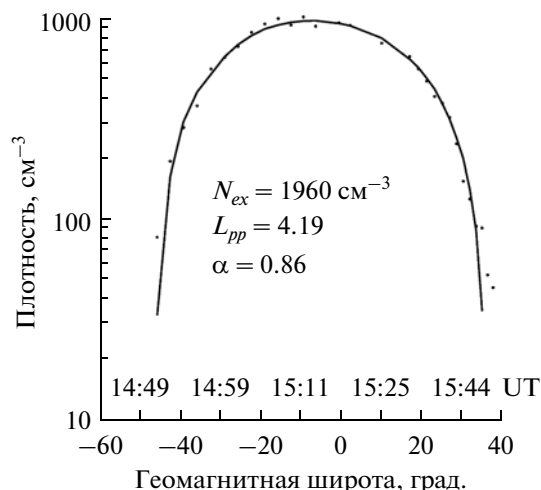


Рис. 2. Зависимость плотности холодной плазмы от геомагнитной широты вдоль орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-1 2 марта 1996 г. Точки — экспериментальные данные, кривая — зависимость (4).

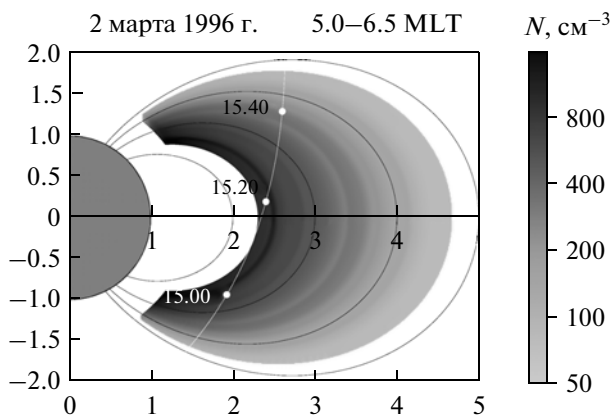


Рис. 3. Распределение холодной плазмы в меридиональной плоскости утренней плазмосферы, восстановленное по измерениям 2 марта 1996 на ИНТЕРБОЛЕ-1. Тонкой белой линией с временными метками показана орбита спутника. Расстояния по осям указаны в радиусах Земли. Тонкими черными линиями показаны L -оболочки.

$$= \sqrt{\sum (N(L_i, \lambda_i) - N_i)^2 / k} = 35.5 \text{ см}^{-3}, i = 1 \dots k, k$$
 — число экспериментальных значений, показанных точками на этом рисунке, высота экзобазы $h_{ex} = 3000 \text{ км}$ [Pierrard and Lemaire, 1996]. Как видно из приведенных на рис. 2 данных, имеющая ясный физический смысл теоретическая зависимость (4) достаточно хорошо описывает результаты наблюдений и, следовательно, позволяет восстановить распределение концентрации плазмы во всей меридиональной плоскости. Рисунок 3 демонстрирует это распределение.

Двумерные распределения плазмы в меридиональной плоскости удалось рассчитать по дан-

ным 102 пролетов спутника ИНТЕРБОЛ-1 через плазмосферу (см. рис. 1). Отношение среднеквадратичного отклонения плотности σ к максимальной плотности, наблюдавшейся при данном пересечении плазмосферы, в среднем составляло 10% и не превышало 20%.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

По данным спутника ИНТЕРБОЛ-1 показано, что основываясь на физических представлениях о заполнении плазмосферы, можно построить теоретическую модель распределения холодной плазмы в ближней магнитосфере. Сравним теперь нашу модель с моделью, построенной по данным эксперимента RPI/IMAGE [Huang et al., 2004]. Пока это единственный эксперимент, который позволил восстанавливать профиль плотности плазмы вдоль магнитной силовой линии.

Для воспроизведения распределений плазмы вдоль магнитных силовых линий, полученных по измерениям прибора RPI/IMAGE, Huang et al. [2004] использовали чисто эмпирическое соотношение:

$$N(L, \lambda) = N_{eq}(L) \left(1 + \gamma \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \sec^{\beta(L)} \left(\frac{\pi \delta \lambda}{2 \Lambda} \right), \quad (7)$$

где $\beta(L) = C + DL$, $\Lambda = a \cos(1/\sqrt{L})$ — инвариантная широта, C, D, γ, δ — подбираемые параметры. Среди параметров, используемых в (7) только входящий в $N_{eq}(L)$ (5) параметр L_p имеет физический смысл — этот параметр связан с положением плазмосферы. На рисунке 4а, воспроизведенном из работы Huang et al. [2004], штриховыми линиями показано распределение плазмы, рассчитанное для измерений RPI/IMAGE 8 июня 2001 г. (сплошные линии). При подобранных авторами параметрах эмпирическое соотношение (7) достаточно хорошо аппроксимирует распределение плазмы в меридиональной плоскости плазмосферы.

