

**ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ**

**Магнитосфера планет,  
обладающих собственным магнитным полем**

Е.С. Беленькая

*В обзоре приведены современные представления о физике магнитосфер планет Солнечной системы, обладающих собственным магнитным полем, и о структуре магнитосферных магнитных полей. В недрах Меркурия, Земли, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна генерируются магнитные поля в результате действия механизма динамо. Эти поля настолько сильны, что служат препятствием для потока плазмы солнечного ветра. Магнитосфера, окружающая планету, образуется при взаимодействии солнечного ветра с планетарным магнитным полем. Динамика магнитосферы определяется главным образом вариациями солнечного ветра. Магнитосфера каждой планеты уникальна. В обзоре рассмотрены общие и индивидуальные источники магнитных полей и свойства планетарных магнитосфер.*

PACS numbers: 94.20.Ss, 94.30.-d, 94.30.Bg, 94.30.Ch

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200908a.0809

**Содержание**

1. Введение (809).
2. Магнитосфера Земли (813).
3. Магнитосфера Меркурия (819).
4. Магнитосфера Юпитера (821).
5. Магнитосфера Сатурна (827).
6. Магнитосфера Урана (830).
7. Магнитосфера Нептуна (830).
8. Заключение (831).

Список литературы (833).

**1. Введение**

Исследование планетарных магнитосфер — относительно молодое и быстро развивающееся направление науки. Основная информация о магнитосферах планет Солнечной системы получена за последние 50 лет. Было обнаружено, что планеты, обладающие собственным магнитным полем: Меркурий, Земля, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — окружены магнитосферами. Магнитосфера — это область, созданная благодаря взаимодействию солнечного ветра с магнитным полем планеты; в ней преобладает магнитное поле, препятствующее непосредственному проникновению солнечного ветра к пла-

нете. Магнитосфера заполнена плазмой, быстрыми частицами и многочисленными излучениями.

Солнечный ветер — это поток горячей квазинейтральной полностью ионизованной водородно-гелиевой плазмы (состоящей из протонов, электронов и  $\alpha$ -частиц) с относительно низкой плотностью, непрерывно вытекающей из солнечной короны и ускоряющейся вблизи Солнца до сверхзвуковой и сверхальвеновской скоростей. На границе гелиосферы (на расстоянии  $\sim 100$  а.е.) солнечный ветер взаимодействует с межзвездной средой. На орбите Земли средняя скорость солнечного ветра составляет  $400\text{--}500$   $\text{км с}^{-1}$ , средняя альвеновская скорость —  $60$   $\text{км с}^{-1}$ , плотность ионов порядка  $5\text{--}10 \text{ см}^{-3}$ , температура ионов и электронов составляет  $10^5$  и  $2 \times 10^5$  К соответственно. Плотность солнечного ветра убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца, а скорость практически не меняется. Плазма солнечного ветра переносит крупномасштабное межпланетное магнитное поле (ММП) от Солнца к периферии Солнечной системы. ММП создается солнечным магнитным полем и полем гелиосферного токового слоя, разделяющего зоны противоположно направленных (от Солнца и к Солнцу в разных солнечных полушариях) магнитных силовых линий [1].

Внешняя граница магнитосферы называется магнитопаузой. Это тонкая токовая поверхность, на которой меняются величина и направление магнитного поля. Сверхзвуковой поток солнечного ветра с дневной стороны перед магнитопаузой создает межпланетную головную ударную волну. На этой волне поток солнечного ветра замедляется, сжимается и нагревается. Область с турбулентной плазмой между головной ударной волной и магнитопаузой называется магнитослоем. Со стороны низких высот магнитосфера ограничена ионосферой — верхним слоем атмосферы (у Земли расположена на высотах более 60 км от поверхности), частично

Е.С. Беленькая. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobelицына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Воробьевы горы 1, стр. 2, 119992 Москва, Российская Федерация  
Тел. (495) 939-39-21. Факс (495) 939-35-53  
E-mail: elena@dec1.sinp.msu.ru

Статья поступила 2 февраля 2009 г.,  
после доработки 7 марта 2009 г.

ионизованным излучением Солнца в далеком ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Земная ионосфера, так же как и солнечный ветер, является источником магнитосферной плазмы, поставляя главным образом протоны, однозарядный гелий и кислород, а также электроны, обеспечивающие квазинейтральность. Касп — область вблизи магнитопаузы с минимальной величиной магнитного поля, заполненная почти неподвижной плотной плазмой магнитослоя, расположенная на высокоширотных магнитных силовых линиях магнитосферы.

Солнечный ветер и переносимое им межпланетное магнитное поле формируют асимметричную магнитосферу, поджатую с дневной стороны и вытянутую в протяжённый хвост с ночной стороны. Размер магнитосферы определяется балансом давления солнечного ветра и магнитного давления магнитосферного поля на их общей границе. Геометрия магнитного поля хвоста поддерживается поперечным током в нейтральном токовом слое хвоста. Этот ток замыкается на магнитопаузе. По магнитопаузе текут и другие токи, экранирующие межпланетное пространство от магнитного поля магнитосферных источников. Энергия, передающаяся от солнечного ветра в магнитосферу, в конечном счёте контролирует различные уровни внутренней магнитной активности магнитосферы. Когда уровень энергии, накопленной в хвосте, превышает критический, возникает суббура.

Плазма космического пространства настолько разрежена, что вне ионосферы кулоновские взаимодействия между частицами практически отсутствуют. Поэтому крупномасштабное магнитное поле вызывает движение заряженных частиц вокруг магнитных силовых линий по спиральным траекториям с циклотронной частотой, превышающей частоту столкновений. Такая плазма называется замагниченной, и ее свойства оказываются анизотропными в силу выделенности направления магнитного поля. Проводимость вдоль магнитного поля настолько велика, что силовые линии вморожены в плазму, т.е. движутся вместе с ней. Большой продольной проводимости соответствуют большие значения магнитного числа Рейнольдса. Как следствие, магнитный поток в произвольной магнитной силовой трубке сохраняется, плазма и магнитное поле движутся как целое. В бесстолкновительной плазме коллективные процессы протекают не так, как в плазме, в которой существуют столкновения, а распределение частиц по скоростям может сильно отличаться от максвелловского (пучки быстрых частиц, анизотропия температур), что является причиной развития большого числа микронеустойчивостей. Таким образом, движение космической плазмы определяется не только локальными условиями, но и состоянием плазмы и магнитных полей в удалённых областях. Крупномасштабные магнитные и электрические поля объединяют и связывают отдельные объекты глобальной космической системы.

Обычно для описания процессов, происходящих в космической плазме, используется магнитная гидродинамика (МГД) — наука о крупномасштабных движениях электропроводящих жидкостей и газов, а также плазмы в магнитном поле. Уравнение индукции магнитного поля имеет вид [2]

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times [\mathbf{V} \times \mathbf{B}] + \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}, \quad \eta_m = (\mu_0 \sigma)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\eta_m$  — коэффициент магнитной диффузии;  $\sigma$  — проводимость;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума. Прист и Форбс [3] обратили внимание на то, что во многих случаях, в частности при выводе уравнения индукции, достаточно записать тензор удельного электрического сопротивления как  $\underline{\eta}_e = \eta_e \delta_{ij}$ , где  $\eta_e$  — скалярное удельное электрическое сопротивление, величина, обратная удельной электропроводности  $\sigma$ . Коэффициент магнитной диффузии  $\eta_m = \eta_e / \mu_0$ . Первый член в правой части уравнения (1) описывает конвекцию магнитного поля с потоком плазмы; второй — диффузию поля через плазму. В рамках МГД отсутствие диссипации связано с сохранением топологии магнитного поля [4]. Если в уравнении (1) первый член много больше второго, то магнитный поток вморожен в плазму и топология магнитного поля не может измениться. Если второй член больше первого, то связь между магнитным полем и плазмой ослабевает и топология поля может меняться. Отношение величин первого члена ко второму описывается числом Лундквиста  $S_L = V_A l / \eta_m$  ( $V_A$  — альвеновская скорость,  $l$  — характерный размер плазменного образования) или магнитным числом Рейнольдса  $R_m = V l / \eta_m$  ( $V$  — средняя скорость потока). Среды, изучаемые в гео- и астрофизических приложениях МГД, характеризуются высокой проводимостью и/или большими размерами, т.е.  $S_L$  и  $R_m \gg 1$ .

Таким образом, вмороженность соответствует большим значениям  $S_L$  и/или  $R_m$ . В условиях сохранения вмороженности, т.е. при "идеальном" взаимодействии солнечного ветра с планетой, плазма солнечного ветра и магнитосферная плазма не перемешиваются, а образуют отдельные области, ограниченные тонким токовым слоем (магнитопаузой).

Для структур, имеющих малый характерный пространственный масштаб или конечную проводимость, например для некоторых токовых слоёв, значения  $S_L$  и/или  $R_m$  могут быть меньше или порядка 1. В этих областях, называемых диссипативными или диффузионными, определяющую роль играют эффекты конечной электропроводимости и условия вмороженности могут нарушаться. При этом возможно пересоединение магнитных полей.

Отличительная черта процесса пересоединения — изменение топологии магнитного поля в плазме с высокой конечной проводимостью. Отношение объёма диссипативной области к объёму окружающего её пространства стремится к нулю при стремлении к нулю  $\eta_m$ . Тем не менее магнитное пересоединение, возникающее в относительно небольших по объёму диффузионных областях, приводит к фундаментальным изменениям в макроскопической топологии глобального магнитного поля. Пересоединение — принципиально нелокальный процесс, проявляющийся на больших пространственных масштабах [5].

Пересоединение магнитных силовых линий в высокопроводящей плазме сопровождается быстрым выделением магнитной энергии с её трансформацией в кинетическую энергию плазмы, нагрев, излучение и ускорение частиц. Магнитное пересоединение характеризуется огромным разнообразием видов и проявлений в астрофизической, космической и лабораторной плазме. Как большинство фундаментальных понятий в физике, магнитное пересоединение объединяет широкий круг явлений в рамках единого универсального закона [3, 6, 7].

Изучая солнечные вспышки, Данжи в 1953 г. предположил [8], что силовые линии магнитного поля могут разрываться и пересоединяться, а в начале 60-х годов прошлого века он применил концепцию пересоединения для описания взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли [9]. Несмотря на то, что физика этого явления до сих пор недостаточно ясна, процесс пересоединения считается ответственным за перенос массы, импульса и энергии от солнечного ветра в магнитосферу, а также за возбуждение крупномасштабной магнитосферной конвекции. Ведущая роль механизма магнитного пересоединения подтверждается, в частности, хорошо установленной зависимостью магнитосферного поля и конвекции плазмы от направления ММП в невозмущённом потоке солнечного ветра [10, 11]. Кроме того, существуют прямые наблюдения явлений, связанных с пересоединением, на земной магнитопаузе [12–18].

В лабораторной и магнитосферной плазме, а также на Солнце наблюдается изменение геометрии магнитного поля и появление пучков ускоренных частиц за время, значительно меньшее времени обычной диффузии магнитного поля. Эти наблюдения объясняются пересоединением. Пересоединение привлекается и для объяснения вязкой диссипации в аккреционных дисках. Один из распространённых подходов к проблеме пересоединения основан на теории МГД и заключается в обнаружении такой геометрической конфигурации, которая бы существенно сокращала эффективное время диссипации [3]. Однако, как отметили Л.М. Зелёный с соавторами [19], физика пересоединения выходит за рамки МГД-приближения и требует также использования кинетического подхода.

