

# Магнитосферы Меркурия, Земли и планет-гигантов — Юпитера и Сатурна

И. И. Алексеев

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.  
E-mail: alexeev@dec1.sinp.msu.ru

Статья поступила 24.01.2010, подписана в печать 26.02.2010

Приведены краткие сведения о магнитосферах планет Солнечной системы, обладающих собственным магнитным полем, — Меркурия, Земли, Юпитера и Сатурна. Построена универсальная модель магнитосферы планеты. Приведены модификации этой модели применительно к каждой планете в отдельности. Предложенные модели описывают основные физические процессы, контролирующие структуру и динамику магнитосферы. Результаты модельных расчетов сопоставлены с прямыми измерениями магнитного поля и потоков заряженных частиц в окрестности этих планет, которые выполнены во время полетов космических аппаратов.

*Ключевые слова:* магнитосферы планет, взаимодействие магнитосфера — солнечный ветер.

УДК: 551.510, 523.4. PACS: 94.30.vi, 96.15.hm.

## Введение

Прошедшие 52 года космической эры, которая началась 4 октября 1957 г. пуском первого советского спутника Земли, были отмечены полетами многих космических аппаратов (автоматических межпланетных станций), посетивших окрестности почти всех планет Солнечной системы. При этом было непосредственно измерено магнитное поле планет. Наши ближайшие соседи — Венера и Марс — оказались лишенными собственного магнитного поля. А остальные — Меркурий, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — подобно Земле обладают собственным планетарным магнитным полем [1]. Магнитное поле отклоняет набегающий сверхзвуковой поток плазмы солнечного ветра, формируя магнитосферу — полость, свободную (или почти свободную) от плазмы солнечного ветра. Около Урана и Нептуна состоялся лишь единственный пролет американского космического аппарата «Вояджер-2», и имеющиеся к настоящему моменту сведения о структуре этих магнитосфер оставляют чересчур широкое поле для спекуляций [2]. Далее мы ограничимся лишь намагниченными планетами Меркурием, Землей, Юпитером и Сатурном. Естественно, за прошедшие годы магнитосфера Земли исследована многочисленными спутниками гораздо более детально, чем магнитосферы далеких планет.

Самое мощное магнитное поле имеет Юпитер, магнитный момент которого примерно в 500 000 раз больше магнитного момента Земли [3]. Самое слабое поле у Меркурия (магнитный момент примерно в 3000 раз меньше земного) [4]. Мы можем сравнивать магнитосферы планет, магнитные моменты которых меняются на восемь порядков. Характерные размеры магнитосфер (расстояние от центра планеты до подсолнечной точки) изменяются почти в две тысячи раз. При этом магнитное поле внутри магнитосферы в подсолнечной точке определяется динамическим давлением солнечного ветра, и оно обратно пропорционально гелиоцентрическому расстоянию. Это поле убывает в 25 раз от Меркурия к Сатурну. В таблице приведены основные параметры магнитосфер, рассматриваемых нами планет. Столбцы таблицы слева направо содержат  $M_p$  — магнитный

## Основные характеристики планетарных магнитосфер

Планета	$M_p$ , Г·м <sup>3</sup>	$r_o$ , а.е.	$R_s$ , тыс. км	$B_m$ , нТ	$\theta_p$ , град
Меркурий	$2.84 \cdot 10^{12}$	0.38	3.4	196.0	55
Земля	$7.86 \cdot 10^{15}$	1	69.1	74.5	15
Юпитер	$1.53 \cdot 10^{20}$	5.2	5720	10.0	12
Сатурн	$4.6 \cdot 10^{18}$	9.54	1326	7.8	8

момент планеты,  $r_o$  — радиус ее орбиты вокруг Солнца,  $R_s$  — расстояние до магнитопаузы,  $B_m$  — поле в подсолнечной точке магнитопаузы и  $\theta_p$  — угловой радиус полярной шапки.

Характерным свойством бесстолкновительной плазмы солнечного ветра является ее высокая проводимость. Токи, возникающие в плазме при столкновении с планетарным магнитным полем, образуют тонкие токовые слои. Их характерная толщина оказывается сравнима с минимальным плазменным масштабом — ларморовским радиусом ионов или ионной инерционной длиной. Токи на магнитопаузе препятствуют взаимопроникновению планетарного магнитного поля в солнечный ветер и межпланетного поля внутрь магнитосферы. В первом приближении граница магнитосферы может рассматриваться как граница между плазмой и магнитным полем, поэтому эта граница и названа магнитопаузой. Сильная анизотропия коэффициентов переноса в замагниченной плазме и сверхзвуковая скорость потока приводят к формированию хвоста магнитосферы. Протяженность магнитосферы в антисолнечном направлении в  $M_A^2$  раз больше расстояния от центра планеты до подсолнечной точки, здесь число Маха  $M_A = V_0/V_A$ ,  $V_0$  — скорость потока, а  $V_A$  — альвеновская скорость. Обычно в солнечном ветре  $M_A = 10$ .