Покажем, что данные космического аппарата IMAGE можно также описать с помощью нашей модели уравнениями (4). На рисунке 4б сплошные линии соответствуют тем же данным спутника IMAGE, что и на рис. 4а, но штриховые линии теперь относятся к расчетам по теоретической модели (4) с подобранными параметрами $N_{ex} = 6900 \text{ см}^{-3}$, $L_{pp} = 3.02$, $\alpha = 0.7$ и $T_p = 2110 \text{ К}$. Для описания асимметрии между северным и южным полушариями Huang et al. [2004] в выражении (7) использовали эмпирический параметр γ . В нашей модели на рис. 2 для описания этой асимметрии использован небольшой эмпирический сдвиг по геомагнитной широте $\lambda \rightarrow \lambda + \Delta\lambda$, $\Delta\lambda = 2.1^\circ$. Видно, что согласие нашей модели с экспериментальными данными сопоставимо с полученным в

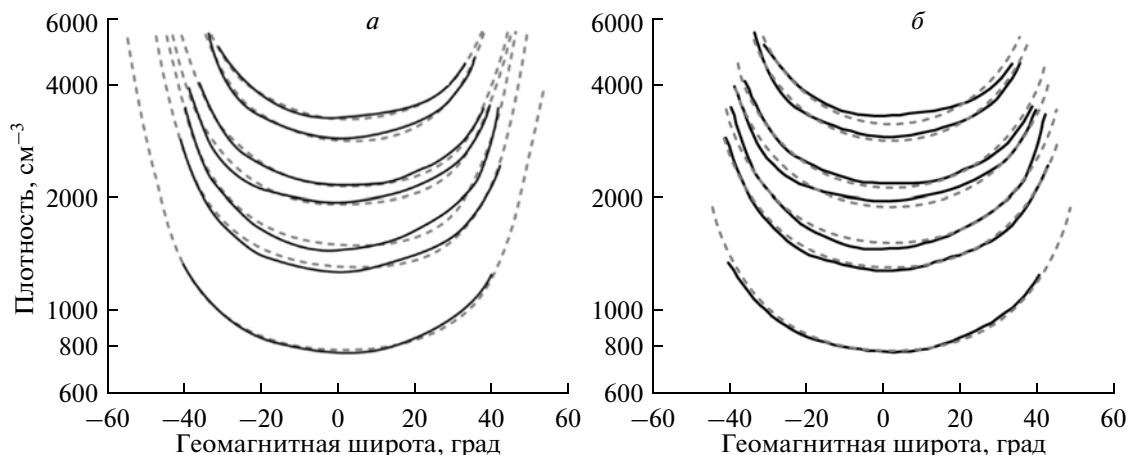


Рис. 4. Сплошные кривые — профили плотности вдоль 7 различных L -оболочек $2.22 < L < 3.23$, полученные по данным RPI/IMAGE 8 июня 2001 г. при MLT = 8.0 [рис. 3, Huang et al., 2004], штриховые кривые — эмпирическая модель (7) Huang et al. [2004] (а) и предлагаемая модель (4) (б). Теоретические кривые на панели (б) ограничены широтами, на которых L -оболочки пересекают экватор.

модели Huang et al. [2004]. Таким образом, предлагаемая модель описывает и данные космического аппарата ИНТЕРБОЛ-1, и данные IMAGE.

Как уже отмечалось, основным недостатком модели Huang et al. [2004] является отсутствие возможности физической интерпретации ее параметров. Используя такую модель невозможно физически обоснованно описать процессы заполнения и опустошения плазмосферы. Недостатком является и невзаимосвязанные распределения плотности и температуры плазмы. В модели, кроме того, достаточно много свободных параметров.

Полуэмпирическая модель, предложенная в настоящей работе, лишена вышеперечисленных недостатков и поэтому представляется предпочтительной.