Для магнитных полей, имеющих несколько источников, характерно образование нулевых точек магнитного поля. Нейтральными или нулевыми точками называют места, где магнитное поле обращается в нуль [3]. Нулевые точки в плазме, как правило, приводят к образованию токовых слоёв. Вокруг нулевых точек возникают особые диссипативные области. Два типа плазмы, двигаясь навстречу друг другу, протекают через диссипативную область, вносят в неё магнитные силовые линии, внутри этой области вморооженность нарушается, силовые линии пересоединяются и выносятся потоком плазмы. В результате происходит пере распределение магнитных потоков. Самосогласованная динамика высокопроводящей плазмы приводит к тому, что особые точки магнитного поля совпадают с особыми точками поля скоростей [20].

Существенный вклад в исследование процесса пересоединения внёс С.И. Сыроватский (см., например, [21]). Он впервые теоретически рассмотрел общую нестационарную задачу о течении высокопроводящей сжимаемой плазмы в неоднородных магнитных полях, содержащих нулевые линии. Сыроватским был получен вывод о возможности значительного увеличения плотности электрического тока в окрестности нулевой линии и аккумуляции электрического тока в виде токовых слоёв. Сомов и Сыроватский [22] и Сомов [23] исследовали течение плазмы в сильных магнитных полях, в частности при наличии нулевых линий магнитного поля.

В лаборатории ускорителей ФИАН, начиная с 1960-х годов, проводились работы по лабораторному исследованию токовых слоёв, возникающих при течении сжимаемой плазмы в неоднородном магнитном поле, содер-

жащем нулевую линию (задача была поставлена Сыроватским). В двумерной конфигурации возможно возникновение линии, в перпендикулярной плоскости к которой магнитное поле имеет топологию  $X$ -типа, а величина поля обращается в нуль. Эта линия называется нейтральной или нулевой линией магнитного поля. В плоскости, перпендикулярной к нейтральной линии, течения и поведение силовых линий подобны двумерному пересоединению [3]. В результате был получен фундаментальный вывод о возможности накопления магнитной энергии при формировании в окрестности нулевой линии токового слоя. Последующее высвобождение накопленной магнитной энергии осуществлялось при быстром разрушении слоя и сопровождалось генерацией импульсных электрических полей, ускоряющих заряженные частицы.

Представление о динамических токовых слоях, впервые введённое С.И. Сыроватским, оказалось очень плодотворным для решения многих проблем физики космической и лабораторной плазмы. Так, например, было показано, что магнитосферный хвост Земли эволюционирует к квазистабильному состоянию, в котором положение далёкой  $X$ -линии осциллирует между 40 и  $60R_E$  [19], где  $R_E = 6378,1$  км — радиус Земли.

Топология магнитных полей играет ключевую роль для астрофизической и лабораторной плазмы, её динамики, условий существования равновесия и перераспределения энергии. Две конфигурации  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  называются топологически достижимыми, если существует движение, переводящее  $\mathbf{B}_1$  в  $\mathbf{B}_2$  и наоборот без нарушения вморооженности. Конфигурации  $\mathbf{B}_1$  и  $\mathbf{B}_2$  считаются обладающими разной топологией, если они не являются топологически достижимыми. В этом случае, если возможен переход от  $\mathbf{B}_1$  к  $\mathbf{B}_2$ , то он связан с изменением топологии и осуществляется вследствие омической диссипации [24].

В магнитосферах планет в зависимости от взаимной ориентации векторов магнитного поля планеты и ММП осуществляется как двумерное, так и трёхмерное пересоединение. Двумерное пересоединение происходит на нейтральной линии, на которой магнитное поле обращается в нуль, или на квазинейтральной линии, когда отлична от нуля только компонента магнитного поля вдоль этой линии. Трёхмерное пересоединение осуществляется в нейтральной точке магнитного поля [25–29]. Строго двумерное пересоединение возникает, например, когда ММП и ось диполя собственного поля планеты параллельны [30], и происходит на нейтральной линии, лежащей в плоскости магнитного экватора. Можно показать, что при сильной компоненте ММП, параллельной оси диполя планеты, и небольших, но отличных от нуля остальных компонентах ММП, также осуществляется двумерное пересоединение на квазинейтральной линии [27, 28]. Поле вблизи квазинейтральной линии имеет топологию  $X$ -типа в плоскостях, перпендикулярных к этой линии.

В случае ММП с преобладающей компонентой, направленной антипараллельно оси диполя планеты, происходит трёхмерное пересоединение в нейтральных точках магнитного поля, расположенных вблизи каспов. Трёхмерное пересоединение имеет значительно более сложную топологию [16, 27, 31, 32]. При этом в магнитосфере нигде не образуется квазинейтральная линия и конфигурация магнитного поля  $X$ -типа.

Двумерному и трёхмерному типам пересоединения соответствуют принципиально различные структуры магнитосферного магнитного поля, а следовательно, конвективные потоки в магнитосфере и полярные сияния. Поэтому сопоставление теоретических представлений с наблюдениями можно проводить только зная, какой тип пересоединения осуществляется в каждом конкретном случае. Такое сопоставление позволяет адекватно ответить на вопрос о влиянии межпланетного магнитного поля на магнитосферы планет.

Пашмани [14] отмечал, что в диффузационной области условие вморможенности  $\mathbf{E} + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}] = 0$  нарушается сначала на масштабе порядка ионной инерционной длины  $\lambda_i = c/\omega_{pi}$ , где  $c$  — скорость света, а  $\omega_{pi}$  — ионная плазменная частота. При этом ионы уже не замагничены, а электроны ещё остаются привязанными к магнитному полю. Далее, на расстоянии порядка электронной инерционной длины  $\lambda_e$  электроны тоже становятся незамагнченными. В электронной диффузационной области существует электрическое поле вдоль магнитных силовых линий  $E_{||} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$ .

В диффузационной области пересекаются токовые слои, разделяющие магнитные силовые линии разных топологических типов (сепаратрисные поверхности). На этих сепаратрисных граничных поверхностях существуют не только продольные (вдоль магнитных силовых линий) токи, но и продольные разности потенциалов электрического поля и  $E_{||}$ . Таким образом, вдоль сепаратрисных слоёв образуются мелкомасштабные структуры, которые Мозер [17] и Вайвадс с соавторами [18] рассматривали как диффузионные зоны. В последнее время у орбиты Земли произведены измерения внутри или вблизи диффузионных зон, включая узкие слои вдоль сепаратрисных поверхностей. Например, Мозер [17] представил данные о многочисленных измерениях в областях с характерным размером порядка электронной инерционной длины и с существенным продольным электрическим полем  $E_{||}$ , расположенных вдоль сепаратрис. Наблюдения показывают, что размеры диффузионных зон оказываются порядка  $4-5\lambda_i$  (для окрестностей Земли  $\lambda_i \sim 100$  км).

Проект "Кластер" (Cluster) [33] был запланирован для выполнения одновременных измерений в четырёх точках пространства. Главной целью проекта было изучение мелкомасштабных трёхмерных структур в земной магнитосфере и в солнечном ветре вблизи Земли. Спутники группы "Кластер" впервые обнаружили в магнитослое у магнитосферы Земли протяжённые электронные диффузионные области длиной 3000 км [34]. Кроме того, спутники "Кластер" позволили впервые наблюдать структуру магнитного поля вблизи нулевой точки в хвосте [35].

Пересоединение может проявляться либо как квазистационарный, либо как спорадический процесс. Со времени открытия явлений переноса магнитного потока (flux transfer events) различные кратковременные и квазипериодические события в дневной авроральной зоне идентифицировались как ионосферные проявления спорадического пересоединения. Данжи [30], впервые предсказавший квазистационарное пересоединение магнитного поля Земли (с дипольным моментом, направленным на юг) с южным магнитным полем солнечного ветра, рассматривал магнитосферу как усредненную по времени конфигурацию.

Таблица. Характеристики планет

Планета	Радиус $R_p$ , км	Средняя плот- ность, $\text{г см}^{-3}$	Период вращения вокруг оси, земные сутки	Диполь- ный момент, $\text{Гс } R_p^3$	Расстояние от Солнца, а.е.
Меркурий	2439,7	5,43	58,6462	0,0033	0,39
Венера	6051,8	5,24	-243,0185	—	0,72
Земля	6378,1	5,515	0,9973	0,3	1,00
Марс	3397	3,94	1,0259	$< 1 \times 10^{-4}$	1,52
Юпитер	71492	1,33	0,4135	4,28	5,20
Сатурн	60268	1,70	0,4440	0,21	9,58
Уран	25559	1,25	-0,7183	0,23	19,18
Нептун	24764	1,64	0,6712	0,13	30,02

По мнению Кадомцева [6], идея пересоединения оказалась очень плодотворной для объяснения ряда явлений в лабораторной и космической плазме и позволила найти общие черты в процессах, отличающихся на много порядков по величине, по геометрическим и энергетическим масштабам. Поэтому качественная роль идеи пересоединения очень велика, количественная же сторона ещё не до конца разработана. Вследствие этого в настоящее время большую ценность представляют скорее не теоретические модели пересоединения, а выраженные в них идеи, в частности, идеи образования токовых слоёв и последующего пересоединения в них.

Несмотря на то что плотность энергии межпланетного магнитного поля существенно меньше плотности кинетической энергии солнечного ветра, а величина ММП на несколько порядков меньше величин планетарных магнитных полей, процессы пересоединения играют ключевую роль в формировании глобальной структуры и динамики магнитосфер. Вдоль пересоединившихся магнитных силовых линий электрическое поле и плазма солнечного ветра могут проникать в магнитосферу.

В таблице приведены некоторые характеристики планет Солнечной системы (при её составлении были использованы, в частности, данные [36]). Меркурий, Венера, Земля и Марс — планеты земной группы, сходные по размеру, массе и составу. Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — планеты-гиганты. Это массивные небесные тела, не имеющие твёрдой поверхности, состоящие в основном из водорода и гелия. Около 98 % суммарной массы планет Солнечной системы приходится на долю планет-гигантов, характеризующихся большими размерами и массой, относительно низкой плотностью, быстрым вращением, сильным магнитным полем, а также многочисленными спутниками. Почти вся кинетическая энергия вращения Солнечной системы приходится на планеты-гиганты.

Вращение большинства планет Солнечной системы происходит в направлении движения по орбите. Однако Венера вращается в обратном направлении. Один оборот Венеры вокруг оси вращения составляет -243 земных суток, что превышает длительность сидерического периода ее обращения (венерианского года), составляющего 224,7 земных суток. Уран и Плутон тоже вращаются в обратном направлении, но, в отличие от других планет, их оси вращения расположены под небольшим углом к плоскостям их орбит, таким образом, Уран и Плутон вращаются как бы "лёжа на боку". В 2006 г. Международный астрономический союз опре-

делил Плутон как карликовую планету, а не как классическую планету Солнечной системы.

Собственное магнитное поле планеты — её важнейшая характеристика с точки зрения космической электродинамики. В настоящее время более или менее надёжно известны магнитные поля всех планет Солнечной системы (см. табл.). Магнитное поле Меркурия намного меньше поля Земли. Венера не обладает собственным магнитным полем. Ситуация с Марсом до сих пор неясна: если у него и есть собственное поле, оно мало. Для планет, не имеющих собственного магнитного поля, существенно индукционное взаимодействие с замагниченной плазмой солнечного ветра, при котором возникает индуцированная магнитосфера.