## 1. Модели магнитосфер

В основу параболической модели магнитосферы было положено предположение о том, что для описания магнитосферного поля достаточно добавить к планетарному диполю две токовые системы. Одна из них — это токи на магнитопаузе, которые экранируют дипольное поле и обеспечивают равенство нулю нормальной

к магнитопаузе компоненты магнитного поля. Другая система токов — это токовая система хвоста. Она создает магнитное поле, тангенциальное магнитопаузе, и формирует два встречных пучка силовых линий. Токковый слой в хвосте магнитосферы разделяет северную и южную доли хвоста с противоположно направленными почти параллельными пучками силовых линий магнитного поля. Токи хвоста формируют тета-образный ток в ночной стороне магнитосферы.

Название «параболоидная» описываемая нами модель магнитосферы получила из-за формы поверхности, аппроксимирующей магнитопаузу, — параболоида вращения [5]. Размеры планетарных магнитосфер различаются в тысячи раз (таблица), однако форма магнитопаузы при переходе от одной планеты к другой сохраняется. При этом лобовая часть магнитосферы совпадает с параболоидом вращения, осью симметрии которого является линия планета — Солнце. Баланс давления плазмы набегающего потока и давления внутри магнитосферного поля позволяет найти магнитное поле в подсолнечной точке. Это поле не зависит от величины планетарного диполя и однозначно определяется гелиоцентрическим расстоянием. Планетарный диполь определяет размер магнитосферы,  $R_s$ .

Как показывают модельные расчеты, поскольку форма дневной магнитопаузы близка к параболоиду вращения, поле в подсолнечной точке в 1.44 раза превышает поле диполя (см. (1)). Этот коэффициент усиления дипольного поля экранирующими токами набегающей плазмы для параболоида имеет промежуточное значение между 1 (плоская магнитопауза) и 2 (сферическая модель):

$$B_m(R_s) = B_{\text{dip}} + B_{CF} = 2.44B_{\text{dip}} = 2.44 \frac{B_d}{R_s^3}. \quad (1)$$

Сила тока в обеих токовых системах (токи на магнитопаузе и токи хвоста) зависит от магнитного момента планетарного диполя и от характерного размера магнитосферы.

Для Меркурия сравнение полученной модели с данными наблюдений показывает, что при описании магнитосферного поля можно ограничиться двумя выше-названными токовыми системами. Для Земли, Юпитера и Сатурна весьма существенен кольцевой ток во внутренней магнитосфере. Кольцевой ток у различных планет имеет различную природу. У Земли его формируют захваченные частицы, и именно усиление кольцевого тока в значительной мере определяет депрессию экваториального поля во время магнитной бури. У Юпитера этот ток видоизменяется в плазменный диск, образованный ионизированными выбросами вулканов Ио. Быстрое вращение Юпитера разгоняет и ускоряет холодную плазму, которая, как из пращи, выбрасывается во внешнюю магнитосферу. Как показывают оценки, магнитный момент плазменного диска примерно в три раза превышает магнитный момент Юпитера. В результате размеры магнитосферы Юпитера почти в два раза превышают размер магнитосферы, которая могла бы образоваться у планетарного диполя. Давление плазмы магнитодиска, достигающей магнитопаузы, равно давлению магнитного поля, и оно вносит существенный вклад в баланс давления на магнитопаузе.

Угловая скорость вращения Сатурна незначительно отличается от скорости вращения Юпитера. Размеры обеих планет также близки друг к другу, но планетарное магнитное поле Сатурна почти в 20 раз слабее поля Юпитера. Поэтому эффект «пращи» у Сатурна существенно слабее, чем у Юпитера, и плазменный диск Сатурна увеличивает его «эффективный» магнитный момент в 1.2–1.5 раза.

## 2. Модель магнитосферы Земли

Расчет модельного магнитного поля основан на том, что в параболоидальных координатах разделяются переменные при решении уравнения Лапласа [6, 7]. Простейший путь для получения решения при различном угле раствора магнитопаузы (поверхность  $\beta = 1$ ) сводится к тому, чтобы учесть форму магнитопаузы при задании координатных поверхностей ( $\alpha, \beta, \varphi$ ) в солнечно-магнитосферных координатах ( $x, y, z$ ) [8]:

$$x = \frac{R_s}{2}(\beta^2 - \alpha^2 + \gamma^2), \quad y = R_1 \alpha \beta \sin \varphi, \quad z = R_1 \alpha \beta \cos \varphi, \quad (2)$$

где ось  $X$  направлена на Солнце, плоскость  $XZ$  содержит планетарный диполь,  $\varphi$  — азимутальный угол вокруг оси  $X$ ,  $\gamma$  — безразмерная константа, определяющая степень расширения магнитопаузы, а  $R_1$  — радиус кривизны магнитопаузы в лобовой точке. При этом уравнение магнитопаузы (поверхности  $\beta = 1$ ) дается параболоидом вращения в декартовых координатах

$$\left(\frac{z_{mp}}{R_s}\right)^2 + \left(\frac{y_{mp}}{R_s}\right)^2 + 2\left(\frac{x_{mp}}{R_s}\right) = (\gamma^2 + 1). \quad (3)$$

