

УДК 52-854

МОДЕЛЬ ТОКОВОГО ДИСКА ЮПИТЕРА С ПАРАМЕТРАМИ, ОПТИМИЗИРОВАННЫМИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВО ВРЕМЯ МИССИЙ *JUNO* И *GALILEO*

© 2021 г. И. А. Пенсионеров¹, *, Е. С. Беленькая¹, И. И. Алексеев¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**pensionerov@gmail.com*

Поступила в редакцию 27.05.2020 г.

После доработки 18.09.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

Отличительной особенностью магнитосферы Юпитера является наличие в ней мощной дискообразной токовой системы – токового диска. Существует несколько моделей магнитного поля этой токовой системы. В настоящей работе была улучшена PCD (или Piecewise Current Disc) модель токового диска, построенная авторами ранее [1]. Она была адаптирована для аналитических вычислений. Была модифицирована форма поверхности токового слоя, что привело к уменьшению среднеквадратичного отклонения модели от данных магнитометров. Были оптимизированы параметры модели для уменьшения расхождений с данными космических аппаратов *Juno* и *Galileo*. PCD модель дала в среднем на 30% меньшее среднеквадратичное отклонение от наблюдений на данных *Juno* и на 10% на данных *Galileo* по сравнению с наиболее популярной на данный момент моделью токового диска Юпитера [2], параметры которой также были оптимизированы для каждого витка КА.

DOI: 10.31857/S0023420621030092

ВВЕДЕНИЕ

Магнитосфера Юпитера сильно отличается от магнитосферы Земли. Характерными особенностями, определяющими динамику магнитосферы Юпитера, являются очень сильное магнитное поле планеты, ее быстрое вращение и наличие мощного внутримангнитосферного источника плазмы – вулканически активного спутника Ио (см. например [3]). Благодаря этим особенностям в магнитосфере Юпитера образуются мощные азимутальные и радиальные токи в форме кольца вокруг планеты. Эту токовую систему называют токовым диском или магнитодиском. Поле магнитодиска является причиной того, что магнитосфера Юпитера столь велика [4–7]. Расстояние от центра планеты до подсолнечной точки на магнитопаузе может превышать $100R_J$ (радиусов Юпитера).

К настоящему моменту создано множество моделей магнитодиска Юпитера. Их можно разделить на два типа – самосогласованные и эмпирические. Самосогласованные модели – это физические модели, учитывающие баланс сил и свойства магнитосферной плазмы. Впервые такая модель была предложена в работе [8]. Эта мо-

дель учитывала центробежные силы и силы давления плазмы, причем давление считалось изотропным. Позже, в работах [9] и [10] модель [8] была усовершенствована, в частности, в работе [10] была учтена анизотропия давления плазмы.

Настоящая работа посвящена эмпирическому моделированию токового диска. При этом подходе некое распределение токов или потенциал магнитного поля задаются априори, а затем свободные параметры модели оптимизируются согласно данным наблюдений. В работе [2] была создана модель токового диска Юпитера, которая легла в основу многих последующих исследований. Ниже эта модель будет рассмотрена подробно. Модель [2] также была адаптирована для магнитосферы Сатурна и использована для моделирования данных с *Pioneer-11*, *Voyager* и *Cassini* [11–15].

В работе [16] был предложен иной подход к описанию магнитного поля токового диска в терминах эйлеровых потенциалов. В частности, этот подход упрощает учет азимутального поля. Впоследствии в работе [17] эта модель была существенно улучшена: было учтено отклонение токового диска от плоскости магнитного экватора, вызванное конечной скоростью распространения

альфвеновских волн. В работе [18] была представлена глобальная модель магнитосферы Юпитера, учитывающая поле токового диска, токовой системы хвоста и токов экранировки на магнитопаузе. В этой модели диск плоский бесконечно тонкий, находящийся в магнитном экваторе. Плотность токов в нем обратно пропорциональна квадрату расстояния от оси диполя планеты.

В работе [1] была представлена новая модель токового диска, основанная на подходах [2, 18], [17]. Ниже модель [1] будет рассмотрена подробно. В настоящей работе мы улучшили эту модель, а также провели масштабные тесты ее эффективности и сравнение с моделью [2] с использованием данных космических аппаратов *Juno* и *Galileo*.

PCD МОДЕЛЬ

Модель токового диска с кусочно заданной плотностью тока или Piecewise Current Disc (далее PCD) была представлена в работе [1]. Она основана на модели [2] (далее CAN). Модель CAN представляет собой аксиально симметричное токовое кольцо с внутренним радиусом R_0 и внешним радиусом R_1 . Диск в этой модели имеет постоянную толщину $2D$ и расположен на магнитном экваторе планеты. В этом кольце течет азимутальный ток с плотностью I , постоянной вдоль оси диполя планеты, но зависящей от расстояния до оси диполя планеты ρ как

$$\begin{aligned} I(\rho) &= 0, \quad \rho < R_0, \\ I(\rho) &= I_0/\rho, \quad R_0 \leq \rho \leq R_1, \\ I(\rho) &= 0, \quad \rho > R_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Модель CAN хорошо описывает магнитное поле токового диска на расстояниях от центра планеты меньше $30R_1$, но не подходит для более удаленных частей магнитосферы Юпитера. Для решения этой проблемы в работе [1] для PCD модели была выбрана иная зависимость плотности тока от расстояния до оси диполя

$$\begin{aligned} I(\rho) &= 0, \quad \rho \leq R_{in}, \\ I(\rho) &= I_0/\rho, \quad R_{in} < \rho \leq R_1, \\ I(\rho) &= I_0 R_1/\rho^2, \quad R_1 < \rho \leq R_2, \\ I(\rho) &= I_0 R_1/(\rho R_2), \quad R_2 < \rho \leq R_{out}, \\ I(\rho) &= 0, \quad \rho > R_{out}. \end{aligned} \quad (2)$$

