

Анализ влияния параметров параболической модели магнитосферы на профиль модельного магнитного поля вдоль траектории космического аппарата Juno

И. А. Пенсионеров,* Е. С. Беленькая, И. И. Алексеев, В. В. Калегаев

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 14.05.2018; Подписана в печать 06.06.2018)

Изучалось поведение магнитного поля, рассчитанного в параболической модели магнитосферы Юпитера, при различных значениях параметров модели. Были найдены наиболее существенные параметры модели и изучено их влияние на профиль модельного магнитного поля вдоль второго витка вокруг Юпитера космического аппарата Juno. Рассмотрено влияние модели магнитодиска на положение расчетной проекции траектории космического аппарата на ионосферу.

PACS: 94.30.-d

УДК: 523.4

Ключевые слова: магнитосферы планет, планеты-гиганты, магнитодиск.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитосфера Юпитера существенно отличается от магнитосферы Земли. Главным источником энергии в земной магнитосфере является поток плазмы солнечного ветра. В случае же Юпитера определяющую роль играет энергия вращения планеты. Период составляет приблизительно 10 часов [1]; экваториальный радиус планеты $R_J = 71492$ км на уровне давления в 1 бар [2]. Другим важным отличием является наличие у Юпитера мощного внутримангнитосферного источника плазмы — вулканически активного спутника Ио, который выбрасывает в магнитосферу около 1000 кг вещества в секунду. Это вещество ионизируется под действием солнечного света и высыпается высокоэнергичных заряженных частиц и вместе с основной магнитосферной плазмой в результате быстрого вращения в сильном собственном магнитном поле планеты создает плазменный диск с вложенным в него токовым диском, магнитное поле которого на расстоянии $\sim 20 R_J$ сравнимо с собственным полем планеты. Благодаря этой токовой системе магнитосфера Юпитера имеет столь большой размер — расстояние от планеты до подсолнечной точки составляет от 45 до $100 R_J$ [3]. Это в два раза больше той магнитосферы, которая могла бы быть образована одним планетарным диполем.

Параболическая модель магнитосферы Юпитера [4, 5] описывает формирующие её токовые системы и магнитное поле. В настоящей работе рассматривается зависимость профиля модельного поля магнитодиска вдоль второго витка КА Juno вокруг Юпитера (идентификатор траектории PERI-01) от параметров модели.

1. ОБРАЗОВАНИЕ МАГНИТОДИСКА В МАГНИТОСФЕРЕ ЮПИТЕРА

Вращение Юпитера передается в атмосферу, а благодаря трению нейтралов с ионами ионосферы, и в ионосферу [6]. Силовые линии магнитного поля, пересекающие ионосферу, обладают большой продольной проводимостью и малой поперечной, поэтому являются почти эквипотенциальными. Вследствие этого, потенциал электрического поля коротации вдоль них переносится в магнитосферу. Юпитерианская магнитосфера вовлекается в твердотельное вращение благодаря высокопроводящим магнитным силовым линиям, соединяющим ионосферу с магнитосферой. Электрическое поле, возникающее при вращении (поле коротации), равно

$$\mathbf{E}_{rig} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B} = -\frac{B_{0J}\Omega_J}{r^2} \sin(\theta) (\sin(\theta), -2\cos(\theta), 0), \quad (1)$$

где θ — коширота (полярный угол, отсчитываемый от оси вращения Юпитера), B_{0J} — поле планеты на ее экваторе, $\Omega_J = 1.76 \times 10^{-4} \text{ rad s}^{-1}$ — угловая скорость вращения Юпитера [7]. Электрический потенциал при твердотельном вращении в дипольном магнитном поле на ионосфере $U_{rig} = B_{0J}\Omega_J(R_J^3/r) \sin^2(\theta)$ переносится в магнитосферу [5]. В частности, в экваториальной плоскости магнитосферы ($\theta = \pi/2$, $r = L$) в зоне твердотельного вращения он равен $U_{rig} = B_{0J}\Omega_J(R_J^3/L)$. Таким образом, электрический потенциал U_{rig} в магнитосфере соответствует скорости твердотельного вращения плазмы, существующего до некоторого пространственного предела. Этот предел — альфвеновский радиус. На альфвеновском радиусе плотности магнитной и кинетической энергий потока замагниченной магнитосферной плазмы равны. От ионосферы до альфвеновского радиуса магнитное поле управляет движением плазмы. За альфвеновским радиусом плазма контролирует магнитное поле [8]. В магнитосфере Юпитера существует мощный источник дополнительной плазмы — вулканически активный спутник Ио, поставляющий около тонны вещества в секунду. Плазма под действием центробежной силы стремится к при-

*E-mail: pensionerov@gmail.com

экваториальной области и вытягивает силовые линии, образуя дискообразную структуру. Толщина диска порядка $4-5 R_J$ [9].