Для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна установлен не только факт существования собственных магнитных полей, но известны и величины их мультипольных членов. Взаимодействие солнечного ветра с собственным магнитным полем планеты приводит к формированию крупномасштабных магнитосферных магнитных и электрических полей, конвекции и токовых систем. Для быстро вращающихся планет-гигантов, обладающих сильным магнитным полем (Юпитер, Сатурн), вращение оказывает существенное влияние на формирование их магнитосфер и на характер их взаимодействия с солнечным ветром.

## 2. Магнитосфера Земли

Земля — крупнейшая среди планет земной группы. Она имеет металлическое ядро, мягкую мантию и твёрдую кору. Средняя плотность вещества Земли составляет  $5,5 \text{ г см}^{-3}$ . Рельеф поверхности Земли характеризуется перепадом высот, равным 20 км, включая океанские впадины. Среднее расстояние Земли от Солнца,  $1,5 \times 10^8 \text{ км}$ , принято за 1 астрономическую единицу (а.е.). По орбите вокруг Солнца Земля движется со средней скоростью  $30 \text{ км с}^{-1}$ . Угол между полярной осью и перпендикуляром к плоскости орбиты Земли (плоскости эклиптики) составляет  $23^\circ$ . Благодаря этому наклону на Земле происходит смена времён года. Среднегодовая температура на Земле равна приблизительно 290 К. У Земли самое сильное магнитное поле из всех планет земной группы, дипольный момент составляет  $0,3 \text{ Гс } R_p^3$  и направлен на юг ( $R_p$  — радиус планеты).

Земля окружена магнитосферой, внутри которой определяющую роль играет магнитное поле, а вне доминирует солнечный ветер. Средняя плотность плазмы в земной магнитосфере  $n_{\text{m sph}} = 2 \text{ см}^{-3}$ , средняя температура магнитосферной плазмы  $T_{\text{m sph}} = 20 \times 10^6 \text{ К}$ . Таким образом, магнитосферная плазма более разреженная и горячая, чем плазма солнечного ветра. Кроме собственного поля Земли источниками магнитного поля в магнитосфере являются магнитосферные токовые системы [37].

Схематически строение магнитосферы Земли представлено на рис. 1 (см. также [38, 39] и рис. 7 из работы Л.М. Зеленого с соавторами [40]). На схеме показано обтекание солнечным ветром магнитосферы, ограниченной магнитопаузой, по которой текут токи экранировки. Толщина магнитопаузы составляет несколько ионных гирорадиусов [39], в среднем 400–800 км [41]. Минимальная величина магнитного поля достигается на высоких

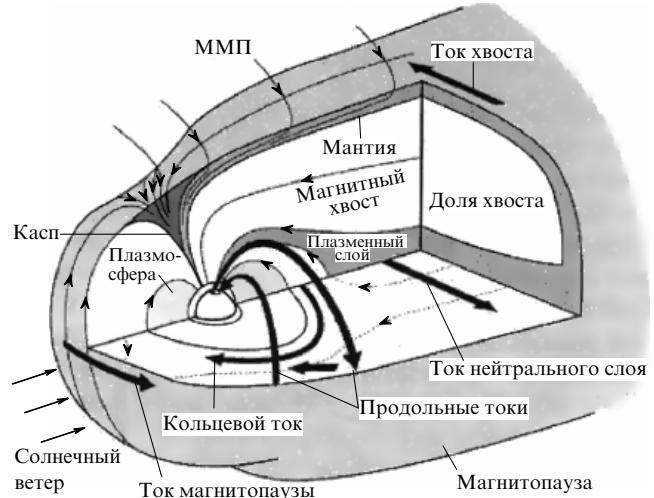


Рис. 1. Схема пространственного распределения плазмы, магнитного поля и электрических токов в магнитосфере Земли.

широтах в области каспов. ММП частично проникает в магнитосферу. Под магнитопаузой расположена мантия, доли хвоста (на рисунке показана только северная доля) и плазменный слой, окружающий нейтральный токовый слой хвоста, в котором текут поперечные токи хвоста, направленные с утра на вечер и замыкающиеся на магнитопаузе. В плазменном слое в хвосте магнитосферы энергия ионов  $\sim 1-10 \text{ кэВ}$ . Земля окружена плазмосферой — областью радиуса  $4-6 R_E$ , в которой плазма, в основном ионосферного происхождения, вращается вместе с Землёй. Это происходит из-за вморооженности магнитных силовых линий в ионосферную плазму. Столкновения ионосферной плазмы с нейтралами на высоте  $\sim 120-140 \text{ км}$  приводят к передаче вращения в магнитосферу. Плотность относительно холодной плазмы в плазмосфере порядка  $10^2-10^3 \text{ см}^{-3}$ , вне плазмосферы плазма более горячая и разреженная, а доминирующим движением является не вращение, а крупномасштабная конвекция, генерируемая взаимодействием магнитосферы с солнечным ветром. В ловушке, созданной магнитным полем Земли, удерживаются энергичные частицы, образующие радиационные пояса [42]. Центробежный и магнитный дрейфы энергичных частиц в дипольном поле формируют кольцевой ток. Электрические токи вдоль магнитных силовых линий образуют слои, связанные с полярными сияниями.

Из-за вращения Солнца ММП закручено в крупномасштабную спиральную структуру (паркеровская спираль Архимеда). Вблизи земной орбиты величина ММП в спокойных условиях составляет  $\sim 5 \text{ нТл}$ , в то время как величина геомагнитного поля на земном экваторе  $\sim 3 \times 10^4 \text{ нТл}$ . Тем не менее магнитное поле солнечного ветра играет определяющую роль в физике земной магнитосферы. Магнитное поле солнечного ветра кардинально меняет структуру магнитосферного магнитного поля Земли, при этом существенное значение имеет направление ММП [27, 28, 43–49]. Высокое динамическое давление солнечного ветра и ММП, направленное на юг, резко увеличивают поступление энергии и импульса внутрь магнитосферы. Магнитная возмущённость магнитосферы характеризуется индексами геомагнитной активности ( $K_p$ ,  $AE$  и др.).

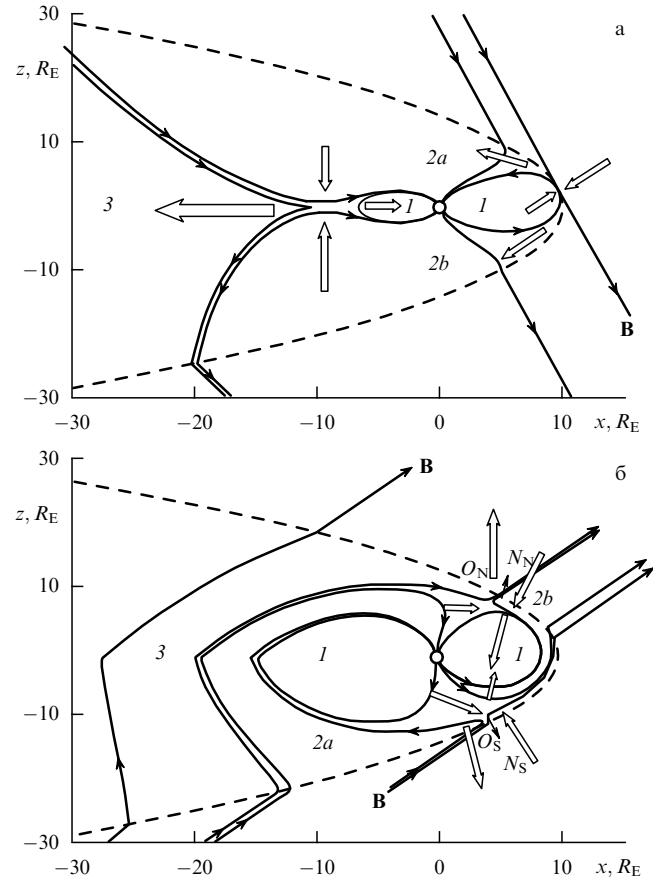
Для пересоединения необходимо выполнение как минимум трёх условий: наличие нулевых линий или точек магнитного поля; высокопроводящей плазмы; некоторого возмущения начального равновесия, инициирующего магнитогидродинамические течения плазмы и приводящего к возбуждению электрического тока. Как отмечал Кадомцев [6], сближение силовых линий с сильно различающимися направлениями магнитного поля означает, что вблизи точки сближения существует достаточно высокая плотность тока и что при пересоединении конечная электропроводность "срабатывает" только в малых областях с высокой плотностью тока, а происходящее при этом существенное изменение топологии силовых линий сказывается на движении всей плазмы.

Когда ММП направлено на юг, происходит двумерное пересоединение на низкоширотной квазинейтральной линии. Когда ММП направлено на север, пересоединение носит принципиально трёхмерный характер и происходит в нейтральных точках вблизи каспов [10, 16, 27, 28, 46, 50, 51]. В результате пересоединения в магнитосфере возбуждается крупномасштабная конвекция, соответствующая циклическому движению плазмы (образованию открытых силовых линий из межпланетных и замкнутых, а затем межпланетных и замкнутых из открытых силовых линий двух полярных шапок). На уровне ионосферы возникает двухвихревая картина конвекции при южном ММП и четырёхвихревая при северном ММП (см., например, [28]).

На рисунке 2 [27] показаны магнитные силовые линии земной магнитосферы в меридиональном сечении полдень – полночь (Солнце справа) для вектора ММП с южной (рис. 2а) и с северной (рис. 2б) компонентой. Потоки плазмы отмечены крупными стрелками. На рисунках 2а и 2б показано двумерное и трёхмерное пересоединение соответственно.  $O_N$  и  $O_S$  — нейтральные точки, расположенные в северном и южном каспах.  $N_N$  и  $N_S$  — внешние нормали к магнитопаузе в нейтральных точках. Магнитопауза показана пунктирной линией. Цифрами отмечены топологически разные типы магнитных силовых линий: 1 — замкнутые силовые линии, начинающиеся и заканчивающиеся на Земле; 2а и 2б — открытые силовые линии, связывающие межпланетное пространство с северной и южной полярными шапками соответственно; 3 — межпланетные силовые линии, проникающие в магнитосферу.

Первый процесс пересоединения происходит там, где впервые встречаются межпланетные и замкнутые магнитосферные силовые линии. При этом образуются открытые силовые линии двух полярных шапок. Открытые силовые линии переносятся в хвост солнечным ветром. Обратный процесс пересоединения происходит там, где открытые силовые линии двух полярных шапок, встречаясь, пересоединяются, образуя снова межпланетные и замкнутые силовые линии. При этом цикл замыкается.