При приблизительно равном полном токе в CAN и PCD моделях, в последней ток распределен на большем диапазоне расстояний.

Хотя PCD модель с плотностью тока, заданной выражением (2), описывала данные с магнитометра КА *Juno* на орбите PJ-01 лучше, чем модель CAN (т.е. давала меньшую среднеквадратичную

ошибку), по сравнению с CAN она была неудобна в использовании. Для поля диска CAN с плотностью тока пропорциональной $1/\rho$ существуют аналитические аппроксимации, предложенные в оригинальной статье [2] и позже в бездивергентной форме в работе [19]. Для вычисления же поля PCD диска из-за наличия его части с плотностью тока пропорциональной $1/\rho^2$ приходилось проводить трудоемкие численные расчеты. В этой работе мы изменили выражение для плотности тока таким образом, что теперь оно содержит только части пропорциональные $1/\rho$, а значит легко вычисляемые с помощью аппроксимационных формул (9a, b) и (13a, b) в [19]

$$\begin{aligned} I(\rho) &= 0, \quad \rho \leq R_{in}, \\ I(\rho) &= I_0/\rho, \quad R_{in} < \rho \leq R_1, \\ I(\rho) &= I_1/\rho, \quad R_1 < \rho \leq R_2, \\ I(\rho) &= I_2/\rho, \quad R_2 < \rho \leq R_{out}, \\ I(\rho) &= 0, \quad \rho > R_{out}. \end{aligned} \quad (3)$$

При этом плотность перестала быть непрерывной по ρ , однако совпадение модели с наблюдениями не ухудшилось.

Также, для улучшения совпадения модели с наблюдениями во внешней части магнитосферы в работе [1] было учтено отклонение токового диска от магнитного экватора с помощью модели, описанной в работах [17, 20]. В этой модели отклонение центра токового диска от магнитного экватора выражается в магнитных координатах как

$$z_{cs} = \rho \operatorname{tg}(\psi_0) \left[\frac{x_0}{x} \operatorname{th}(x/x_0) \cos(\phi - \delta) + \cos(\phi) \right]; \quad (4)$$

$$\delta(\rho) = \pi - \frac{\Omega_J \rho_0}{v_0} \ln \operatorname{ch}(\rho/\rho_0). \quad (5)$$

Здесь x — это расстояние вдоль оси Солнце—Юпитер, ρ и ϕ — это цилиндрические магнитные координаты (в магнитных координатах ось Z совпадает с диполем планеты, а ось X направлена в сторону нулевого меридиана, определяемого направлением диполя в географических координатах планеты, Y дополняет правую тройку), ψ_0 — это угол между диполем собственного магнитного поля планеты и ее осью вращения, Ω_J — это угловая скорость вращения Юпитера, а x_0 , v_0 и ρ_0 — параметры модели, описанные в [20]. Модели [17, 20] основаны на данных пролетов КА *Voyager-1, 2* и *Pioneer-10*. В этой работе мы использовали улучшенную модель кривизны токового диска [21], полученную на основе данных КА *Galileo*. В географических координатах Юпитера по-

ложение токового диска описывается следующей формулой:

$$z_{cs} = \left(\sqrt{\left(x_H \operatorname{th} \frac{x}{x_H} \right)^2 + y^2} \right) \operatorname{tg}(\Psi_0) \cos(\phi - \phi') + x \left(1 - \operatorname{th} \left| \frac{x_H}{x} \right| \right) \operatorname{tg} \theta_{sun}. \quad (6)$$

Здесь x и y это декартовы Jupiter-Sun-orbit (JSO) координаты. В JSO системе отсчета ось X направлена на Солнце, ось Z перпендикулярна плоскости орбиты Юпитера, а Y завершает правую тройку. θ_{sun} — это угол между линией Солнце-Юпитер и географическим экватором планеты, ϕ — это азимутальный угол в правой системе географических координат, x_H — это параметр модели, описанный в [21]. ϕ' — долгота, на которой токовый диск достигает максимального поднятия на данном расстоянии. Он равен сумме долготы нулевого меридиана, определяемого положением диполя планеты в географических координатах ϕ_0 , и двух компонент, описывающих запаздывание токового диска.

$$\phi' = \phi_0 + \delta_{wave} + \delta_B. \quad (7)$$

δ_B описывает запаздывание, связанное с наличием радиального тока в токовом диске, а следовательно, с наличием азимутальной составляющей магнитного поля. δ_{wave} описывает отставание, вызванное конечной скоростью распространения альфвеновских волн, передающих текущее положение диполя планеты (диполь Юпитера наклонен приблизительно на 10° относительно оси вращения планеты). Выражения для δ_B и δ_{wave} даны в формулах (21) и (23), соответственно, в работе [21].

МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО ПОЛЯ JRM09. ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ PCD МОДЕЛИ

Магнитное поле в магнитосфере Юпитера можно разделить на две составляющие: собственное поле планеты \mathbf{V}_{int} и поле магнитосферных токовых систем \mathbf{V}_m :

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_{int} + \mathbf{V}_m. \quad (8)$$

Собственное поле планеты вне ее обычно выражают через мультипольное разложение. Коэффициенты при собственных функциях в этом разложении находят с помощью минимизации среднеквадратичного отклонения магнитного поля, измеренного магнитометром на космических аппаратах, от предсказанного моделью. Строго говоря, коэффициенты в разложении собственного

поля планеты и параметры модели магнитосферы необходимо подбирать одновременно, так как на практике мы, очевидно, не можем разделить поле на составляющие. Однако на деле, параметры модели внутреннего поля все же ищут отдельно, используя данные, собранные на достаточно малом расстоянии от планеты, где вклад поля магнитосферных токовых систем пренебрежимо мал по сравнению с собственным полем планеты. Модель собственного магнитного поля Юпитера JRM09 [22] построена по данным ближе $7R_J$ первых девяти орбит космического аппарата *Juno*. В качестве модели поля магнитосферных токов использовалась модель CAN с параметрами, подобранными для пролетов предыдущих КА. Согласно [22], индукция поля магнитосферных источников составляла лишь несколько десятых долей процента от полной индукции на используемых участках траекторий, и следовательно, тот факт, что коэффициенты модели CAN были зафиксированы в процессе подбора коэффициентов JRM09, мало повлиял на результат.

В качестве модели \mathbf{V}_{int} в этой работе мы использовали JRM09, так как на данный момент она является наиболее точной. В качестве модели поля \mathbf{V}_m мы используем PCD. Однако PCD описывает только поле токового диска Юпитера и не учитывает поля других токовых систем (например, токовой системы хвоста и токов экранировки на магнитопаузе). Поэтому для подбора параметров PCD модели мы ограничились данными в области ближе $60R_J$, где поле токового диска обычно является доминирующей составляющей \mathbf{V}_m . Также мы не использовали данные ближе $5R_J$. Поле вблизи планеты очень велико (порядка $10^5 - 10^6$ нТ), и, хотя JRM09 описывает собственное поле планеты вблизи нее с относительно высокой точностью порядка сотен нТ, ошибка на малых радиальных расстояниях оказывается одного порядка с полем диска.

Для тестирования PCD модели и сравнения ее с CAN мы использовали данные космических аппаратов *Juno* и *Galileo*. Около Юпитера пролетали другие космические аппараты: *Pioneer-10, 11, Voyager-1, 2, Cassini, Ulysses, New Horizons*, однако *Juno* и *Galileo* вышли на орбиту вокруг планеты и предоставили данные не с одного пролета, а множества орбит с общим временем наблюдения порядка нескольких лет. Орбиты *Juno* имеют высокий эксцентриситет и являются полярными. Большая часть каждой из орбит находится в приблизительно одном и том же локальном времени. За период наблюдений с VII.2016 по X.2018 траектории покрыли локальные времена с 06.00 до

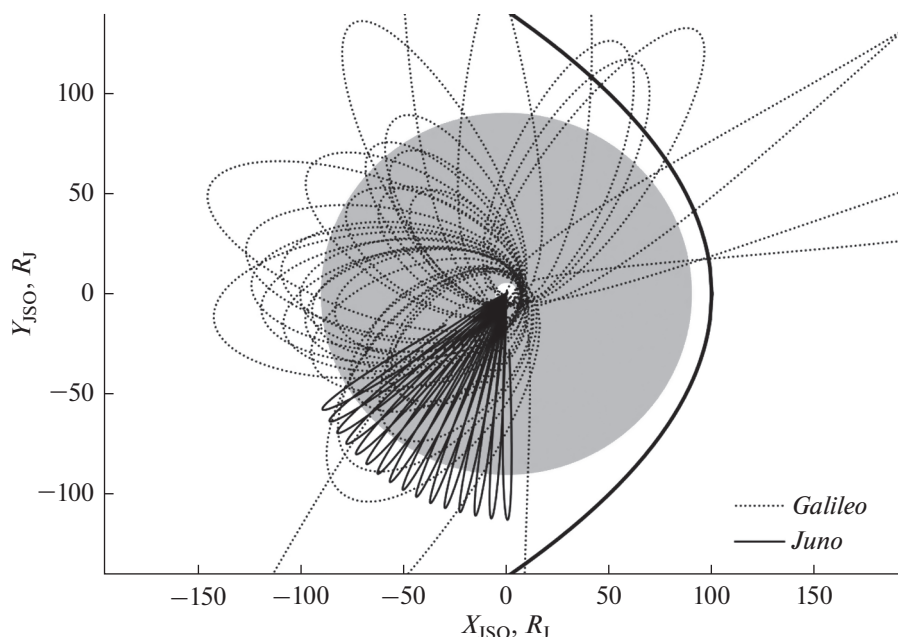


Рис. 1. Траектории КА *Galileo* и *Juno*, используемые в данной работе в J2000 координатах. Серое кольцо — схематическое изображение токового диска. Также показана магнитопауза согласно модели [18] с расстоянием до подсолнечной точки $100R_J$.