Согласно наблюдениям за $15-20 R_J$ плазма постепенно дрейфует в радиальном направлении от планеты, продолжая вращаться с меньшей азимутальной скоростью [10]. Если бы она двигалась по инерции, её вращательный момент был бы постоянен, а угловая скорость падала бы как $\frac{1}{r^2}$. Однако до альфвеновского радиуса плазма остается в твердотельном вращении, что означает увеличение момента импульса, и, следовательно, к ней приложен момент силы. Дополнительный момент импульса плазма получает от планеты в процессе не раз описанном в литературе [6, 7].

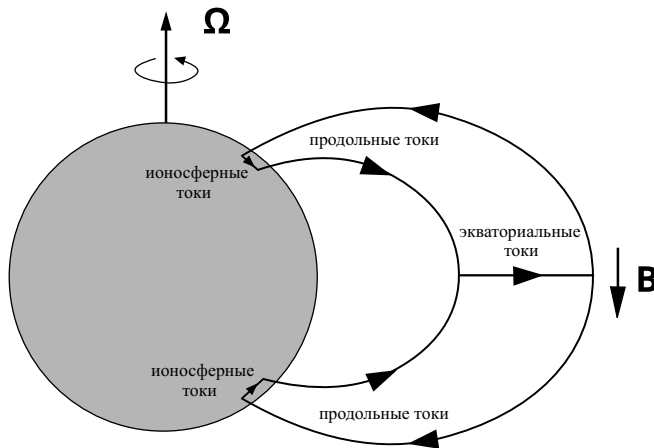


Рис. 1: Токовая система, поддерживающая ковращение магнитосферной плазмы (на основе рисунка из [6])

Идея заключается в следующем. Заряженные частицы ионосферы сталкиваются с нейтралами атмосферы. То есть импульс передается от вращающейся атмосферы к ионосфере посредством вязкого трения. Далее рассматривается токовая система (рис. 1), включающая токи на ионосфере, радиальный ток в экваториальной области магнитосферы и замыкающие его продольные токи (то есть токи, идущие вдоль высокопроводящих силовых линий магнитного поля). Конфигурация токов такова, что в ионосфере сила $\mathbf{j}_i \times \mathbf{V}_i$ (\mathbf{j}_i — ионосферный ток, \mathbf{V}_i — напряженность магнитного поля в области ионосферных токов) уравнивает силу вязкого трения, а на магнитном экваторе противоположно направленная сила $\mathbf{j}_e \times \mathbf{V}_e$ (\mathbf{j}_e — экваториальный ток, \mathbf{V}_e — напряженность магнитного поля в области экваториальных токов) поддерживает вращение. От величины тока в ионосфере (ограниченной её Педерсеновской проводимостью, числом носителей заряда и приложенной разностью потенциалов) зависит момент, который может передаваться магнитосферной плазме. Как показано, например, в [6, 7], используя закон сохранения момента импульса, можно получить дифференциальное уравнение, которому должна удовлетворять функция, описывающая зависимость угловой скорости магнитосферной плазмы от

расстояния $\Omega(r)$. Далее, зная профиль угловой скорости $\Omega(r)$, можно из дивергенции плотности радиального тока \mathbf{j}_e в экваториальной плоскости получить продольный ток $I_{||}$. На расстоянии альфвеновского радиуса от центра Юпитера (r_A) в экваториальной магнитосфере из уравнения $\text{div } \mathbf{j}_e + I_{||} = 0$ следует, что $I_{||}|_{r=r_A} = -\text{div } \mathbf{j}_e|_{r=r_A} = -(j_e|_{r>r_A} - j_e|_{r<r_A})$. Продольные токи будут тем сильнее, чем быстрее меняется радиальный ток.