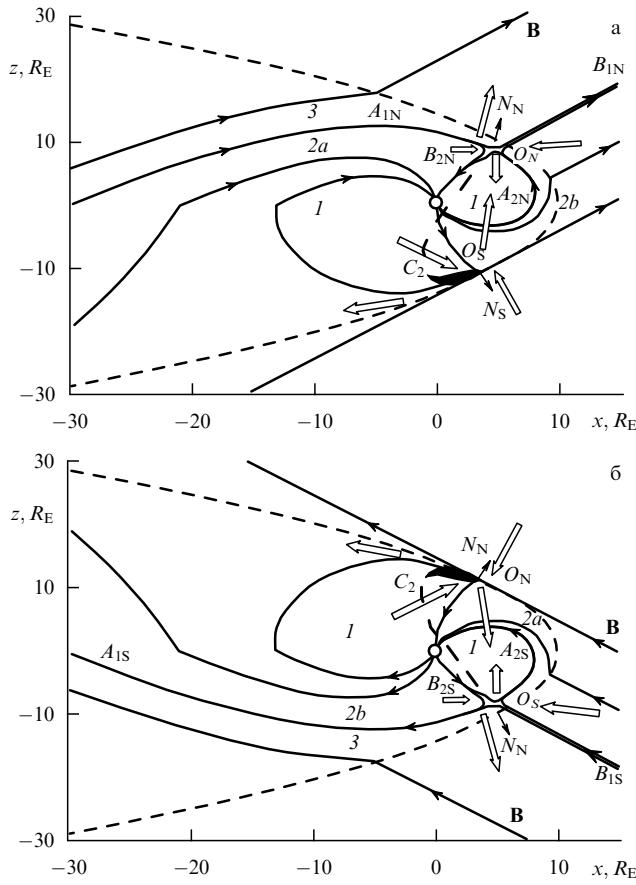
Рисунок 3 [27] представляет пересоединение при направлении ММП, близком к радиальному, т.е. когда радиальная компонента, направленная к Солнцу (рис. 3а) или от Солнца (рис. 3б), больше или равна северо-южной компоненте ММП. На рисунках 2 и 3 азимутальная компонента ММП равна нулю. Для направления ММП, близкого к радиальному, в магнитосфере осуществляется одновременно пересоединение в нейтральной точке вблизи каспа и на линии — на участке сепаратрисы  $C_2$



**Рис. 2.** Магнитные силовые линии в меридиональном сечении полдень – полночь (расчёты проведены по параболоидной модели магнитосферы). (а) Для вектора ММП с южной компонентой. Двумерное пересоединение происходит на низкоширотной квазинейтральной линии. Компоненты проникшего в магнитосферу ММП:  $b_x = 0,8$  нТл,  $b_y = 0$  нТл,  $b_z = -2,8$  нТл,  $b \approx 3$  нТл [27]. (б) Для вектора ММП с северной компонентой. Трёхмерное пересоединение происходит в двух нейтральных точках магнитного поля, расположенных вблизи каспов. Компоненты проникшего в магнитосферу ММП:  $b_x = 0,8$  нТл,  $b_y = 0$  нТл,  $b_z = 2,8$  нТл,  $b \approx 3$  нТл [27].

(отмечен на рис. 3 толстой чёрной кривой), расположенным на магнитопаузе вблизи второго каспа. Сепаратриса состоит из двух магнитных силовых линий:  $C_1$  (не показанной на рисунке) и  $C_2$ , соединяющих нейтральные точки. Рисунки 2 и 3 построены по результатам расчётов в параболоидной модели магнитосферы Земли [52]. Для наглядности ММП было выбрано порядка 30 нТл [27].

В параболоидной модели магнитосферы магнитопауза аппроксимируется параболоидом вращения. Основные источники магнитного поля в этой модели — магнитное поле Земли, токовая система хвоста, колецвой ток и токи экранировки магнитопаузы. Параболоидная модель учитывает также частичное проникновение ММП в магнитосферу. Доля межпланетного магнитного поля, проникающего в магнитосферу Земли, составляет 10–20 %. При расчётах обычно используется геоцентрическая солнечно-магнитосферная система координат GSM (The Geocentric Solar Magnetospheric System), в которой ось  $X$  направлена на Солнце, ось  $Y$  перпендикулярна земному магнитному диполю и направлена к вечеру, так что ось диполя лежит в плоскости  $X-Z$ . Углом наклона диполя  $\Psi$  называется угол между осью



**Рис. 3.** (а) Магнитные силовые линии в меридиональном сечении полдень– полночь для вектора ММП с сильной радиальной компонентой, направленной к Солнцу, рассчитанные в параболоидной модели магнитосферы. Одновременно происходит двумерное пересоединение на лежащей на магнитопаузе части сепаратрисы  $C_2$ , проходящей через южную нейтральную точку, и трёхмерное пересоединение в северной нейтральной точке. Компоненты проникшего в магнитосферу ММП:  $b_x = 2,2$  нТл,  $b_y = 0$  нТл,  $b_z = -2,0$  нТл,  $b \approx 3$  нТл. (б) То же самое для вектора ММП с сильной радиальной компонентой, направленной от Солнца. Одновременно происходит двумерное пересоединение на лежащей на магнитопаузе части сепаратрисы  $C_2$ , проходящей через северную нейтральную точку, и трёхмерное пересоединение в южной нейтральной точке. Компоненты проникшего в магнитосферу ММП:  $b_x = -2,2$  нТл,  $b_y = 0$  нТл,  $b_z = 2,0$  нТл,  $b \approx 3$  нТл [27].

диполя и плоскостью, перпендикулярной линии Земля – Солнце. Положительным значениям  $\Psi$  соответствует зима в северном полушарии, отрицательным — лето. Угол  $\Psi$  зависит от времени суток и времени года следующим образом:

$$\sin \Psi = -\cos \alpha_1 \sin \beta_2 + \sin \alpha_1 \cos \beta_2 \cos \varphi_m, \quad (2)$$

где  $\alpha_1 = 11,43^\circ$  — угол наклона геомагнитного диполя к оси вращения Земли,  $\beta_2$  — склонение Солнца, зависящее от номера дня в году;  $\varphi_m$  — угол между плоскостью полючного меридиана и меридиональной плоскостью, содержащей северный полюс земного диполя. Значение  $\varphi_m$  зависит от мирового времени UT:  $\varphi_m = \pi((UT/12^h) - (l_n/180^\circ))$ , где  $l_n$  — географическая долгота северного геомагнитного полюса. В течение года  $\Psi$  меняется в пределах  $\pm 35^\circ$ , а в течение суток — в пределах  $\pm 11,43^\circ$  относительно среднего значения, равного  $-\beta_2$ .

Размер магнитосферы характеризуется расстоянием  $R_1$  от центра планеты до ближайшей к Солнцу (подсолнечной) точки магнитопаузы. Для Земли в среднем  $R_1 = 10R_E$ , расстояние до головной ударной волны порядка  $14R_E$ , а геомагнитный хвост простирается на расстояния до  $1000R_E$  (по данным ИСЗ Пионер 7). В удалённом хвосте магнитное давление долей хвоста сбалансировано тепловым давлением плазмы магнитослоя. В соответствии с наблюдениями, средний радиус удалённого хвоста порядка  $30R_E$ , а величина магнитного поля в долях хвоста  $\sim 9,2$  нТл [53]. Среднее геоцентрическое расстояние до внутреннего края токового слоя составляет  $R_2 \approx 7-8R_E$ . Разность потенциалов электрического поля поперёк хвоста порядка 20–50 кВ (при сильном южном ММП до 100 кВ).

Параболоидная модель магнитосферы [52, 54] — это динамическая модель, с хорошей точностью описывающая как внутреннюю, так и внешнюю магнитосферу даже в возмущённые периоды. Она содержит физическое и аналитическое описание магнитосферного магнитного поля Земли. Магнитное поле определяется как векторная сумма полей основных крупномасштабных токовых систем, задающихся набором входных параметров модели. Входные параметры определяются из наблюдений по условиям внутри магнитосферы и в солнечном ветре. Все внутренние магнитосферные источники магнитного поля экранируются токами на магнитопаузе. Вектор полного магнитного поля  $\mathbf{B}(x, y, z)$  в точке пространства  $(x, y, z)$  внутри магнитосферы в солнечно-магнитосферной системе координат в момент времени  $t$  вычисляется как

$$\mathbf{B}(t) = \mathbf{B}_d(\Psi) + \mathbf{B}_{cf}(\Psi, R_1) + \mathbf{B}_T(\Psi, R_1, R_2, \Phi) + \\ + \mathbf{B}_r(\Psi, b_r) + \mathbf{B}_{sr}(\Psi, b_r, R_1) + \mathbf{B}_{FAC}(\Psi, R_1, J_0), \quad (3)$$

где  $\mathbf{B}_d(\Psi)$  — собственное магнитное поле Земли,  $\mathbf{B}_{cf}(\Psi, R_1)$  — поле токов на магнитопаузе, экранирующих его,  $\mathbf{B}_T(\Psi, R_1, R_2, \Phi)$  — поле токовой системы хвоста, содержащей токи поперёк хвоста и токи их замыкания на магнитопаузе,  $\Phi$  — магнитный поток в долях хвоста,  $\mathbf{B}_r(\Psi, b_r)$  — поле кольцевого тока,  $b_r$  — величина магнитного поля кольцевого тока на экваторе Земли,  $\mathbf{B}_{sr}(\Psi, b_r, R_1)$  — поле токов на магнитопаузе, экранирующих кольцевой ток,  $\mathbf{B}_{FAC}$  — поле продольных токов (не учитывалось при построении рисунков, приведённых в этом обзоре). Поле  $\mathbf{B}_{cf}$  находится из решения задачи Неймана для потенциала  $U_{cf}$ , т.е.  $\mathbf{B}_{cf} = -\nabla U_{cf}$  с граничным условием  $\mathbf{B}_{cf} \times \mathbf{n} = -\mathbf{B}_d \times \mathbf{n}$ , где  $\mathbf{n}$  — нормаль к магнитопаузе. Магнитное поле токовой системы хвоста  $\mathbf{B}_T$  определяется скалярным потенциалом:  $\mathbf{B}_T = -b_t R_1 \nabla U_t$ , где  $b_t = (2F/(\pi R_1^2))(R_1/(R_1 + 2R_2))$  — величина магнитного поля токов хвоста на передней границе токового слоя  $R_2$ . Разложение по сферическим гармоникам и функциям Бесселя потенциалов  $U_{cf}$  и  $U_t$  подробно описано в [55]. Для вычисления  $\mathbf{B}_r$  вводится векторный потенциал  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{B}_r = \nabla \times \mathbf{A}$ ). Моделирование продольных токов описано в [56]. Предполагается, что внешняя граница кольцевого тока, за которой его плотность обращается в нуль, совпадает с внутренней границей токового слоя хвоста  $R_2$ , а кольцевой ток имеет только азимутальную компоненту. Расчёты поля токов экранировки кольцевого тока проводились исходя из условия равенства нулю нормальной компоненты магнитного

поля на магнитопаузе. Входные параметры модели: геомагнитные индексы  $Dst$  и  $AL$ ,  $\Psi$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\Phi$ ,  $b_r$ ,  $J_0$  (полная сила продольных токов). Подробное описание параболоидной модели и её сопоставление с другими моделями земной магнитосферы дано, например, в [57].

Здесь кратко перечислим некоторые из наиболее известных моделей магнитного поля земной магнитосферы: модель Мида – Файерфильда [58], модель Олсона – Фитцера [59], модель Цыганенко T87 [60], модель Цыганенко T89 [61], модель Хилмера – Войта [62], модель Цыганенко T96 [63], параболоидная модель [54], модель Мальцева – Остапенко [64], модель Цыганенко T01 [65]. В моделях Мида – Файерфильда и Мальцева – Остапенко нет отдельного описания крупномасштабных магнитосферных токовых систем, рассчитывается только их совокупное магнитное поле, что не позволяет проследить за эволюцией каждой токовой системы с характерным временем реакции на изменения в солнечном ветре, как это делается в параболоидной модели. В моделях Мида – Файерфильда, T87 и T89 используется  $Kr$ -индекс, характеризующий интенсивность магнитной возмущённости на 3-часовом интервале, что ограничивает возможность детального описания более быстрых вариаций магнитного поля и динамики магнитосферы, в частности во время магнитных бурь (параболоидная модель позволяет проводить расчёты динамики магнитосферы на временном масштабе, превышающем 15 мин, в том числе и в возмущённые периоды). В модели Олсона – Фитцера форма магнитопаузы была найдена эмпирически, а расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы масштабировалось в зависимости от магнитосферной активности, кольцевой ток, токи магнитопаузы и ток хвоста масштабировались по расстоянию до подсолнечной точки (в параболоидной модели масштаб магнитосферы  $R_1$  зависит от параметров солнечного ветра и ММП).