Характерный размер магнитопаузы  $R_s$  (расстояние от начала координат до лобовой точки) и ее поперечник в плоскости терминатора (при  $x = 0$ ) определяются  $R_1$  и параметром  $\gamma$ :

$$x_{mp} = R_s = \frac{(\gamma^2 + 1)}{2} R_1 \quad \text{и} \quad \sqrt{y_{mp}^2 + z_{mp}^2} = \sqrt{\gamma^2 + 1} R_1. \quad (4)$$

Угол раствора магнитопаузы можно фиксировать, задавая отношение этих двух размеров

$$f_r = \frac{\sqrt{y_{mp}^2 + z_{mp}^2}}{x_{mp}} = \frac{2}{\sqrt{\gamma^2 + 1}}. \quad (5)$$

Для «среднего» раствора магнитопаузы  $\gamma = 1$  [6], при этом  $f_r = \sqrt{2}$  и радиус кривизны параболоида совпадает с  $R_s$ . При  $\gamma < 1$  раствор магнитопаузы растет по сравнению со спокойным значением, а при  $\gamma > 1$  уменьшается.

### 2.1. Экранировка планетарного диполя

Экранирующие диполь токи, сосредоточенные на магнитопаузе, вместе с диполем создают внутри магнитосферы суммарное поле, описываемое скалярным потенциалом  $U$  (магнитное поле равно  $B = -\nabla U$ ):

$$U_{d+sd} = (U_d^{\parallel} + U_{sd}^{\parallel}) \sin \psi + (U_d^{\perp} + U_{sd}^{\perp}) \cos \psi, \quad (6)$$

где  $U_d^{\parallel} = M_P \frac{x}{r^3}$  и  $U_d^{\perp} = M_P \frac{z}{r^3}$  — скалярные потенциалы планетарных диполей, параллельных и перпендикулярных линии планета–Солнце,  $U_{sd}^{\parallel}$  и  $U_{sd}^{\perp}$  —

соответствующие скалярные потенциалы поля токов экранировки на магнитопаузе, а  $\psi$  — угол наклона диполя к оси  $z$ . Здесь  $r$  — расстояние от начала координат, а  $4\pi M_P/\mu_0$  — магнитный момент планетарного диполя ( $M_P = M_E = 0.03$  мТл  $\cdot R_E^3$  для Земли, где  $R_E = 6378.16$  км — радиус Земли; для Меркурия  $M_P = M_M = 196$  нТл  $\cdot R_M^3$ , где  $R_M = 2439$  км — радиус Меркурия) и  $r$  — расстояние от начала координат. Переходя в потенциале (6) к параболическим координатам (2), используем интегральные преобразования

$$\int_0^\infty \lambda^2 J_0(\lambda\alpha) K_0(\lambda\beta) J_1(\lambda\gamma) d\lambda = \frac{2\gamma(\beta^2 - \alpha^2 + \gamma^2)}{[(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)^2 - 4\alpha^2\gamma^2]^{3/2}},$$

$$\int_0^\infty \lambda^2 J_1(\lambda\alpha) K_1(\lambda\beta) J_1(\lambda\gamma) d\lambda = \frac{4\gamma\alpha\beta}{[(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)^2 - 4\alpha^2\gamma^2]^{3/2}},$$
(7)

где  $J_n$  — бesselовы функции первого рода, а  $K_n$  — это модифицированные функции Бесселя, имеющие особенность в начале координат. Формулы (7) позволяют представить потенциал токов экранировки в виде

$$U_{sd}^{\parallel} = M_{P\gamma} \int_0^\infty \lambda^2 J_0(\lambda\alpha) I_0(\lambda\beta) J_1(\lambda\gamma) \frac{K_1(\lambda)}{I_1(\lambda)} d\lambda,$$
(8)

$$U_{sd}^{\perp} = -M_{P\gamma} \cos \varphi \int_0^\infty \lambda^2 J_1(\lambda\alpha) I_1(\lambda\beta) J_1(\lambda\gamma) \frac{K_1'(\lambda)}{I_1'(\lambda)} d\lambda,$$

где  $M_{P\gamma} = \frac{M_P}{2\gamma R_2^2} (\gamma^2 + 1)^2$ ,  $I_n$  — модифицированные функции Бесселя, не имеющие особенности в начале координат, а штрих означает дифференцирование. Вычисляя магнитное поле в параболических координатах, легко проверить выполнение на магнитопаузе граничного условия  $B_\beta|_{\beta=1} = 0$ :

$$B_\alpha = -\frac{1}{R_1 \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \frac{\partial U}{\partial \alpha}, \quad B_\beta = -\frac{1}{R_1 \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \frac{\partial U}{\partial \beta},$$

$$B_\varphi = -\frac{1}{R_1 \alpha \beta} \frac{\partial U}{\partial \varphi}.$$
(9)