01.00, то есть наблюдения *Juno* находятся в утренне-ночной зоне. Хотя траектории *Juno*, в принципе, покрывают весь интересующий нас диапазон радиальных расстояний, данные магнитометра ближе $15R_J$ недоступны на момент написания работы для большей части траекторий. В этой работе мы использовали орбиты с PJ-00 по PJ-16 (PJ здесь означает *peri-jove*, то есть перигеи орбиты вокруг Юпитера), данные с которых были публично доступны на момент проведения расчетов. Траектории *Galileo* являются экваториальными, и поэтому каждая траектория дает информацию во всех локальных временах, но диапазон радиальных расстояний более ограничен, поскольку КА редко пролетал ближе $20R_J$ от центра планеты. Мы использовали все 35 траекторий *Galileo* за исключением ORB-00, данные с которой лежат на радиальных расстояниях вне интересующего нас диапазона, и траектории ORB-05, являющейся технической. На рис. 1 представлены траектории *Juno* и *Galileo*, использованные для тестирования модели.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ PCD МОДЕЛИ С ДАННЫМИ МАГНИТОМЕТРОВ КА *JUNO* И *GALILEO*

Модели PCD и CAN учитывают только азимутальные токи в токовом диске и не включают ра-

диальные токи диска и замыкающие их продольные токи в магнитосфере, а следовательно, дают азимутальное магнитное поле равное нулю. Поэтому мы считаем среднеквадратичное отклонение S только по ρ и z компонентам магнитного поля в цилиндрической магнитной системе координат

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (B_{\rho}^k - \Delta B_{\rho}^k)^2 + (B_z^k - \Delta B_z^k)^2}. \quad (9)$$

Здесь n — число точек наблюдений, $B_{\rho,z}$ — это компоненты магнитного поля диска согласно модели (PCD или CAN), $\Delta B_{\rho,z}$ это компоненты разности наблюдаемого поля и собственного поля планеты согласно модели JRM09 (т.е. $\Delta \mathbf{B} = \mathbf{B}_{obs} - \mathbf{B}_{JRM09}$). Для каждой траектории мы находили в диапазоне радиальных расстояний от 5 до $60R_J$ оптимальные в смысле минимального S параметры для PCD и CAN моделей с помощью пакета SciPy.

Для модели CAN мы подбирали параметры I_0 , R_0 и R_1 , являющиеся множителем в плотности тока, внутренним и внешним радиусами диска, соответственно. Полутолщину D мы зафиксировали на значении $2.5R_J$, использованном в оригинальной статье [2]. Для PCD полутолщина также фиксирована и равна $2.5R_J$ для всех трех отрезков

Таблица 1. Параметры и среднеквадратичные отклонения от наблюдений результатов моделей CAN и PCD для всех использованных траекторий *Juno*

	CAN				PCD							
	I_0	R_0	R_1	RMS	I_0	I_1	I_2	R_{in}	R_{out}	R_1	R_2	RMS
	MA/ R_J	R_J		нТ	MA/ R_J			R_J				нТ
PJ-00	14.0	5.0	75	2.0	20.0	15.3	11.1	6.0	98.2	21.1	43.5	1.6
PJ-01	21.3	6.2	67	6.1	24.5	17.8	14.9	7.2	83.3	29.9	51.0	4.4
PJ-02	21.7	6.2	55	9.0	24.4	18.4	11.2	10.5	80.5	29.3	49.7	6.1
PJ-03	18.8	5.0	67	6.8	22.3	17.7	11.1	7.7	83.8	27.8	52.1	5.5
PJ-04	17.3	5.0	71	5.0	19.4	12.6	11.9	7.2	94.4	39.0	51.2	3.3
PJ-05	17.8	7.0	69	5.6	20.9	16.7	12.3	10.0	80.3	27.3	50.1	3.7
PJ-06	18.1	7.9	69	5.4	21.1	16.8	12.4	9.0	80.2	27.1	50.1	4.0
PJ-07	18.2	5.0	70	6.1	24.1	15.8	13.8	8.2	81.6	31.2	50.9	4.2
PJ-08	18.5	5.0	70	6.8	22.4	17.4	15.5	6.2	76.3	33.9	47.3	3.8
PJ-09	19.7	5.0	69	6.2	22.9	16.0	14.7	6.8	80.1	33.5	50.3	4.1
PJ-10	16.2	5.0	70	7.0	20.6	13.4	10.9	8.6	80.3	33.2	49.6	4.5
PJ-11	19.3	5.0	70	6.8	21.9	18.6	13.8	5.9	80.0	27.6	49.7	4.5
PJ-12	16.8	5.0	68	6.2	18.6	10.0	11.7	6.8	81.1	40.0	49.1	5.0
PJ-13	20.8	7.9	66	7.8	24.1	17.9	12.6	8.4	80.1	27.4	50.1	5.9
PJ-14	17.0	5.7	57	10.0	21.7	15.0	8.0	4.0	83.8	35.9	53.8	7.9
PJ-15	23.2	5.0	51	6.8	24.7	16.1	13.4	4.0	81.1	28.7	50.7	3.9
PJ-16	18.4	5.0	70	8.3	24.4	18.7	13.2	4.0	78.9	26.8	44.3	5.5

диска. Таким образом, свободными параметрами для PCD модели являются $I_0, I_1, I_2, R_{in}, R_1, R_2, R_{out}$ (см. формулу (3)).