Модель T89 содержит 6 статических моделей для различных уровней  $Kr$ -индекса. Она предназначена для моделирования возмущённых периодов и основана на эмпирическом описании данных, нет границы между кольцевым током и током хвоста, магнитопауза не задаётся поверхностью (нет токов экранировки, присутствующих в параболоидной модели). Модель Хилмера – Войта использует четыре физических параметра для задания трёх токовых систем: кольцевого тока, тока хвоста и токов магнитопаузы. Магнитопауза задаётся поверхностью, состоящей из полубесконечного цилиндра и дневной полусфера одинаковых радиусов. Токи магнитопаузы экранируют только диполь. Внутренний край плазменного слоя хвоста находится на  $10.5R_E$ . T96 — улучшенная версия T87 и T89. Входными параметрами для эмпирически-статистической модели T96 являются угол наклона диполя,  $Dst$ -индекс, динамическое давление солнечного ветра и компоненты ММП  $B_y$  и  $B_z$ . Модель основана на измерениях магнитного поля спутниками на расстояниях от  $3R_E$  до  $70R_E$  (параболоидная модель позволяет проводить расчёты и в более далёком хвосте). Магнитопауза задаётся полуэллипсом, переходящим в цилиндр. Магнитопауза экранирует диполь, кольцевой ток и токи хвоста. T01 является модификацией серии моделей и используется наиболее часто. Она основана на эмпирическом моделировании магнитного поля, измеренного на спутниках вблизи Земли (при  $x > -15R_E$ ). Поле вычисляется как векторная

сумма полей основных магнитосферных токовых систем, задаваемых большим количеством параметров, не всегда имеющих простой физический смысл. В параболоидной модели учитывается проникновение всех компонент ММП внутрь магнитосферы. Полная экранировка токами магнитопаузы всех внутримагнитосферных источников поля имеет кардинальное значение для правильного учёта влияния относительно слабого ММП на структуру магнитосферы.

Очень крупные структуры солнечного вещества в виде отдельных плазменных структур с вмороженным в них магнитным полем, выбрасываемые из Солнца в гелиосферу со скоростями от нескольких сотен до  $1000 \text{ km s}^{-1}$  и более, называются корональными выбросами массы (Coronal Mass Ejections — SME). SME — наиболее мощное проявление солнечной активности [66]. Достаточно сильные SME движутся значительно быстрее окружающего солнечного ветра и генерируют перед собой ударную волну. Столкновение магнитосферы с ударными волнами или быстрыми потоками в солнечном ветре может вызвать в магнитосфере магнитную бурю [67]. Магнитная буря характеризуется глобальным возмущением геомагнитного поля, которое проявляется как уменьшение величины направленного на север поля в районе экватора Земли (в среднем на  $100 \text{ nTl}$  и более). Характерное время развития магнитной бури порядка  $1/2$  дня, а восстановление происходит в течение нескольких последующих дней. Во время магнитной бури значительное количество ионов и электронов инжектируется в радиационные пояса Земли, а глобальное уменьшение величины геомагнитного поля свидетельствует об усилении тока хвоста и кольцевого тока [68]. При этом энергия ионов кольцевого тока  $\sim 10 - 300 \text{ кэВ}$ . Для характеристики магнитных бурь был введен  $Dst$ -индекс, описывающий среднее возмущение геомагнитного поля, измеренное на нескольких приэкваториальных обсерваториях. Во время сильных геомагнитных бурь разность потенциалов через полярную шапку возрастает от  $40 \text{ кВ}$  в спокойных условиях до  $150 - 200 \text{ кВ}$  [69]. Магнитные бури — довольно редкое явление. Значительно чаще происходят магнитосферные суббури.

Во время магнитосферных суббурь (характерное время порядка часа) энергия солнечного ветра, накопленная ранее в геомагнитном хвосте, высвобождается взрывным образом и направляется во внутреннюю магнитосферу и полярную ионосферу, частично преобразуясь в кинетическую энергию плазмы и тепло. При этом возникают сильные геомагнитные возмущения. Бывает, что во время магнитной бури происходит несколько интенсивных суббурь. Суббури начинается тогда, когда большой запас магнитной энергии накапливается в долях хвоста, что обычно происходит после того, как южное ММП ( $\geq 10 \text{ нTl}$ ) существует в течение трёх и более часов. Общая энергетика суббури составляет до  $10^{15} \text{ Дж}$ , а магнитной бури —  $10^{16} - 10^{18} \text{ Дж}$  [1].

Наземным проявлением суббури является резкая интенсификация полярных сияний в полуночном секторе. После начала суббури авроральные дуги становятся более яркими, быстро движутся к полюсу и интенсивно распространяются. Их активность длится около получаса, затем затухает. Полярные сияния на Земле — это свечение верхних разреженных слоёв атмосферы, вызванное взаимодействием атомов и молекул с потоками заряженных частиц больших энергий (элект-

ронами и протонами), вторгающимися в земную атмосферу из магнитосферы и межпланетного пространства. Свечение возбуждается на высоте примерно 100 км от поверхности Земли и выше. Соударения ускоренных частиц с нейтральными атомами верхней атмосферы (кислородом и азотом) приводят к возбуждению атомов, т.е. к переходу их в состояние с более высокой энергией. Возврат в начальное, равновесное состояние происходит посредством излучения квантов света характерных длин волн — возникают полярные сияния. Часто полярные сияния располагаются вдоль геомагнитных силовых линий.

Потоки энергичных электронов, связанные с сильными вытекающими из ионосфера продольными токами, возбуждают яркие формы дискретных полярных сияний, видимые невооруженным глазом. Менее интенсивные диффузные сияния возникают в результате высыпания в атмосферу без дополнительного ускорения захваченных геомагнитным полем заряженных частиц в результате их простого рассеяния. Ускорение электронов, приводящее к возбуждению дискретных полярных сияний, происходит в локализованной по высоте области, находящейся на радиальном расстоянии  $2-3R_E$  от поверхности Земли. Это область электростатического ускорения, где вместе с продольными токами существует продольное электрическое поле, приводящее к ускорению плазмы. Во время суббури, кроме того, действует альвеновское ускорение: направленный к Земле поток электромагнитной энергии, наблюдаемый на радиальных расстояниях  $4-6R_E$  от поверхности Земли, достаточен для возбуждения интенсивных свечений в более низких областях. ИСЗ "Полар" (Polar) наблюдал структуру и динамику флюктуаций интенсивных электрических и магнитных полей в этой области на границе плазменного слоя, связанных с альвеновскими волнами. При этом вектор Пойнтинга, направленный вдоль магнитных силовых линий к ионосфере, сообщал энергию, необходимую для ускорения плазмы в авроральной зоне, что приводило к генерации наблюдавшихся в это время полярных сияний. Детали механизма ускорения электронов, вызывающих сияния, до сих пор не ясны [70]. Продольное электрическое поле в ускоряющем промежутке поддерживает продольный ток большей величины, чем могли бы обеспечить имеющиеся носители тока без дополнительного ускорения.

Спектр полярных сияний состоит из эмиссионных линий и полос. В спектре сияний усиливаются некоторые из эмиссий ночного неба, прежде всего зелёная и красная линии  $\lambda = 5577 \text{ \AA}$  и  $\lambda = 6300 \text{ \AA}$  атомарного кислорода. Полярные сияния, наблюдавшиеся в оптическом диапазоне, содержат также и молекулярные полосы  $N_2$ . Начиная с 1950-х годов спектр полярных сияний исследовался также в инфракрасной и ультрафиолетовой областях. Энергия излучения в инфракрасной части спектра существенно превосходит энергию излучения в видимой области. Термин радиоаврора используется для обозначения авроральной активности, создающей неоднородности ионизации, ориентированные вдоль силовых линий поля на авроральных высотах, которые являются причиной обратного рассеяния радиоволн.

В проекции на ионосферу возникает светящийся овал полярных сияний, средний радиус овала  $\sim 20^\circ$  [71]. Полярные сияния наиболее интенсивны во время возмущений магнитного поля. Овал становится шире при

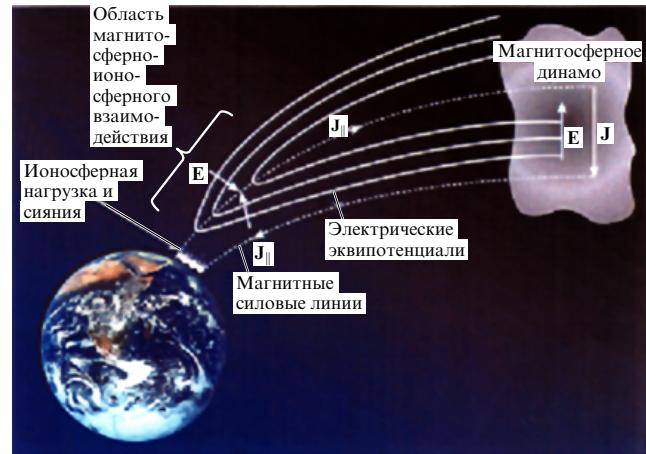


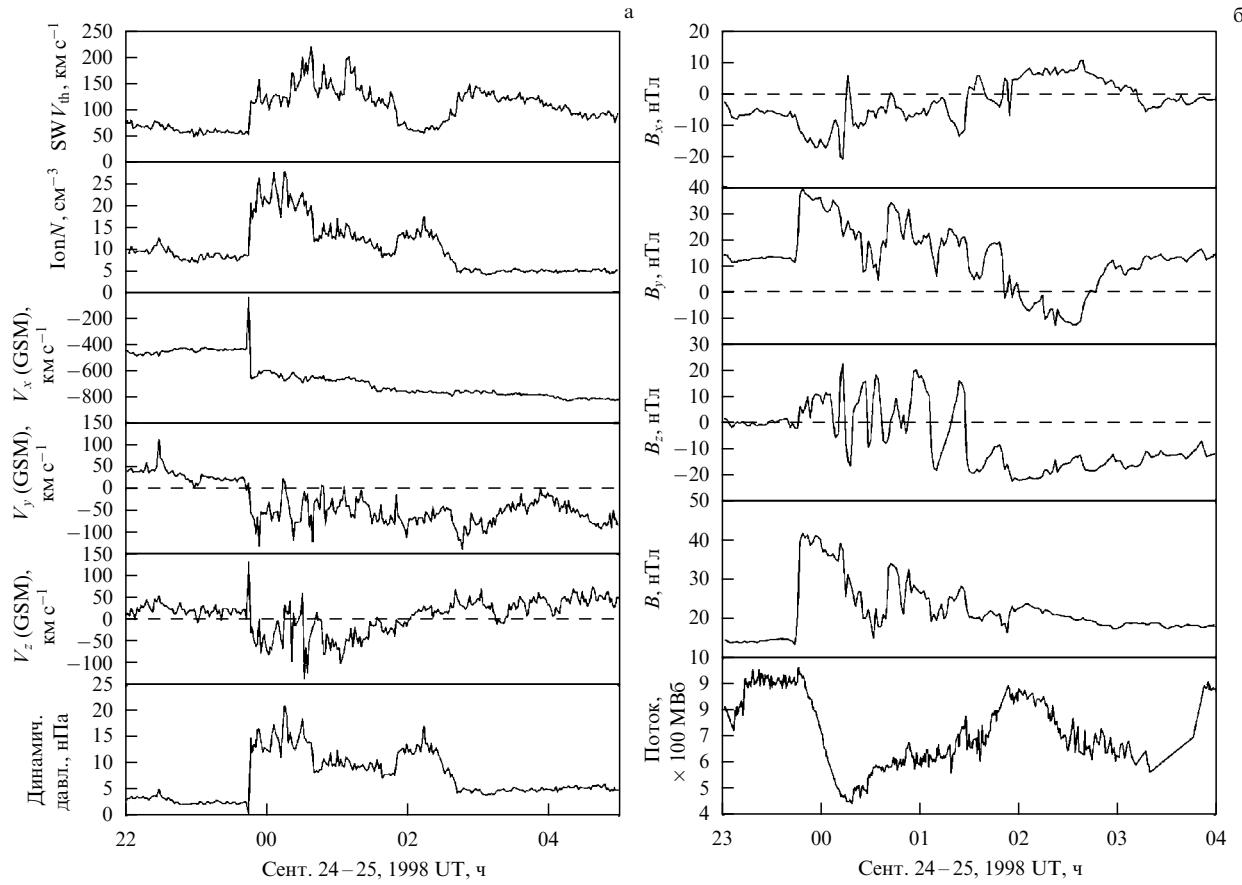
Рис. 4. Схема магнитосферно-ионосферного взаимодействия, генерирующего полярные сияния на Земле (см. [73]).