## 2.2. Поле токовой системы хвоста

Модель поля токов хвоста включает в себя сумму двух членов  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2$ . Второй член  $\mathbf{B}_2$  связан с токами  $\mathbf{j} = \text{rot } \mathbf{B}_2/\mu_0$ , текущими с утра на вечер в центральной части слоя, которые замыкаются токами на магнитопаузе. Первый член  $\mathbf{B}_1$  представляет безвихревую часть поля и обеспечивает сохранение магнитного потока внутри магнитопаузы. Поле  $\mathbf{B}_2$  имеет только одну компоненту:  $B_2 = (B_{2\alpha}, 0, 0)$ , где

$$B_{2\alpha} = B_0 \begin{cases} 0, & \alpha < \alpha_0, \\ \frac{f(\beta, \varphi)}{\alpha \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}, & \alpha > \alpha_0. \end{cases} \quad (10)$$

Дивергенция этого поля равна нулю всюду, кроме поверхности  $\alpha = \alpha_0$ , внутри которой (т. е. для  $\alpha < \alpha_0$ )

и ток и поле обращаются в нуль. На оси  $X$  передний край токового слоя хвоста расположен на расстоянии  $R_2 = R_1(\alpha_0^2 - \gamma^2)/2$  от центра планеты. Функция  $f(\beta, \varphi)$  в формуле (10) определяется профилем тока в токовом слое и выбирается как

$$f(\beta, \varphi) = \begin{cases} \frac{\beta}{\beta_0} \cos \varphi, & \beta |\cos \varphi| < \beta_0, \\ \text{sign} \left( \frac{\pi}{2} - |\varphi| \right), & \beta |\cos \varphi| > \beta_0, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\beta_0 = D/(R_1 \alpha_0)$ .

Полутолщина токового слоя в направлении  $z$   $D' = (\alpha/\alpha_0)D$  растет с удалением в ночную сторону и равна  $D$  на переднем краю слоя при  $\alpha = \alpha_0$ . Линии тока, связанного с полем  $\mathbf{B}_2$ , лежат на пересечении плоскостей  $z = \text{const}$  и параболоидов вращения  $\alpha = \text{const}$ . Ток отличен от нуля только внутри слоя при  $|z| < D'$ . Функцию  $f(\beta, \varphi)$  можно разложить в ряд Фурье по бesselовым функциям  $f(\beta, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} f_{nk} J_n(\lambda_{nk} \beta) \cos n\varphi$ , где  $\lambda_{nk}$  — корень уравнения  $J_n'(\lambda_{nk}) = 0$ . Использование в этом разложении ортонормированных бesselовых функций  $J_n(\lambda_{nk}/\beta)$  обеспечивает равенство нулю нормальной к магнитопаузе компоненты магнитного поля, индекс  $n$  принимает только нечетные значения из-за антисимметрии поля относительно экваториальной плоскости. Коэффициенты  $f_{nk}$  имеют вид

$$f_{nk} = \frac{2\lambda_{nk}^2}{\pi(\lambda_{nk}^2 - n^2)} J_n^{-2}(\lambda_{nk}) \times \int_0^1 \int_{-\pi}^{\pi} J_n(\lambda_{nk} \beta) f(\beta, \varphi) \cos n\varphi d\varphi \beta d\beta. \quad (12)$$

Суммируя  $B_1$  и  $B_2$ , получим скалярный потенциал полного поля при  $\alpha < \alpha_0$

$$U(\alpha, \beta, \varphi) = B_0 R_1 \times \sum_{n=1}^5 \sum_{k=1}^6 f_{nk} K_n(\lambda_{nk} \alpha_0) J_n(\lambda_{nk} \beta) I_n(\lambda_{nk} a) \cos n\varphi, \quad (13)$$

а при  $\alpha > \alpha_0$

$$U(\alpha, \beta, \varphi) = B_0 R_1 \left( f(\beta, \varphi) \ln \alpha + \sum_{n=1}^5 \sum_{k=1}^6 f_{nk} I_n(\lambda_{nk} \alpha_0) J_n(\lambda_{nk} \beta) K_n(\lambda_{nk} a) \cos n\varphi \right). \quad (14)$$

На рис. 1, а показаны линии тока (жирными линиями) токовой системы хвоста магнитосферы и выстилающиеся вдоль параболоидальной магнитопаузы силовые линии магнитного поля (тонкие линии) этой токовой системы. Для простоты показана только северная доля хвоста. Южная доля может быть получена отражением рис. 1, а относительно экваториальной плоскости. На рис. 1, б показаны жирными линиями токовые линии суммарной токовой системы (токов экранировки диполя и токовой системы хвоста) и тонкими линиями — силовые линии магнитосферного поля, формирующие магнитопаузу и пересекающие поверхность Земли в окрестности каспа. На рис. 2 показано сечение