В табл. 1 и 2 выписаны оптимальные параметры PCD и CAN моделей для каждой из траекторий космических аппаратов *Juno* и *Galileo*, соответственно. Также в таблицах указаны среднеквадратичные отклонения моделей от наблюдений. На данных *Juno* PCD имеет в среднем на 30% меньшую среднеквадратичную ошибку, чем CAN. На данных *Galileo* отличия менее явные, и ошибка PCD в среднем на 10% меньше, чем у CAN. Сильнее всего результаты двух моделей различаются в зоне дальше $30R_J$, т.е. за пределами области применимости модели CAN.

На траекториях *Galileo* обе модели демонстрируют более высокую погрешность по сравнению с траекториями *Juno*. Возможной причиной этого являются характеристики орбит этих космических аппаратов. Траектории *Galileo* лежат в широ-

ком диапазоне местных времен, в то время как каждая из орбит *Juno* почти целиком проходит в одном местном времени, за исключением короткого участка около перицентра. Плотность токов в магнитодиске Юпитера асимметрична по местному времени [23], а PCD и CAN используют аксиально симметричное распределение, и поэтому хуже аппроксимируют поле вдоль траекторий *Galileo*, чем вдоль траекторий *Juno*.

На рис. 2 и 3 сравниваются ρ и z компоненты разности наблюдаемого поля и модели внутреннего поля планеты JRM09 с предсказаниями PCD и CAN моделей для космических аппаратов *Juno* и *Galileo*, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе была улучшена модель магнитного поля токового диска Юпитера, предложенная в [1]. PCD модель была адаптирована

Таблица 2. Параметры и среднеквадратичные отклонения от наблюдений результатов моделей CAN и PCD для всех использованных траекторий *Galileo*

	CAN				PCD							
	I_0	R_0	R_1	RMS	I_0	I_1	I_2	R_{in}	R_{out}	R_1	R_2	RMS
	MA/ R_j	R_j		нТ	MA/ R_j			R_j				нТ
ORB-02	19.0	11.0	57	9.8	18.3	16.9	11.1	10.9	79.8	26.7	49.8	7.7
ORB-03	17.5	10.7	67	8.9	17.8	15.9	11.1	10.6	79.8	26.7	49.8	7.1
ORB-04	15.4	9.6	72	12.6	14.5	16.7	8.2	9.3	79.2	25.2	48.7	10.0
ORB-06	18.7	9.5	64	9.4	18.4	16.4	11.5	9.3	79.9	26.9	49.9	5.0
ORB-07	10.0	5.0	90	10.0	45.5	12.8	13.6	6.2	100.0	38.2	47.2	8.1
ORB-08	18.9	9.7	66	9.5	19.3	16.8	10.1	9.5	79.4	27.5	49.2	8.3
ORB-09	17.6	9.9	68	11.8	17.9	15.4	11.2	9.9	79.8	26.5	49.8	9.3
ORB-10	19.6	10.6	53	9.6	18.2	17.6	11.7	10.6	79.9	27.1	49.9	7.8
ORB-11	17.2	10.2	65	12.8	17.7	14.8	9.2	10.1	79.3	27.6	49.0	10.6
ORB-12	20.7	9.6	60	13.9	20.2	17.6	11.6	9.1	79.9	27.0	49.9	12.3
ORB-13	20.0	9.1	100	17.4	17.1	35.4	20.1	8.8	82.1	31.5	52.3	17.4
ORB-14	19.4	10.8	52	12.5	15.5	17.4	11.8	9.8	80.0	25.5	49.9	12.7
ORB-15	18.0	9.2	94	10.5	18.0	16.4	11.8	8.8	80.0	26.6	49.9	10.0
ORB-16	18.1	9.1	100	12.3	15.6	28.9	16.9	8.8	81.2	29.3	51.0	10.6
ORB-17	19.8	10.3	51	11.9	17.3	19.6	9.7	10.2	79.6	27.1	48.7	12.2
ORB-18	17.3	9.4	100	9.1	17.8	16.9	12.0	9.2	80.0	26.4	50.0	7.7
ORB-19	16.3	9.2	60	11.6	16.8	12.1	9.4	9.1	79.5	26.7	49.6	8.6
ORB-20	17.9	10.5	51	11.4	13.3	21.5	14.9	9.7	80.8	22.3	50.1	10.5
ORB-21	17.8	9.4	51	12.8	16.0	14.8	10.4	9.2	79.7	26.4	49.8	12.6
ORB-22	16.5	7.3	100	16.9	15.8	19.3	12.3	7.3	80.1	26.1	50.1	16.8
ORB-23	19.3	8.1	50	12.9	17.9	16.3	11.8	7.8	79.9	26.4	49.9	11.9
ORB-24	19.9	7.9	50	15.9	19.5	14.9	5.9	7.8	79.3	30.5	49.9	15.8
ORB-25	16.0	6.2	100	15.1	15.5	14.9	15.9	6.1	100.0	30.7	49.4	14.9
ORB-26	23.0	7.3	100	14.3	20.6	28.5	19.9	6.9	83.6	22.7	54.5	14.6
ORB-27	18.9	7.4	90	14.2	19.1	17.4	14.8	7.3	81.1	28.4	50.9	14.3
ORB-29	16.5	6.6	100	11.8	15.9	19.6	13.2	6.5	80.3	26.5	50.3	10.6
ORB-30	19.1	7.8	50	19.9	19.6	10.9	1.0	7.8	78.4	35.2	49.1	17.6
ORB-31	20.1	7.4	50	15.7	21.4	7.5	10.6	7.4	79.7	27.1	49.6	15.5
ORB-32	20.7	7.0	50	14.6	19.6	19.7	3.7	6.7	79.3	26.4	51.4	13.6
ORB-33	19.0	6.4	40	13.8	19.3	3.2	1.2	6.4	78.2	32.7	48.5	11.8
ORB-34	19.0	7.8	50	12.4	21.5	9.0	7.2	7.8	79.3	27.4	49.4	11.2
ORB-28A	18.0	7.7	50	15.8	18.5	5.2	2.7	7.7	78.3	35.9	48.5	13.7
ORB-28B	15.9	6.6	100	6.5	10.6	50.0	26.0	5.9	83.4	31.1	53.5	5.5