В области отставания плазмы от твердотельного вращения с планетой ($r > r_A$) и усиления радиального разлёта силовые линии магнитного поля в экваториальной области оказываются вытянуты в радиальном направлении от планеты, так как поле вморожено в плазму. Такой конфигурации поля соответствует токовый слой, по обе стороны которого магнитные поля почти антипараллельны. В работе [7] отмечали, что сильные возмущения магнитного поля из-за плазменных приэкваториальных токов наблюдаются за $\sim 15 R_J$. Эти токи формируют диск вокруг планеты, который называют магнитодиском.

2. ПАРАБОЛОИДНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОСФЕРЫ ЮПИТЕРА

Параболоидная модель магнитосферы была разработана для описания магнитного поля и токовых систем, возникающих при взаимодействии магнитного поля Юпитера с плазмой солнечного ветра [4]. В этой модели в солнечно-магнитосферной системе координат магнитопауза описывается неподвижным параболом вращения. Солнечно-магнитосферная система задается так: начало отсчета находится в центре планеты, ось X направлена на Солнце, плоскость XZ содержит диполь собственного поля планеты и Y завершает правую тройку.

В модели учитываются следующие токовые системы: магнитодиск, токовая система хвоста и также токи экранировки собственного поля планеты и магнитодиска на магнитопаузе. В параболоидной модели магнитодиска представляет собой плоское кольцо с внешним радиусом R_{DC1} и внутренним R_{DC2} , находящееся в магнитном экваторе. В нем текут азимутально направленные токи, убывающие с расстоянием как r^{-2} . B_{DC} — радиальная компонента магнитного поля на внешнем крае диска.

3. ПЕРЕХОД ИЗ СИСТЕМЫ SIII (1965) В СОЛНЕЧНО-МАГНИТОСФЕРНУЮ СИСТЕМУ КООРДИНАТ

Расчёты в параболоидной модели проводятся в солнечно-магнитосферной системе координат (JSM). Данные обычно предоставляются в системе отсчета SIII (1965) [11] с началом отсчета в центре планеты и осью Z направленной вдоль оси вращения. Поэтому

необходимо иметь матрицу перехода из одной системы в другую в каждый момент времени. Для миссии Juno данные предоставлялись помимо системы SIII в системе координат с осью X , направленной на Солнце и осью Z , направленной перпендикулярно плоскости орбиты планеты (JSO). Имея координаты одной и той же точки в обеих системах координат, можно получить матрицу перехода между этими системами координат. Такой метод расчета матрицы преобразований не требует обращения к детальным астрономическим расчетам положения Юпитера на небесной сфере.

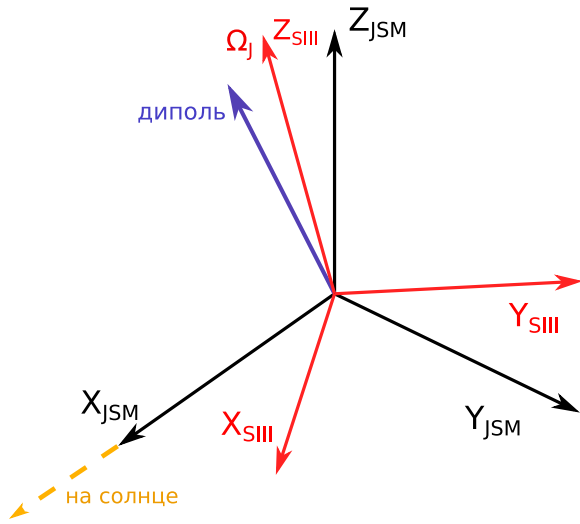


Рис. 2: Рассматриваемые системы координат

Получим сначала положение вектора \mathbf{X}_{JSM} в системе SIII. Пусть \mathbf{R}_{JSO} — радиус вектор космического аппарата в JSO, а \mathbf{R}_{SIII} в SIII. Тогда матрицу перехода из JSO в SIII можно получить, например, как матрицу поворота (обозначим её M_1) на угол α :

$$\alpha = \arccos(\mathbf{R}_{JSO} \cdot \mathbf{R}_{SIII}) \quad (2)$$

вокруг оси $\mathbf{R}_{JSO} \times \mathbf{R}_{SIII}$. И $\mathbf{X}_{JSM} = \mathbf{X}_{JSO}$ равен произведению M_1 на единичный вектор вдоль оси X .