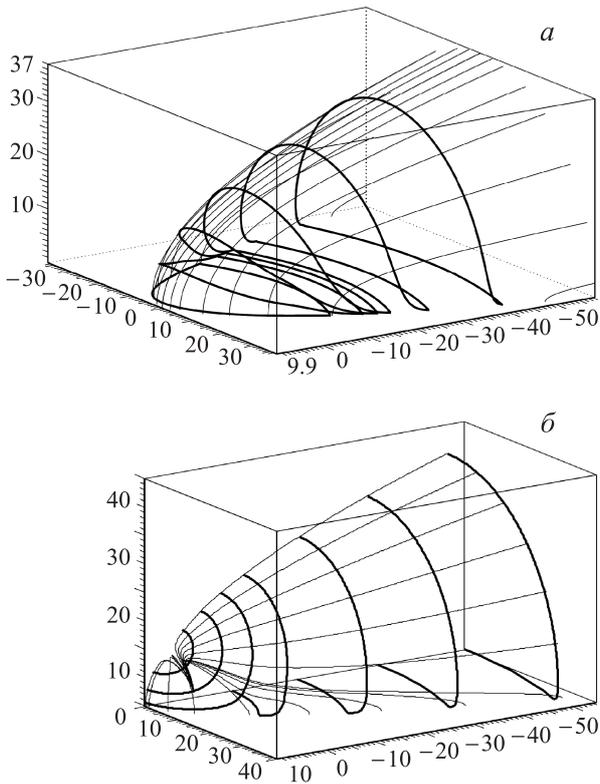


Рис. 1. Токовая система хвоста магнитосферы (северная доля) (а) и токи на магнитопаузе, экранирующие планетарный диполь, в сумме с токовой системой хвоста (рис. 2, а) (б)

магнитосферы Земли плоскостью полдень–полночь. Жирные линии показывают модельное положение головной ударной волны, выше по потоку от которой межпланетное магнитное поле (ММП) однородно. Показан случай южного ММП. Между головной ударной волной (внешняя жирная линия) и магнитопаузой (внутренняя

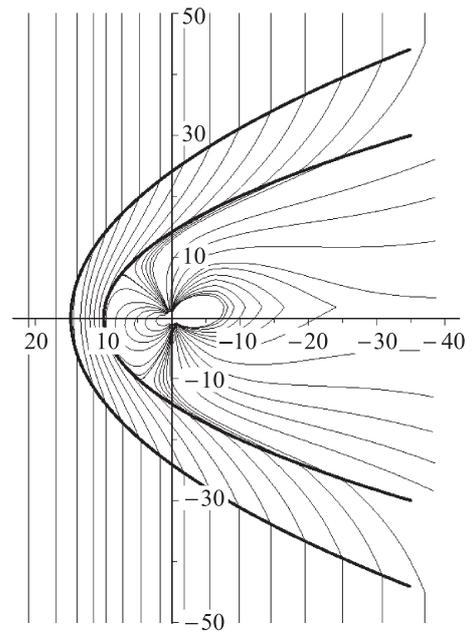


Рис. 2. Магнитосфера Земли в плоскости день–ночь

жирная линия) происходит драпировка ММП, частично проникающего внутрь магнитосферы.

### 3. Магнитосфера Меркурия

Магнитосфера Меркурия была обнаружена в 1974–1975 гг. во время двух облетов планеты КА «Маринер-10». КА «Мессенджер», который должен в марте 2011 г. перейти на орбиту спутника Меркурия, к настоящему моменту трижды пролетел на высоте около 200 км над поверхностью планеты. Два первых пролета в январе и октябре 2008 г. дали дополнительную информацию о величине магнитного момента Меркурия