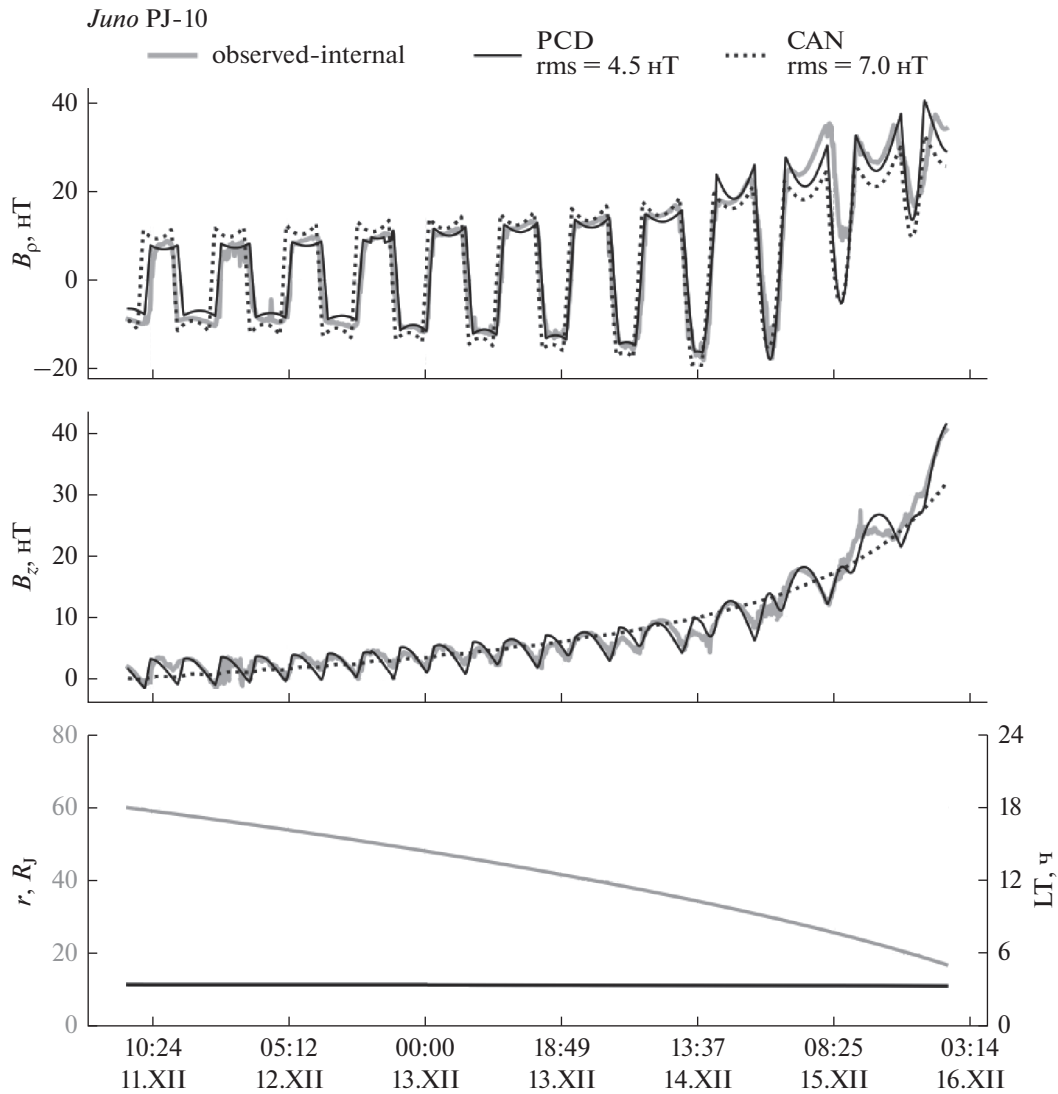


Рис. 2. Сравнение разности наблюдаемого поля и внутреннего поля согласно модели JRM09 с полем PCD и CAN моделей на траектории PJ-10 космического аппарата *Juno*. На первой и второй панелях изображены r и z компоненты в магнитной системе координат, соответственно. На третьей панели изображены радиальное расстояние от КА до центра планеты и его локальное время.