Положение диполя собственного поля планеты зависит от используемой модели. Пусть для применяемой в настоящей работе модели внутреннего поля VIP4 [9] вектор диполя в SIII имеет координаты \mathbf{D}_{SIII} . Несложно тогда получить координаты \mathbf{Z}_{JSM} и \mathbf{Y}_{JSM} в системе SIII, а так же значение угла между осью Z и направлением диполя Ψ .

$$\mathbf{Z}_0 = \mathbf{D} - \mathbf{X}(\mathbf{D} \cdot \mathbf{X}) \quad (3)$$

$$\mathbf{Z}_{JSM} = \mathbf{Z}_0 / \|\mathbf{Z}_0\| \quad (4)$$

$$\mathbf{Y}_{JSM} = \mathbf{Z} \times \mathbf{X} \quad (5)$$

$$\Psi = \arcsin(\mathbf{D} \cdot \mathbf{X}) \quad (6)$$

Из координат векторов \mathbf{X}_{JSM} , \mathbf{Y}_{JSM} и \mathbf{Z}_{JSM} составляется матрица перехода из SIII в солнечно-магнитосферную систему координат.

4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОДИСКА НА ПРОФИЛЬ МОДЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВДОЛЬ ТРАЕКТОРИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

На расстоянии от планеты r меньше $50 R_J$ потоки экранировки на магнитопаузе и поле токовой системы хвоста пренебрежимо малы по сравнению с полем магнитодиска. Во внешней магнитосфере они играют крайне важную роль, однако в связи с сильным влиянием на эти токовые системы изменчивого давления и магнитного поля солнечного ветра, подбор усредненных параметров в ней затруднен, в отсутствие информации о характеристиках солнечного ветра. Поэтому наибольший интерес представляет достаточно близкая к планете область.

Существуют различные методы оптимизации модели для соответствия наблюдаемым данным. Однако их нельзя применять вслепую, особенно когда речь заходит о модели, чьи параметры имеют определённый физический смысл. Прежде чем, например, минимизировать среднеквадратичное отклонение модельной кривой от экспериментальной, нужно иметь представление о том, как в принципе параметры влияют на ход кривой. Это поможет найти разумное начальное приближение, лучше интерпретировать результат, а в некоторых случаях заранее определить приблизительные значения параметров.

Понимание влияния параметров модели легко получить для математически простых моделей. Однако в нашем случае из-за необходимости работать с профилем магнитного поля вдоль траектории космического аппарата и отклонения направления дипольного поля Юпитера от оси вращения на 9.6° , вызывающего десятичасовые вариации в магнитном поле, влияние каждого параметра на поле не всегда очевидно. Поэтому необходимо напрямую проверить это влияние.

Модельное магнитное поле магнитодиска зависит от расстояния до планеты r , кошироты θ и трёх параметров — B_{DC} , R_{DC1} и R_{DC2} :

$$\mathbf{B}_{MD} = B_{DC} \cdot \mathbf{F}(r, \theta, R_{DC1}, R_{DC2}) \quad (7)$$

Поле диска пропорционально B_{DC} , как следует из формулы (7). Явная зависимость компонент \mathbf{F} от r , θ и параметров дана в [4]. Рассмотрим зависимость модельного магнитного поля диска от нелинейных параметров R_{DC1} и R_{DC2} . На рис. 3 изображен модуль модельного поля магнитодиска вдоль рассматриваемой траектории в зависимости от r для двух значений R_{DC1} . Видно, что его изменение практически не влияет на поле вблизи планеты, однако положение дальнего края определяет начало резкого падения магнитного поля. Видно также, что при увеличении R_{DC1} ярче проявляется максимум магнитного поля в области перед падением. Характерные периодические изменения поля связаны с периодическим изменением кошироты θ в солнечно-магнитосферной системе координат вдоль траектории из-за отклонения диполя собственного поля планеты от оси вращения.