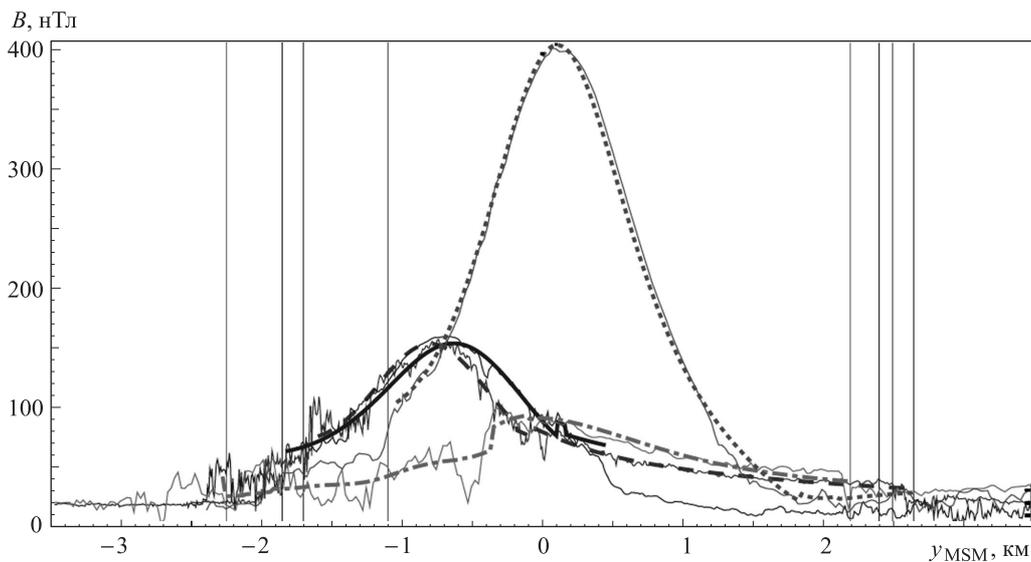


Рис. 3. Сравнение данных магнетометров (тонкие линии) и рассчитанных по модели модулей вектора магнитного поля (жирные линии) для пролетов «Маринер-10» (пунктирная и штрихпунктирные кривые) и двух пролетов «Мессенджер» январского (сплошная кривая) и октябрьского (штриховая кривая). Вертикальные прямые фиксируют моменты пересечения магнитопаузы. По вертикальной оси отложена величина магнитного поля, а горизонтальной —  $y_{MSM}$ -координата КА

и о структуре магнитосферы (рис. 3). Орбиты «Мессенджера» были расположены в окрестности переднего края токового слоя хвоста. КА пересекал ночную сторону магнитосферы с вечерней стороны на утреннюю. Во время январского пролета 2008 г. «Мессенджер» на нисходящем участке траектории двигался внутри плазменного слоя хвоста. При втором пролете вблизи Меркурия «Мессенджер» двигался в том же направлении, что и во время первого пролета, но при этом был расположен вне плазменного слоя — в северной доле хвоста магнитосферы. Сравнение данных магнитометра для первого и второго пролетов позволяет оценить величину плазменного давления в плазменном слое и его толщину.

#### 4. Магнитосферы планет-гигантов — Юпитера и Сатурна

##### 4.1. Магнитосфера Юпитера

Помимо Земли магнитосферы обнаружены и у других планет Солнечной системы. КА *Ulysses* совершил облет Юпитера в 1992 г., во время своего разворота на полярную орбиту вокруг Солнца. К настоящему времени доступны для всестороннего анализа данные КА «Galileo», который в 1995–2003 гг. совершил 34 оборота вокруг Юпитера и совершил облеты Галилеевых спутников Юпитера. КА «Cassini» с июля 2004 г. перешел на орбиту спутника Сатурна и совершил к настоящему времени около 60 оборотов вокруг планеты. В результате этих полетов был получен большой объем информации о крупномасштабном поле этих планет. Эта информация позволила модифицировать параболическую модель магнитосферы Земли таким образом, чтобы построить количественные модели магнитосфер Юпитера и Сатурна [9].

Юпитер — быстро вращающаяся планета; угловая скорость вращения  $\Omega_J = 1.76 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Он находится на расстоянии 5.2 а.е. от Солнца. Юпитер обладает сильным собственным магнитным полем, его дипольный магнитный момент направлен на север и равен  $M_J = 4.2 \cdot 10^5 \text{ нТл } R_J^3$ . Угол наклона диполя к оси вращения планеты  $\sim 9.6^\circ$ . Юпитер — крупнейшая планета солнечной системы, имеющая самую протяженную магнитосферу: расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы достигает 100 радиусов планеты. Во внутренней магнитосфере в результате вулканической активности спутника Ио, находящегося на расстоянии  $5.9R_J$  от центра планеты ( $R_J = 7.14 \cdot 10^7 \text{ м}$  — радиус Юпитера), образуется мультикомпонентная плазма. В основном энергия поступает в магнитосферу за счет вращения планеты. Вблизи планеты магнитосферная плазма вращается вместе с Юпитером. На больших экваториальных расстояниях наблюдается отставание от твердотельного вращения за счет радиального разлета плазмы от тора Ио под действием центробежной силы при условии сохранения углового момента [10]. За альфвеновской точкой, где плотность магнитной энергии сравнима с плотностью кинетической энергии, движение плазмы определяет величину и конфигурацию магнитосферного магнитного поля. Там, где возникает нарушение твердотельного вращения, образуются сильные продольные токи, вытекающие из ионосферы, с которыми связаны юпитерианские полярные сияния [10].

Представленная здесь параболическая модель имеет модульную структуру. Она включает планетарный диполь, который заэкранирован от внешнего пространства токами на магнитопаузе, токовую систему хвоста и поле магнитодиска, также заэкранированное токами на магнитопаузе. Свободным параметром модели является соотношение между расстоянием до лобовой точки на магнитопаузе и половиной ее поперечника в направлении утро–вечер при  $x = 0$ . Ось  $X$  направлена на Солнце, а планетарный диполь находится в начале координат.