высокой геомагнитной активности. Геомагнитные силовые линии соединяют границу дневного сектора овала полярных сияний с магнитопаузой. Полярные сияния резко усиливаются при магнитных бурях; их локализация при этом может выходить далеко за пределы спокойного овала полярных сияний.

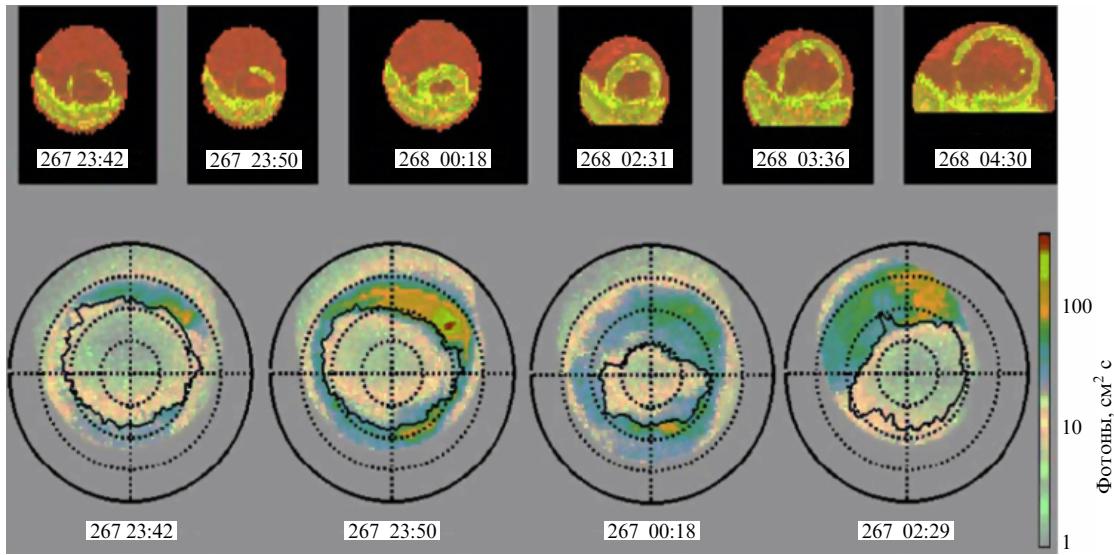
Проект НАСА "ТЕМИС" (THEMIS) предназначен для определения причин полярных сияний. В рамках миссии "ТЕМИС" на околоземную орбиту 17 февраля 2007 г. были запущены пять спутников, оснащённых устройствами для измерения электрического и магнитного поля, детекторами ионов и электронов. Эти спутники позволили контролировать процессы, происходящие в хвостовой части магнитосферы на разных расстояниях от Земли в моменты, предшествующие резкому усилению полярных сияний, и определить, на каком расстоянии зарождается возмущение. Из анализа наблюдений был сделан вывод о том, что наиболее вероятным спусковым механизмом, приводящим к возникновению суббури и, как следствие, к усилению заряженных частиц вдоль магнитных силовых линий и интенсификации полярных сияний, является пересоединение в геомагнитном хвосте на геоцентрическом расстоянии  $-20R_E$  [72].

На рисунке 4 показана схема, иллюстрирующая возбуждение полярных сияний на Земле в результате магнитосферно-ионосферного взаимодействия [73]. Показаны три главные области, необходимые для возникновения сияний: магнитосферное динамо, нагрузка — ионосфера, продольные токи с ускоряющим промежутком, их соединяющие. На рисунке 4 электрическое поле представлено эквипотенциальными поверхностями, имеющими форму вложенных букв "V". Там, где преобладает продольное электрическое поле, может возникнуть "проскальзывание" магнитных силовых линий. Ионосфера не является пассивной нагрузкой. Когда заряженные частицы, в частности, электроны, прошедшие через ускоряющий промежуток, сталкиваются с верхней атмосферой, меняется её состояние ионизации, а следовательно, и проводимость.

Полярные сияния зависят не только от уровня магнитной активности магнитосферы Земли, но и от параметров солнечного ветра, а также от его магнитного поля. Изменения скорости и плотности солнечного ветра, так же как и величины и ориентации ММП,



**Рис. 5.** (а) Данные Wind/SWE 24–25 сентября 1998 г., смещённые на 25 мин. (б) Компоненты и модуль ММП во время события 24–25 сентября 1998 г. в GSM-координатах по данным Wind/MFI, смещённым на 25 мин. На нижнем рисунке показан вычисленный магнитный поток полярной шапки [74].



**Рис. 6.** Данные ИСЗ Polar 24–25 сентября 1998 г.: сверху снимки, полученные с помощью VIS/Earth Camera, снизу — UVI снимки (Солнце внизу) [74].

вызывают изменение размеров и формы магнитосферы, параметров основных магнитосферных токовых систем и, как следствие, изменение площади полярной шапки и величины её магнитного потока. Наиболее сильное влияние на положение овала полярных сияний оказы-

вает северо-южная компонента ММП. Усиление южной компоненты приводит к расширению овала и сдвигу на более низкие широты [71]. Рисунки 5 и 6 демонстрируют динамику полярной шапки (области внутри овала полярных сияний) в зависимости от параметров солнечного

ветра и его магнитного поля на примере события 24–25 сентября 1998 г.

Примерно в 23:45 UT 24 сентября 1998 г. корональный выброс массы, несущий своё магнитное поле, достиг магнитосферы Земли. На рисунке 5а по данным КА Винд (Wind/SWE) сверху вниз показаны: тепловая скорость  $V_{th}$ , плотность ионов солнечного ветра  $N$ , компоненты скорости солнечного ветра  $V$  в GSM-координатах, динамическое давление солнечного ветра  $p = nV_x^2$ . Данные КА Винд были смешены на 25 мин — время, за которое СМЕ проходил расстояние от космического аппарата, находящегося на расстоянии  $184R_E$  от Земли с подсолнечной стороны, до магнитопаузы. В результате одновременного возрастания скорости и плотности динамическое давление солнечного ветра увеличилось от 2 нПа до  $\sim 15$  нПа. Одновременно изменилось и ММП (рис. 5б). На нижнем графике представлен магнитный поток полярной шапки, вычисленный как произведение площади полярной шапки, полученной по данным ИСЗ Поляр (Polar) (UVI, VIS), на величину магнитного поля Земли на высоте 120 км (56000 нТл) [74].

Резкое возрастание давления солнечного ветра приводит к уменьшению геоцентрического расстояния до подсолнечной точки магнитопаузы  $R_1$ , так как размер дневной магнитосферы обратно пропорционален корню шестой степени из динамического давления солнечного ветра [75]. Поскольку  $R_1$  — характерный пространственный масштаб магнитосферы, после его сокращения ожидается уменьшение геоцентрического расстояния до внутреннего края токового слоя ( $R_2$ ), а также усиление поперечных токов хвоста. Это должно приводить к увеличению площади полярной шапки и её магнитного потока. Однако, как следует из рис. 6, этого не произошло.

$B_z$ -компоненты ММП (см. рис. 5) через приблизительно 1 ч 42 мин после прихода межпланетной ударной волны к магнитопаузе повернулась к югу, а до этого имела в среднем северное направление. Как видно из рис. 2, геометрия пучка открытых силовых линий сильно зависит от  $B_z$ -компоненты и при северном ММП область открытых силовых линий на ионосфере (часто отождествляемая с полярной шапкой) уменьшается по сравнению со случаем южного ММП. Этот факт подтверждается многочисленными наблюдениями. Одно из них представлено на рис. 6. В верхней части рис. 6 показаны снимки, полученные на ИСЗ Поляр с помощью Visible Imaging System (VIS), а в нижней — Ultraviolet Imager (UVI). Из рисунка 6 видно, что после прихода СМЕ полярная шапка уменьшилась, активность полярного овала возрастила, его ширина увеличивалась. Таким образом, в рассматриваемом случае на размер полярной шапки большее влияние оказalo северное ММП, чем скачок давления солнечного ветра. После поворота ММП к югу полярная шапка начала расти. Во втором часу 25 сентября 1998 г. началась главная фаза магнитосферной бури, которую можно отнести к разряду сильнейших: изменения  $Dst$  индекса достигали 210 нТл. Три последних VIS снимка на рис. 6 показывают последовательное увеличение полярной шапки, уменьшение толщины овала и движение к экватору обеих границ полярного овала в соответствии с сохранением южной компоненты ММП и развитием магнитосферной бури. Если при повороте ММП к северу после прихода СМЕ полярная шапка уменьшилась вдвое от первоначальной

величины, то во время развития главной фазы бури она возросла втрое по сравнению с первоначальной величиной. По мере завершения главной фазы бури сияния становились менее активными. Как было сказано выше, изменение направления ММП влияет прежде всего на положение мест, где происходит пересоединение, на топографию магнитосферного магнитного поля и структуру магнитосферных токовых систем, а также на размер полярной шапки и характер конвекции в ней.

Кроме постоянно существующих крупномасштабных магнитосферных токовых систем, контролируемых параметрами солнечного ветра, при определённых условиях возникают временно существующие магнитосферные токовые системы длительностью от 30 мин до часа, например, токовый клин суббури [76] или переходные токовые системы [74]. В конце подготовительной фазы и в начале активной фазы суббури возникает так называемый токовый клин суббури, состоящий из продольных токов, замыкающихся ионосферными токами и токами поперёк хвоста в плазменном слое ближнего и среднего хвоста. При этом усиленный ток поперёк хвоста сбрасывается в ионосферу посредством продольных токов. Переходные токовые системы возникают в высокоширотной магнитосфере при приходе к магнитосфере Земли скачка давления солнечного ветра с одновременным поворотом ММП от почти горизонтального направления к северу [74].