для использования аналитических аппроксимаций, описанных в работе [19], посредством изменения формы зависимости плотности тока от расстояния. Использование аналитических аппроксимаций существенно упрощает и ускоряет расчеты с помощью PCD модели. При этом магнитное поле диска с новой зависимостью плотности тока описывает наблюдения не хуже прошлой итерации модели. Модель кривизны диска [20] была заменена на более точную [21]. Новая версия PCD модели была протестирована на всех доступных измерениях магнитного поля космическими аппаратами *Juno* и *Galileo*. При сравнении с наиболее популярной на текущий момент моде-

лью CAN [2], PCD модель дает в среднем на 30% меньшую ошибку для данных *Juno* и на 10% меньшую ошибку для данных *Galileo*.

Модель CAN применима на расстояниях от центра планеты, меньших, чем $\sim 30 R_J$. PCD модель хорошо описывает наблюдения на расстояниях вплоть до $\sim 60 R_J$. Чтобы описать магнитное поле на более далеких расстояниях от планеты, необходимо включить в модель другие магнитосферные токовые системы, в частности, токовую систему хвоста и токи экранировки на магнитопаузе, как это сделано, например, в [18]. Также модель не описывает радиальные токи в токовом диске и систему продольных токов, замыкающую их.

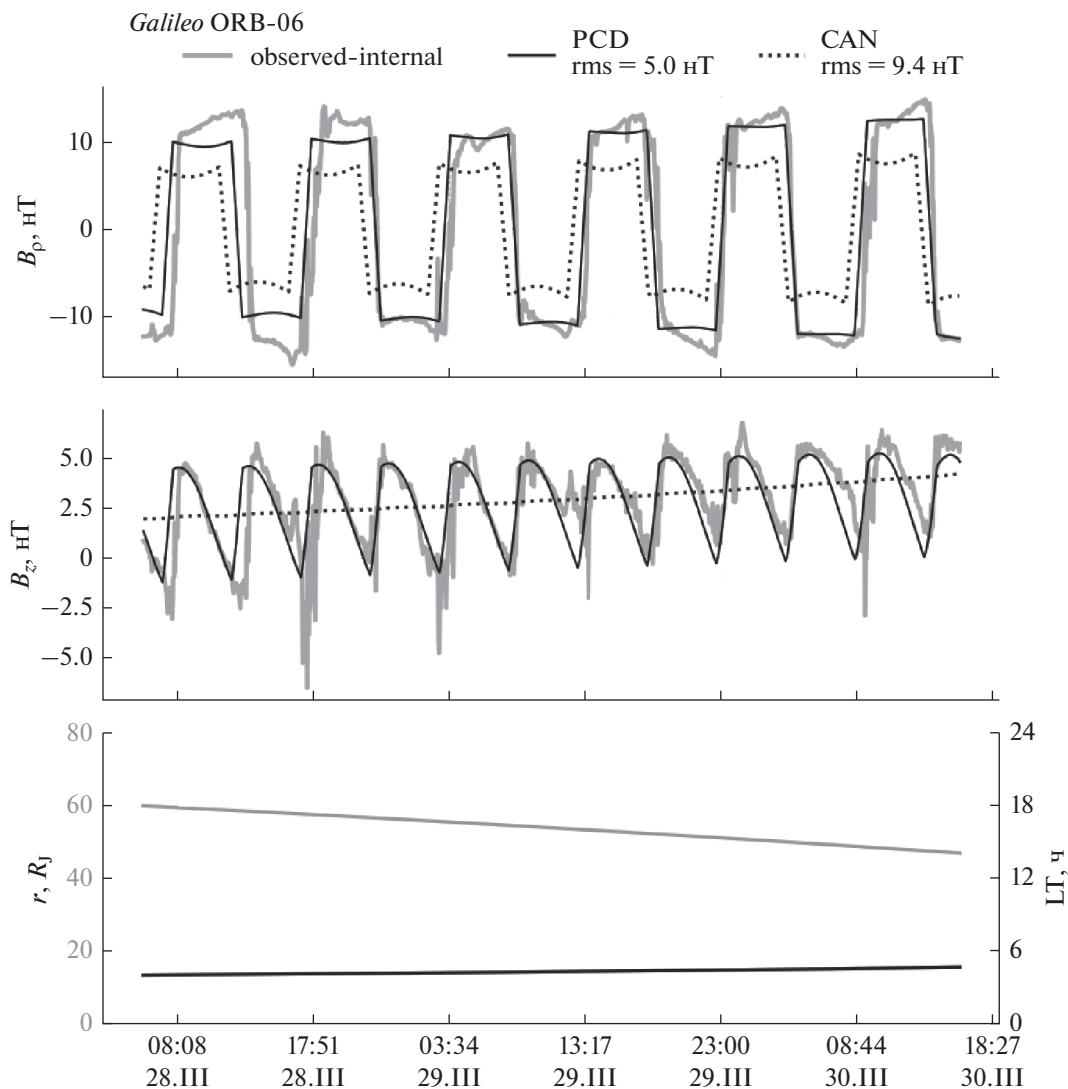


Рис. 3. Сравнение разности наблюдаемого поля и внутреннего поля согласно модели JRM09 с полем PCD и CAN моделей на траектории ORB-06 космического аппарата *Galileo*.

Авторы признательны правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039). Данные магнитометров с КА *Juno* и *Galileo* получены с помощью Planetary Data System (PDS; <https://pds-ppi.igpp.ucla.edu>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pensionerov I.A. et al. Model of jupiter's current sheet with a piecewise current density // J. Geophysical Research: Space Physics. 2019. V. 124. № 3. P. 1843–1854.
2. Connerney J.E.P., Acuña M.H., Ness N.F. Modeling the Jovian current sheet and inner magnetosphere // J. Geophysical Research: Space Physics. 1981. V. 86. № A10. P. 8370–8384.
3. Bolton S.J. et al. Jupiter's magnetosphere: Plasma sources and transport // Space Science Reviews. 2015. V. 192. № 1–4. P. 209–236.
4. Hill T.W. Inertial limit on corotation // J. Geophysical Research. 1979. V. 84. № A11. P. 6554.
5. Vasylunas V.M. Plasma distribution and flow. Physics of the jovian magnetosphere / Ed. Dessler A.J., Cambridge and New York, Cambridge University Press. 1983. P. 395–453.
6. Goertz C.K., Ip W.-H. A dawn-to-dusk electric field in the Jovian magnetosphere // Planetary and Space Science. 1984. V. 32. № 2. P. 179–185.
7. Bagenal F. The magnetosphere of Jupiter: Coupling the equator to the poles // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2007. V. 69. № 3. P. 387–402.
8. Caudal G. A self-consistent model of Jupiter's magnetodisc including the effects of centrifugal force and