Полное магнитное поле от всех магнитосферных источников Юпитера, экранированное токами магнитопаузы, представлено на рис. 4. Штрихпунктирная линия показывает токовый слой хвоста. Параметры модели: расстояние до магнитопаузы  $R_s = 100R_J$ ; внешний край магнитодиска  $R_{D1} = 92.07R_J$ ; внутренний край диска  $R_{D2} = 18.4R_J$ ;  $B_{DC} = 2.5 \text{ нТл}$ . Направление планетарного диполя Юпитера противоположно направлению магнитного поля Земли, поэтому в северной (в южной) половине магнитосферы поле направлено от Юпитера (к Юпитеру). Утолщенная линия на рис. 4 — проекция плазменного диска, штриховая — магнитопаузы. Параметры модели, использованной для расчета поля: момент планетарного диполя  $M_J = 0.42 \text{ мТл} \cdot R_J^3$ , наклон диполя к оси  $Z$  равен нулю, расстояние до лобовой точки на магнитопаузе  $R_s = 100R_J$ , расстояние до переднего края токового слоя  $R_2 = 65R_J$ , его полутолщина  $D = 1.5R_J$ , магнитный поток в долях хвоста  $0.32 \text{ ТВб}$ . При этом поле на внешнем краю магнитодиска  $B_{DC} = 2.5 \text{ нТл}$ , а внутренний и внешний края диска находятся на расстояниях, равных  $R_{D2} = 18.4R_J$  и  $R_{D1} = 92.07R_J$ . Ось диска совпадала с осью  $Z$ .

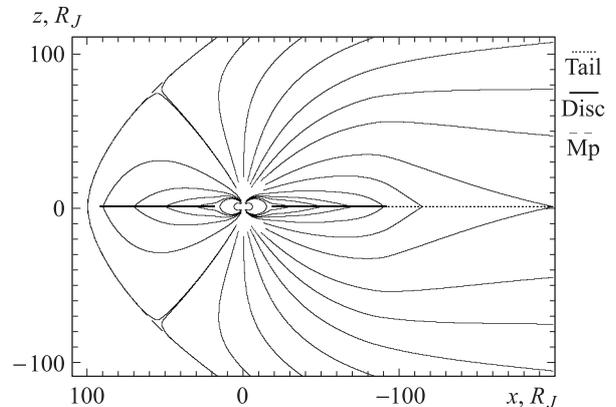


Рис. 4. Лежащие в плоскости полдень–полночь силовые магнитного поля линии магнитосферы Юпитера

Здесь представлена параболическая модель магнитосферы Юпитера [7], которая включает в себя диполь, магнитодиск и токовую систему хвоста магнитосферы. Токи хвоста объединены с токами замыкания на магнитопаузе. Все внутренние источники магнитосферного магнитного поля экранируются токами магнитопаузы. Это гарантирует равенство нулю нормальной компоненты магнитосферного магнитного поля на магнитопаузе. Магнитное поле солнечного ветра частично проникает в магнитосферу. Изменяя характерный масштаб магнитосферы (расстояние до подсолнечной точки на

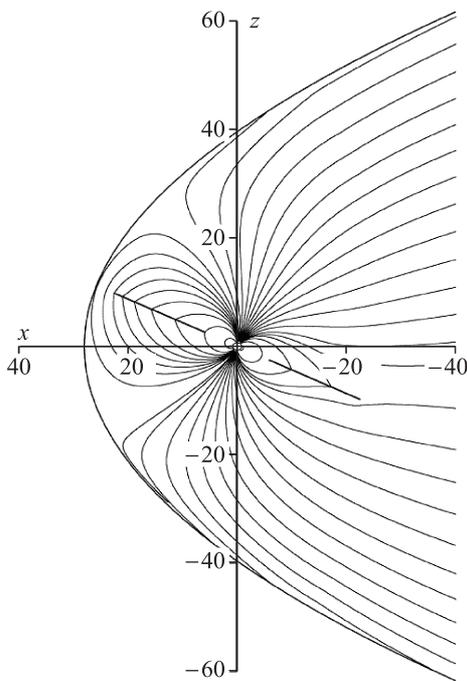


Рис. 5. Магнитосфера Сатурна в 2004 г. (начало миссии Кассини)

магнитопаузе  $R_s$ ), модель дает возможность изучать влияние солнечного ветра на структуру магнитосферы и на авроральную активность. Получена зависимость  $R_s$  от динамического давления солнечного ветра  $p_{sw}$  ( $R_s$  пропорционально  $p_{sw}^{-0.23}$ ). Это зависимость более сильная, чем в случае земной магнитосферы ( $p_{sw}^{-0.17}$ ).

Хотя для Юпитера экспериментальной информации о размерах и форме магнитосферы гораздо меньше, чем для Земли, существуют исследования зависимости расстояния до подсолнечной точки  $R_s$  от динамического давления [5]. В работе [11] было показано, что  $R_s$  меняется с давлением  $p_{sw}$ , как  $R_s = 35.5 p_{sw}^{-0.22} R_J$ , где  $p_{sw}$  измеряется в пПа. Аналогичный результат с показателем степени « $-0.23$ » был получен в работах [7, 12]. Более быстрый рост относительных размеров магнитосферы с уменьшением давления солнечного ветра по сравнению с земной магнитосферой обусловлен выносом магнитного поля из внутренних областей во внешнюю магнитосферу из-за высокой проводимости бесстолкновительной плазмы магнитодиска и непосредственным вкладом непрерывно истекающей магнитосферной плазмы в увеличение давления с внутренней стороны магнитопаузы.