### 3. Магнитосфера Меркурия

Меркурий — ближайшая к Солнцу планета, наименьшая среди планет земной группы; его радиус  $R_M = 2439,7$  км. Среднее расстояние от Солнца составляет 0,39 а.е., перигелий 0,307 а.е., апогелий 0,467 а.е. Смещение перигелия Меркурия, известное с погрешностью  $\sim 1\%$ , исследовалось с точки зрения проверки общей теории относительности [77, 78]. Средняя скорость движения Меркурия по орбите  $48 \text{ км с}^{-1}$ , один оборот вокруг Солнца планета совершает за 88 земных суток. У Меркурия самая сильная эллиптичность орбиты; её эксцентриситет равен 0,2. Оборот вокруг оси вращения (звездные сутки) у Меркурия длится 58,6 земных суток, что составляет  $2/3$  меркурианского года. Ось вращения Меркурия почти перпендикулярна плоскости его орбиты. Меркурий не имеет спутников. Рельеф поверхности характеризуется перепадом высот менее 5 км. Максимальная температура на Меркурии достигает 700 К. Предполагается, что у Меркурия железное ядро, занимающее  $\sim 0,75R_M$  [79], над ним — мантия, а над ней — силикатная оболочка [36].

Наблюдения Меркурия при помощи космических аппаратов к настоящему времени ограничиваются тремя пролётами Маринер 10 (Mariner 10): 29 марта и 21 сентября 1974 г. и 16 марта 1975 г. и двумя пролётами КА Мессенджер (MESSENGER, проект НАСА): 14 января и 6 октября 2008 г. Следующий пролёт Мессенджер планируется 29 сентября 2009 г. Затем Мессенджер облетит почти 4 раза вокруг Солнца и 18 марта 2011 г. окажется на орбите Меркурия.

Магнитное поле Меркурия почти на два порядка слабее земного, поэтому и магнитосфера Меркурия намного меньше земной магнитосферы. Магнитный момент диполя Меркурия направлен к югу, как у Земли. Его величина, найденная по данным первого пролёта

космического аппарата Маринер 10, оценивалась как  $351,5 \pm 20,7$  нТл  $R_p^3$ , а эклиптическая широта и долгота как  $-80 \pm 5^\circ$  и  $+285 \pm 10^\circ$  соответственно [80]. Недавние измерения, проведённые КА Мессенджер во время первого пролёта, дали новое значение момента центрального диполя Меркурия  $230\text{--}290$  нТл  $R_p^3$  с углом наклона к оси вращения от 5 до  $12^\circ$  [81].

Магнитосфера Меркурия мала и динамична. Её размер составляет 5 % от размера земной магнитосферы, характерное время конвекции в магнитосфере Меркурия порядка 1 мин, в то время как для Земли оно составляет около часа [82, 83]. Из-за слабого магнитного поля ионный гирорадиус превышает расстояние от центра планеты до подсолнечной точки магнитопаузы  $R_1$  для ионов со средней энергией [84, 85]. Отношение плотностей магнитосферной плазмы у Меркурия и Земли примерно равно отношению плотностей плазмы солнечного ветра на орbitах Меркурия и Земли [83]. Результаты первого пролёта Мессенджер показали, что магнитосфера Меркурия погружена в кометоподобное облако планетарных ионов [86] сложного состава с преобладанием ионов  $\text{Na}^+$  [87].

Благодаря близости к Солнцу давление солнечного ветра и величина его магнитного поля на орбите Меркурия примерно на порядок больше, чем у Земли и более чем на два порядка больше, чем у Юпитера [81, 88]. Среднее давление  $\sim 20$  нПа, а ММП порядка 30 нТл, причём доминирует, в отличие от Земли, радиальная компонента, так как угол между спиралью Архимеда, вдоль которой направлено ММП, и радиальным направлением вблизи Меркурия  $\sim 20^\circ$ . Вследствие этого влияние солнечного ветра и ММП на магнитосферу Меркурия имеет кардинальное значение. Кроме того, предполагается, что коэффициент проникновения ММП в магнитосферу Меркурия в 3–4 раза больше, чем у Земли [89]. В ближайшей к Солнцу точке орбиты Меркурия характерные параметры солнечного ветра:  $V = 400 \text{ км с}^{-1}$ , ММП  $\sim 27$  нТл, т.е. разность потенциалов электрического поля, приложенная к дневной  $X$ -линии длиной  $\sim 1,5R_M$ , для южного ММП  $\sim 40$  кВ. Для возмущённых условий ( $V = 500 \text{ км с}^{-1}$ , ММП  $\sim 90$  нТл) разность потенциалов, приложенная к магнитосфере, может достигать 165 кВ [90]. Во время первого пролёта Мессенджер ММП было направлено на север, во время второго — на юг. Величина ММП во время обоих пролётов была одного порядка.

Анализ наблюдений, проведённых на КА Маринер 10 и Мессенджер, показал, что по структуре магнитосфера Меркурия похожа на магнитосферу Земли. Среднее расстояние от центра планеты до подсолнечной точки магнитопаузы для Меркурия  $R_1 = 1,5R_M$ . Под воздействием вариаций параметров солнечного ветра это расстояние меняется в среднем от  $1,3R_M$  для южного ММП до  $2,1R_M$  для северного ММП [91]. Временами дневная магнитопауза приближается к поверхности планеты, но индукционные токи, генерируемые внутри Меркурия, ограничивают это движение [92]. Наблюдавший размер диаметра хвоста магнитосферы Меркурия  $\sim 5R_M$ , в то время как для Земли эта величина составляет  $40R_E$  [93].

У Меркурия почти отсутствует атмосфера и ионосфера; планета окружена разреженной экзосферой — тонкой газовой оболочкой, состоящей из нейтральных и ионизованных атомов  $\text{Na}$  и  $\text{K}$ . Предполагается, что су-

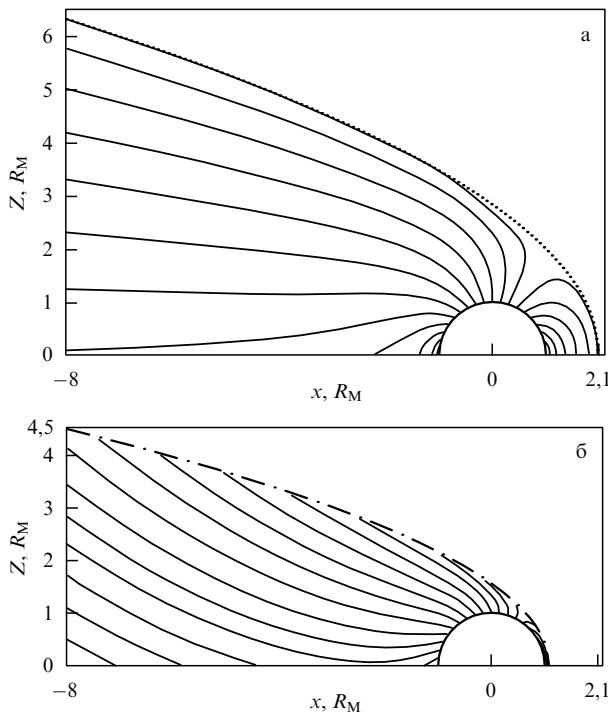
ществует два источника магнитосферной плазмы — солнечный ветер и ионизация нейтральной экзосферы. Во время первого пролёта Мессенджер обнаружил, что магнитосфера богата различными планетарными ионами разной степени ионизации [87]. Гард [94] отмечал, что освещённая Солнцем полусфера Меркурия покрыта слоем фотоэлектронов, который может играть роль горизонтальной проводящей поверхности, служащей для замыкания продольных токов, соединяющих планету с магнитосферой. Однако интегральная проводимость этого слоя намного ниже проводимости ионосфер Земли, Юпитера и Сатурна.

Полярные шапки на Меркурии — это области открытых силовых линий, соединяющих планету с солнечным ветром. Радиус приэкваториальной границы полярных шапок Меркурия порядка  $17\text{--}26^\circ$  [95]. Как во время третьего пролёта Маринер 10, так и во время первого пролёта Мессенджер ММП преимущественно было направлено на север. В обоих этих случаях наблюдалось относительно спокойное магнитосферное магнитное поле (как на Земле при аналогичных условиях) и отсутствие энергичных частиц [86]. Наоборот, на участке траектории Маринер 10, примыкающем к точке его выхода из магнитосферы при первом пролёте, было обнаружено сильно возмущённое магнитосферное поле и горячая плазма. При этом в магнитосфере было зафиксировано южное ММП. Ситуация напоминала суббурию в земной магнитосфере при южном ММП. Если в магнитосфере Земли характерное время суббури порядка часа, то у Меркурия — несколько минут.

Гибкость параболоидной модели магнитосферы, первоначально построенной для Земли И.И. Алексеевым [52], позволила модифицировать её для других планет, видоизменяя отдельные крупномасштабные токовые системы, описывающие магнитосферные источники, или вводя при необходимости новые. Параболоидная модель имеет минимальное число независимых входных параметров, каждый из которых определяется (непосредственно или косвенно) из измерений.

Параболоидная модель магнитосферы Меркурия [96], включающая индивидуальный вклад каждой магнитосферной токовой системы: собственное магнитное поле планеты, токи экранировки магнитопаузы, токовую систему хвоста и проникшее ММП, — позволила с хорошей точностью описать измерения Маринер 10 во время первого и третьего пролётов (во время второго пролёта Маринер 10 не входил в магнитосферу Меркурия). Используя эти измерения и учитывая указанные магнитосферные токовые системы, был заново определён магнитный момент диполя Меркурия, равный  $192$  нТл  $R_M^3$ , и смещение диполя к северу от экваториальной плоскости на  $0,18R_M$  вдоль оси  $Z$  солнечно-орбитальной системы координат (MSO) с началом координат в центре Меркурия.

При расчётах в параболоидной модели для Меркурия  $R_1$  считалось пропорциональным динамическому давлению солнечного ветра в степени  $-1/6$ . Расстояние до внутреннего края токового слоя  $R_2 = 0,8R_1$ , как для земной токовой системы хвоста. Параболоидная модель позволила построить структуру магнитосферы Меркурия для спокойных и возмущённых условий и получить результаты, хорошо описывающие измерения магнитного поля. На рисунке 7 [96] показана рассчитанная картина силовых линий магнитного поля Меркурия в



**Рис. 7.** Магнитосфера Меркурия при спокойных (а) и возмущённых (б) условиях в солнечном ветре [96]. Магнитопауза изображена пунктирующей линией; магнитные силовые линии в меридиональном сечении день – ночь — сплошными линиями. (а) Расчёты проводились при давлении солнечного ветра  $1,3 \text{ нПа}$ , при отсутствии проникновения ММП в магнитосферу. Полученные при этом параметры магнитосферы:  $R_1 = 2R_M$  и радиус полярной шапки, найденный по потоку в долях хвоста,  $\theta_{pc} = 37,5^\circ$ . (б) Расчёты экстремально сжатой магнитосферы: давление солнечного ветра  $\sim 84 \text{ нПа}$ , что соответствует  $R_1 = 1,1R_M$  и  $\theta_{pc} = 47^\circ$ ; ММП  $40 \text{ нТл}$  с коэффициентом проникновения в магнитосферу  $\sim 0,4$ .

меридиане полдень – полночь. На рисунке 7а представлена магнитосфера при исключительно слабом давлении солнечного ветра. При этом формируется максимальный размер магнитосферы. На рисунке 7б показана магнитосфера при большом давлении солнечного ветра. Магнитопауза приближается к поверхности планеты, магнитное поле в подсолнечной точке достигает  $470 \text{ нТл}$ , нейтральная линия в хвосте расположена на  $\sim -2,5R_M$ . Расчёты проводились для южного ММП  $\sim 40 \text{ нТл}$ .