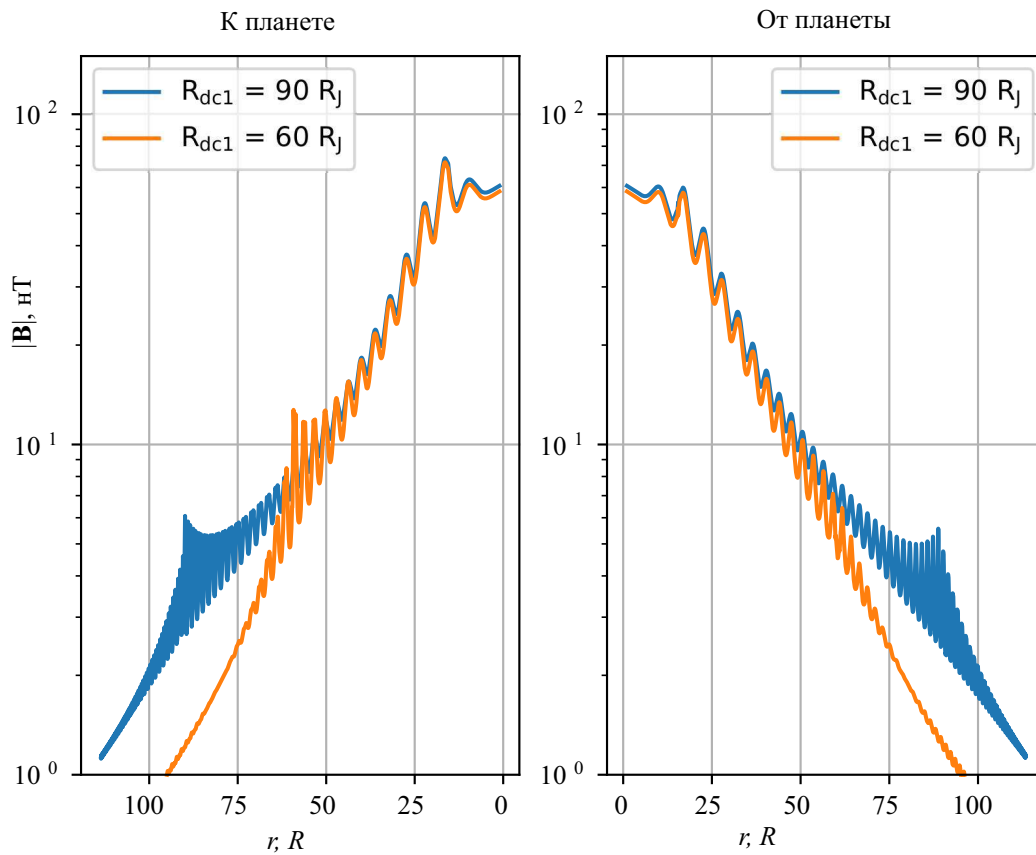


Рис. 3: Влияние параметра R_{DC1} на поле магнитодиска

На рис. 4 изображен модуль модельного поля магнитодиска вдоль рассматриваемой траектории в зависимости от r для двух значений R_{DC2} . Рис. 4 демонстрирует, что R_{DC2} мало влияет на поле вдали от планеты. Вблизи же положение внутреннего края магнитодиска определяет величину поля и может изменять её в разы.

5. ВЛИЯНИЕ ПОЛЯ МАГНИТОДИСКА НА ПРОЕКЦИЮ ТРАЕКТОРИИ

Проекция траектории космического аппарата на ионосферу вдоль силовых линий магнитного поля играет важную роль, так как с ионосферой и верхней атмосферой связаны полярные сияния, отражающие процессы в магнитосфере. На рис. 5 представлены проекции ближайшего к планете участка траектории PERI-01 согласно параболической модели и модели [9]. В них используется одна и та же модель внутреннего поля магнитодиска. В модели [9] ток убывает с расстоянием как r^{-1} , внутренний и внешний края диска расположены значительно ближе, чем в параболической модели, и учитывается ненулевая толщина токового слоя. Тем не менее, проекции траекторий практически идентичны, что говорит о том, что на данном участке траек-

тории такая проекция зависит в основном от модели собственного поля планеты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был рассмотрен круг вопросов, предваряющий оценку параметров параболической модели, наилучшим образом удовлетворяющих данным о магнитном поле космического аппарата Juno.