#### 4.2. Магнитосфера Сатурна

Вскоре после подлета КА «Cassini» к системе Сатурна в 2004 г. параболоидная модель магнитосферы Юпитера [7] была использована как отправная точка для моделирования магнитосферы Сатурна [9]. Поскольку модель имеет модульную структуру, каждая токовая система имеет свои пространственный и амплитудный масштабный множители. Размеры магнитосферы Сатурна оказываются в 4.3 раза меньше магнитосферы Юпитера из-за более слабого планетарного поля (рис. 5).

Примерно в пять раз меньшая (по сравнению с Юпитером) скорость поступления ионов в плазменный диск Сатурна приводит к тому, что эффективный дипольный момент магнитодиска не превышает половины магнитного момента планеты.

Полученная зависимость размеров магнитосферы от динамического давления солнечного ветра позволяет найти модельные параметры для произвольного давления солнечного ветра и исследовать реакцию магнитосферы Сатурна на скачок давления солнечного ветра.

#### Заключение

Представлена динамическая параболоидная модель, позволяющая исследовать влияние ММП и солнечного ветра на магнитосферы Меркурия, Земли, Юпитера и Сатурна. Характерный масштаб магнитосферы (расстояние до подсолнечной магнитопаузы  $R_s$ ) зависит от динамического давления  $p_{sw}$  солнечного ветра, как  $p_{sw}^{-1/6}$  для Меркурия, Земли и Сатурна и  $p_{sw}^{-0.23}$  для Юпитера. В магнитосфере Юпитера плазма магнитодиска вытесняет магнитное поле из области диска во внешнюю магнитосферу и подавляет компоненту магнитного поля, нормальную к поверхности диска.

Сравнение предсказаний модели с данными КА, полученными во время облетов Меркурия, Юпитера и Сатурна, показывает, что погрешность модели, как правило, не превышает 10% измеренного поля. Модели позволяют исследовать влияние давления солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на динамику магнитосферы. Наблюдения полярных сияний на Юпитере и Сатурне и их динамика проливают свет на механизмы генерации сияний.

#### Список литературы

1. Беленькая Е.С. // УФН, 2009. **179**, № 8. С. 809.
2. Herbert F. // J. Geophys. Res. 2009. **114**. P. A11206. doi:10.1029/2009JA014394.
3. Goertz C.K. // Jupiter's magnetosphere: Particles and fields, in Jupiter the giant planet / Ed. by T. Gehrels. Tucson, Arizona, 1976. P. 23.
4. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu. et al. // J. Geophys. Res. 2008. **113**. P. A12210. doi:10.1029/2008JA013368.
5. Joy S.P., Kivelson M.G., Walker R.J. et al. // J. Geophys. Res. 2002. **107**, N A10. P. 1309. doi:10.1029/2001JA009146.
6. Alexeev I.I. // J. Geomag. Geoelectr. 1986. **38**. P. 1199.
7. Alexeev I.I., Belenkaya E.S. // Ann. Geophys. 2005. **23**. P. 809.
8. Greene J.M., Miller R.L. // Planet. Space Sci. 1994. **42**, N 10, P. 895.
9. Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S. et al. // Geophys. Res. Lett. 2006. **33**. P. L08101. doi:10.1029/2006GL025896.
10. Hill T.W. // J. Geophys. Res. 1979. **84**, N A11. P. 6554.
11. Huddleston D.E., Russell C.T., Kivelson M.G. et al. // J. Geophys. Res. 1998. **103**. P. 20075.
12. Slavin J.A., Smith E.J., Spreiter J.R., Stahara S.S. // J. Geophys. Res. 1985. **90**. P. 6275.
13. Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Y., Alexeev I.I. et al. // Planetary Space Science. 2005. **53**, N 9. P. 863.

**Magnetospheres of the Mercury, Earth, and of the giant planets: Jupiter and Saturn****I. I. Alexeev***D. V. Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: alexeev@dec1.sinp.msu.ru.*

Magnetosphere of the magnetized planets: Mercury, Earth, and of the giant planets: Jupiter and Saturn are shortly described. Universal magnetospheric model is introduced. A modifications of this model to each separate planet are constructed. The models approached to the physical processes which controlled the dynamics and structures of the abovementioned planetary magnetospheres. Model calculations are compared with direct spacecraft measurements during planet flybys.

*Keywords:* space plasma, planetary magnetospheres, solar wind — magnetosphere interactions.

PACS: 94.30.vf, 96.15.hm.

*Received 24 January 2010.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

**Сведения об авторе**

Алексеев Игорь Иванович — докт. физ.-мат.наук, ст. науч. сотр., зав. лабораторией; тел.: (495) 939-10-36, e-mail: alexeev@dec1.sinp.msu.ru.