Построенная модель является основой для создания трехмерной модели плазмосферы Земли. За время своей активной работы спутник пересекал плазмосферу при всех местных временах (см. рис. 1), накоплено достаточно данных для определения зависимости параметров двумерной модели от MLT и геомагнитных условий, и построения трехмерной модели.

6. ВЫВОДЫ

По данным прибора АЛЬФА-3/ИНТЕРБОЛ-1 (1995–2000 гг.) создана база данных, включающая: плотность протонов, температуру протонов, потенциал космического аппарата, координаты спутника, индексы солнечной активности, параметры солнечного ветра. Разработана полуэмпирическая двумерная модель плазмосферы Земли, которая позволяет по данным одного пролета

спутника через плазмосферу восстановить распределение плазмы во всей меридиональной плоскости. Модель также достаточно хорошо описывает данные космического аппарата IMAGE. Модель основана на уравнениях, описывающих распределение плазмы в плазмосфере для случаев теплового равновесия и бесстолкновительного начального частичного заполнения плазмосферных оболочек [Lemaire and Scherer, 1974]. Параметры построенной модели имеют ясный физический смысл и описывают состояние заполненности плазмосферы.

Работа выполнена при частичной поддержке программы РАН ОФН15 и П22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безруких В.В., Барабанов Н.А. и др. Исследование малоэнергичной плазмы на борту Хвостового и Аврорального зондов: Аппаратура и предварительные результаты // Космич. исслед. Т. 36. С. 33–41. 1998.
- Котова Г.А. Плазмосфера Земли. Современное состояние исследований // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 47. С. 1–16. 2007.
- Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 97. P. 1097–1108. 1992.
- Gallagher D.L., Craven P.D., Comfort R.H. Global core plasma model // J. Geophys. Res. V. 105. P. 18819–18883. 2000.
- Huang X., Reinisch B.W., Song P., Green J.L., Gallagher D.L. Developing an empirical density model of the plasmasphere // Adv. Space Res. V. 33. P. 829–832. 2004.
- Kotova G.A., Bezrukikh V.V., Verigin M.I., Legen L.A. Temperature and density variations in the dusk and dawn plasmasphere as observed by INTERBALL TAIL in 1999–2000 // Adv. Space Res. V. 30(7). P. 1831–1834. 2002.

- *Lemaire J., Scherer M.* Exospheric models of the topside ionosphere // *Space Sci. Rev.* V. 15. P. 591–640. 1974.
- *Lemaire J.* Rotating ion-exospheres // *Planetary Space Sci.*, V. 24. P. 975–985. 1976.
- *Moldwin M.B., Downward L., Rassoul H.K., Amin R., Anderson R.R.* A new model of the location of the plasma-pause: CRRES results // *J. Geophys. Res.* V. 107(A11). doi:10.1029/2001JA009211. 2002.
- *Pierrard V., Lemaire J.* Lorentzian ion exosphere model // *J. Geophys. Res.* V. 101(A4). P. 7923–7934. 2001.
- *Pierrard V., Lemaire J.* Exospheric model of the plasmasphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 63. P. 1261–1265. 2001.
- *Reinisch B.W., Huang X., Song P., Sales G.S., Fung S.F., Green J.L., Gallagher D.L., Vasyliunas V.M.* Plasma density distribution along the magnetospheric field: RPI observations from IMAGE // *Geophys. Res. Lett.* V. 28. P. 4521–4524. 2001.
- *Reinisch B.W., Huang X., Song P., Fung S.F., Green J.L., Vasyliunas V.M., Gallagher D., Sandel B.R.* Plasmaspheric mass loss and refilling as a result of a magnetic storm // *J. Geophys. Res.* V. 109. A01202. doi:10.1029/2003JA009948. 2004.
- *Reinisch B.W., Moldwin M.B., Denton R.E., Gallagher D.L., Matsui H., Pierrard V., Tu J.* Augmented empirical models of plasmaspheric density and electric field using IMAGE and CLUSTER Data // *Space Sci. Rev.* V. 145. P. 231–261. 2009.
- *Tu J.-N., Horwitz J.L., Song P., Huang X.-Q., Reinisch B.W., Richards P.G.* Simulating plasmaspheric field-aligned density profiles measured with IMAGE/RPI: Effects of plasmasphere refilling and ion heating // *J. Geophys. Res.* V. 108. A1017. doi:10.1029/2002JA009468. 2003.