Был продемонстрирован простой метод перехода в солнечно-магнитосферную систему координат из SIII (1965). В области $r < 50 R_J$ было установлено, что наибольшее влияние на ход кривой имеют параметры магнитодиска, и изучен характер этого влияния. Стоит отметить, что в целом эти результаты применимы не только на этой траектории, но и при других значениях локального времени вблизи экваториальной области магнитосферы, исключая внешнюю её часть.

Было установлено, что модель и параметры магнитодиска в припланетной зоне мало влияют на проекцию траектории космического аппарата вдоль силовых линий магнитного поля на ионосферу.

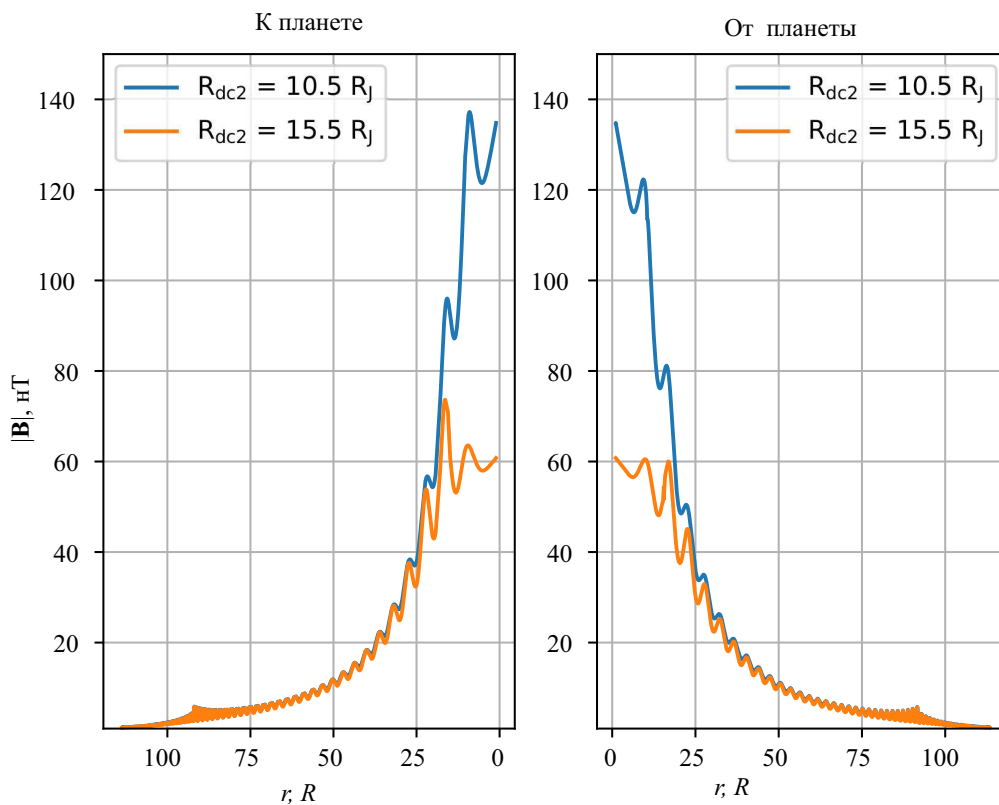


Рис. 4: Влияние параметра R_{DC2} на поле магнитодиска

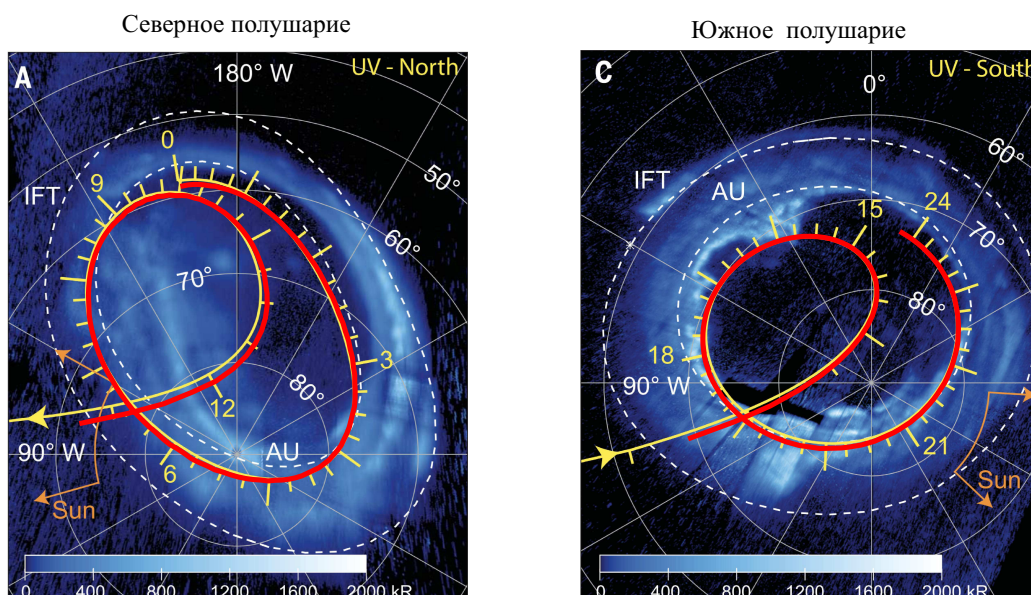


Рис. 5: Проекция траектории на ионосферу вдоль силовых линий магнитного поля. Модифицирован рис. 6 из [2]. Желтая линия — проекция согласно модели [9], красная — согласно параболоидной модели

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Минобрнауки Российской Федерации (RFMEFI61617X0084).

-
- [1] *Higgins C., Carr T., Reyes F.* Geophys. Res. Lett. 1996. **23**, N 19. P. 2653.
- [2] *Connerney J.E. P., Adriani A., Allegrini F., Bagenal F., Bolton S.I., Bonfond B., Cowley S.W. H., Gerard J.-C., Gladstone G.R., Grodent D.* et al. Science. 2017. **356**, N 6340. P. 826.
- [3] *Khurana, K.K., Kivelson M.G., Vasyliunas V.M., Krupp N., Woch J., Lagg A., Mauk W., Kurth W.S.* The configuration of Jupiter's magnetosphere. In: Jupiter. The planet, satellites and magnetosphere. Edited by Fran Bagenal, Timothy E. Dowling, William B. McKinnon. Cambridge planetary science, **1**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [4] *Alexeev I.I., Belenkaya E.S.* Ann. Geophys. 2005. **271**, N 3. P. 809.
- [5] *Belenkaya E.S.* Planetary and Space Science. 2004. **52**, N 5–6. P. 499.