- pressure // *J. Geophysical Research*. 1986. V. 91. № A4. P. 4201.
9. *Nichols J.D.* Magnetosphere-ionosphere coupling in Jupiter's middle magnetosphere: Computations including a self-consistent current sheet magnetic field model // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2011. V. 116. № A10.
 10. *Nichols J.D., Achilleos N., Cowley S.W.H.* A model of force balance in Jupiter's magnetodisc including hot plasma pressure anisotropy // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. № 12. P. 10, 185–110, 206.
 11. *Bunce E.J., Cowley S.W.H.* A note on the ring current in Saturn's magnetosphere: Comparison of magnetic data obtained during the Pioneer-11 and Voyager-1 and -2 fly-bys // *Annales Geophysicae*. 2003. V. 21. № 3. P. 661–669.
 12. *Bunce E.J. et al.* Cassini observations of the variation of Saturn's ring current parameters with system size // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2007. V. 112. № A10.
 13. *Bunce E.J. et al.* Magnetic field structure of Saturn's dayside magnetosphere and its mapping to the ionosphere: Results from ring current modeling // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2008. V. 113. № A2.
 14. *Connerney J.E.P., Acuña M.H., Ness N.F.* Currents in Saturn's magnetosphere // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 1983. V. 88. № A11. P. 8779–8789.
 15. *Giampieri G., Dougherty M.K.* Modelling of the ring current in Saturn's magnetosphere // *Annales Geophysicae*. 2004. V. 22. № 2. P. 653–659.
 16. *Goertz C.K.* The current sheet in Jupiter's magnetosphere // *J. Geophysical Research*. 1976. V. 81. № 19. P. 3368–3372.
 17. *Khurana K.K.* Euler potential models of Jupiter's magnetospheric field // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 1997. V. 102. № A6. P. 11295–11306.
 18. *Alexeev I.I., Belenkaya E.S.* Modeling of the Jovian magnetosphere // *Annales Geophysicae*. 2005. V. 23. № 3. P. 809–826.
 19. *Edwards T.M., Bunce E.J., Cowley S.W.H.* A note on the vector potential of Connerney et al.'s model of the equatorial current sheet in Jupiter's magnetosphere // *Planetary and Space Science*. 2001. V. 49. № 10–11. P. 1115–1123.
 20. *Khurana K.K.* A generalized hinged-magnetodisc model of Jupiter's nightside current sheet // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 1992. V. 97. № A5. P. 6269.
 21. *Khurana K.K.* Global structure of Jupiter's magnetospheric current sheet // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. № A7.
 22. *Connerney J.E.P. et al.* A new model of Jupiter's magnetic field from Juno's first nine orbits // *Geophysical Research Letters*. 2018. V. 45. № 6. P. 2590–2596.
 23. *Lorch C.T.S. et al.* Local Time Asymmetries in Jupiter's Magnetodisc Currents // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2020. V. 125. № 2.