- [6] *Hill T. W. J.* J. of Geophys. Res. 1979. **84**, N A11. P. 6554.
- [7] *Cowley S. W. H.* J. of Geophys. Res. 2003. **108**, N A4.
- [8] *Belenkaya, E.S., Khodachenko M.L., Alexeev I.I.* Alfvén radius — a key parameter for astrophysical magnetospheres. In: Characterizing stellar and exoplanetary environments. Springer, 2015.
- [9] *Connerney J.E.P., Acuña M.H., Ness N.F. J.* Geophys. Res.: Space. 1981. **86**, N A10. P. 8370.
- [10] *Delamere P. A., Bagenal F. J.* J. of Geophys. Res. 2010. **115**, N A10201.
- [11] *Seidelmann P., Divine N.* Geophys. Res. Lett. 1977. **4**, N 2. P. 65.
-

Analysis of paraboloid model's parameters influence on the model magnetic field along the trajectory of the Juno spacecraft

I. A. Pensionerov^a, E. S. Belenkaya, I. I. Alexeev, V. V. Kalegaev
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU). Moscow 119991, Russia
E-mail: ^apensionerov@gmail.com

In the present work we studied the behavior of the magnetic field calculated in the paraboloid model of the Jovian magnetosphere, for different values of the parameters. The most significant parameters of the model were found and their effect on the model magnetic field along the second orbital trajectory of the Juno spacecraft was studied. The influence of the magnetodisc model on the position of the spacecraft trajectory projection on the ionosphere is considered.

PACS: 94.30.-d

Keywords: planetary magnetospheres, giant planets, magnetodisk.

Received 14 May 2018.

Сведения об авторах

1. Пенсионеров Иван Андреевич — студент, ведущий программист; e-mail: pensionerov@gmail.com.
 2. Беленькая Елена Семёновна — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник.
 3. Алексеев Игорь Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией.
 4. Калегаяев Владимир Владимирович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией.
-