Кратко перечислим другие часто используемые модели магнитосферы Меркурия, описанные в [96]. Сарантос с соавторами [97] использовали модифицированную модель земной магнитосферы Тоффолетто и Хилла [98] для изучения вопроса о том, как ММП влияет на проникновение ионов солнечного ветра к Меркурию. В этой аналитической модели магнитопауза, представляющая собой цилиндр с ночной стороны и полусферу с дневной, полностью экранирует магнитосферное поле. Проникающее ММП прибавляется к магнитосферному полю как возмущение, при этом нормальная компонента магнитного поля на магнитопаузе является свободным параметром. Угол наклона диполя считается равным нулю.

Глобальное МГД моделирование [99, 100] и гибридное моделирование [101–103] взаимодействия солнечного ветра с Меркурием дают качественно похожие результаты, особенно в оценке влияния  $B_z$  и  $B_x$  ММП на

топологию дневной магнитосферы. В частности, все эти модели дали близкие значения для границы полярной шапки Меркурия ( $45–60^\circ$ ).

Лукьянин с соавторами [104] построили модель магнитосферы Меркурия масштабированием модели земной магнитосферы Цыганенко T89 [61]. Магнитопауза задавалась только как граница вычислений. Энгэл [105] масштабированием модели Берда [106] смоделировала магнитное поле хвоста магнитосферы Меркурия для первого и третьего пролётов Маринер 10. Отдельно масштабировались области вблизи планеты и в хвосте. Лухманн с соавторами [107] использовали масштабированную модель Цыганенко для земной магнитосферы T96 [63], которая учитывает эффекты  $B_z$  и  $B_y$  ММП. Они смоделировали возмущённую магнитосферу Меркурия во время первого пролёта Маринер 10, полагая, что ММП менялось только по направлению.

Европейским космическим агентством планируется проект БепиКоломбо (BepiColombo), цель которого — исследование вопросов о происхождении и эволюции Меркурия, а также поиски льда на планете. Возможно, проект будет включать два искусственных спутника Меркурия с полярными орбитами и один спускаемый аппарат. Один из искусственных спутников будет изучать планету, другой — магнитосферу. В разработке второго спутника будет принимать участие Япония. Запуск к Меркурию планируется провести в 2009–2013 гг.

#### 4. Магнитосфера Юпитера

Юпитер — самая крупная планета Солнечной системы. Он находится на расстоянии 5,2 а.е. от Солнца. Период обращения Юпитера вокруг Солнца 12 земных лет, а вокруг своей оси — около 10 ч. Экватор Юпитера наклонен на  $3^\circ$  к его орбите. Вокруг Юпитера врачаются 63 спутника. Как у большинства планет-гигантов, поток тепла из недр Юпитера превышает приток солнечного тепла. Плотность Юпитера составляет  $1,33 \text{ г см}^{-3}$ ; он состоит в основном из водорода (86 %) и гелия (14 %) и не имеет твёрдой поверхности. Атмосфера Юпитера (самая массивная в Солнечной системе) имеет толщину свыше 1000 км. Давление под атмосферой настолько велико, что молекулярный водород превращается в жидкость, а ещё глубже переходит в жидкотвёрдое состояние. Юпитер обладает самым мощным магнитным полем, поэтому у него самая протяжённая магнитосфера, простирающаяся за орбиту Сатурна.

Протяжённости магнитосфер обычно характеризуются расстоянием от центра планеты до подсолнечной точки магнитопаузы  $R_1$ . Для Земли это расстояние порядка 10 земных радиусов; для Юпитера — в среднем около 100 юпитерианских радиусов (радиус Юпитера  $R_J = 7,14 \times 10^7 \text{ м}$ ). Полярные сияния и радиоизлучение Юпитера более мощные, чем у других планет. Дипольный магнитный момент Юпитера направлен на север, противоположно магнитному моменту Земли, и равен  $|\mathbf{M}_J| \approx 4,2 \times 10^7 \text{ нТл } R_J^3$ . Угол наклона диполя к оси вращения планеты составляет  $\sim 9,6^\circ$ .

Магнитное поле Юпитера, как и других планет, возникло, по-видимому, под действием гидромагнитного динамо. Полагают, что внутренняя часть планеты жидкая и состоит из сплава жидкого металлического водорода и гелия. Необходимым условием для работы механизма динамо является нарушение геометрической

симметрии [108]. Поэтому отличный от нуля угол наклона диполя к оси вращения может играть существенную роль в процессе динамо.

Магнитосфера Юпитера обладает не только большими размерами и мощностью по сравнению с магнитосферой Земли. Существуют ещё два дополнительных фактора, определяющих различие этих магнитосфер, — быстрое вращение Юпитера и наличие мощного источника магнитосферной плазмы — спутника Юпитера Ио. Благодаря сильнейшей вулканической активности Ио, находящаяся на расстоянии  $\sim 5,9R_J$  от планеты, поставляет в магнитосферу Юпитера нейтральный газ, богатый серой, двуокисью серы, кислородом, натрием. Из испускаемого Ио газа посредством ионизации и зарядки образуется плазма, состоящая главным образом из ионов водорода, кислорода и серы. Часть этой плазмы вблизи орбиты Ио образует плазменный тор, который можно наблюдать даже при помощи наземных телескопов. Скорость поступления плазмы в тор Ио  $\sim 1 \text{ т с}^{-1}$  [109].

Плазменный тор Ио динамически неустойчив. В результате перестановочной неустойчивости возникает разлёт плазмы от тора (детали этого процесса до сих пор до конца не выяснены). В перестановочной неустойчивости типа Рэлея — Тейлора центробежная сила играет роль силы тяжести. Возникающий при этом радиальный разлёт приводит к отставанию плазмы от твердотельного вращения.

В результате совместного действия быстрого вращения и внутримагнитосферного образования плазмы создаётся новый, отсутствующий в магнитосфере Земли мощный источник магнитного поля — магнитодиск Юпитера. На каждой силовой линии магнитного поля центробежная сила максимальна в точке наибольшего удаления от оси вращения. Геометрическое место этих точек задаёт поверхность, расположенную между плоскостями географического и магнитного экваторов. В результате плазма концентрируется в сердцевине магнитосферы в низкоширотной области, формируя магнитодиск. Это тонкий токовый слой вблизи экваториальной плоскости магнитосферы, азимутальный ток в котором убывает обратно пропорционально расстоянию от центра планеты в степени  $\sim 0,8 - 1,7$  [110]. Полный ток в диске  $\sim 10^8 \text{ А}$  [111, 112]. Вне магнитодиска магнитное поле почти радиально, оно направлено от Юпитера севернее диска и к Юпитеру южнее диска. В отличие от магнитосферы Земли, большая часть энергии магнитосферы Юпитера черпается из энергии вращения планеты. Эффективный магнитный момент магнитодиска превышает магнитный момент Юпитера в  $\sim 2,6$  раза [112].

Первые непосредственные измерения магнитного поля в магнитосфере Юпитера были проведены на КА Пионер 10 и 11 (Pioneer 10, 11), запущенных в декабре 1973 и в декабре 1974 г. соответственно. Именно тогда был обнаружен магнитодиск Юпитера. Поскольку Пионер 10 вышел из магнитосферы в  $\sim 5 \text{ ч } 20 \text{ мин}$  по местному времени (LT), а Пионер 11 вблизи местного полдня при северной широте  $\sim 40^\circ$ , эти космические аппараты не могли наблюдать хвост юпитерианской магнитосферы (оба аппарата входили в магнитосферу Юпитера утром).

Следующие непосредственные измерения в магнитосфере Юпитера были проведены на космических кораблях Вояджер 1 и 2 (Voyager 1, 2). Вояджер 2 был запущен

20 августа 1977 г., а Вояджер 1 — несколько позже, 5 сентября 1977 г., по более быстрой траектории. К Юпитеру Вояджер 1 приблизился 5 марта 1979 г., а Вояджер 2 — 9 июля 1979 г. Оба космических аппарата обнаружили магнитный хвост Юпитера, так как Вояджер 1 вышел из магнитосферы около 4 ч LT, а Вояджер 2 — в 2 ч 40 мин LT. Согласно этим наблюдениям, диаметр магнитного хвоста Юпитера составляет  $\sim 300 - 400R_J$  [113, 114], а в длину хвост достигает орбиты Сатурна. В удалённом хвосте измеренная плотность плазмы  $< 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ , а радиальное магнитное поле  $\leqslant 0,3 \text{ нТл}$ . Юпитерианский хвост, как и геомагнитный, возник в результате взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой планеты.

Вояджер 1 зафиксировал тонкий (толщиной  $< 30 \text{ км}$ ) магнитодиск и сделал цветные снимки поверхностей спутников Юпитера, мимо которых он пролетал: Амальтеи, Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто. Были впервые обнаружены вулканы на Ио, среди них по крайней мере 8 действующих. Оказалось, что Ио — наиболее вулканически активное небесное тело в Солнечной системе, извергающее самую горячую лаву с температурой  $1700^\circ\text{C}$ .

Траектории Пионер 10 и Вояджер 1 и 2 лежали на низких широтах. Космический аппарат Улисс (Ulysses) был запущен с мыса Кеннеди 6 октября 1990 г. В феврале 1992 г. Улисс достиг магнитосферы Юпитера в  $\sim 10 \text{ ч } 30 \text{ мин LT}$  на северной широте  $\sim 5^\circ$ , а вышел из неё около 18 ч LT при южной широте  $\sim 40^\circ$ .

Искусственный спутник Юпитера Галилео (Galileo), запущенный в октябре 1989 г., начал свою работу на орбите Юпитера в декабре 1995 г. Галилео прошёл на расстоянии 835 км от Ганимеда — крупнейшего в Солнечной системе планетарного спутника, обнаружив у него собственное магнитное поле. Затем он исследовал другой спутник Юпитера — Каллисто, поверхность которой оказалась покрытой кратерами. На ледяном спутнике Европы были обнаружены многочисленные разломы льда. Высказывались предположения, что подо льдом может находиться солёная вода, в которой возможны некоторые примитивные формы жизни. Такие же океаны, возможно, существуют под ледяной корой Ганимеда и Каллисто. Также Галилео исследовал полярные сияния на Ио и Юпитере и тор Ио. В сентябре 2003 г. после завершения 35-го витка вокруг Юпитера Галилео был уничтожен, погрузившись в атмосферу Юпитера.

Космический аппарат Кассини (Cassini) был запущен в 1997 г. к Сатурну, к которому он приблизился 1 июля 2004 г. Межпланетный полёт Кассини включал пролёты Венеры, Земли и Юпитера. Орбиту Юпитера Кассини пересёк 30 декабря 2000 г., двигаясь почти по касательной к головной ударной волне и магнитопаузе. При этом было обнаружено влияние параметров солнечного ветра на положение этих поверхностей.

Ещё один космический аппарат Нью Горизонс (New Horizons), запущенный 19 февраля 2006 г., приблизился к Юпитеру в феврале 2007 г. во время минимума солнечной активности и исследовал ночную сторону Юпитера, в частности, полярные сияния, а также магнитосферный хвост. Кроме того, были получены данные по эволюции облаков аммиака в атмосфере. Сейчас Нью Горизонс находится за орбитой Сатурна. В июле 2015 г. планируется исследование с его помощью Плутона и его спутника Харона, а в 2016–2020 гг. — пояса Койпера (Kuiper belt).

В отличие от данных, полученных на КА Вояджер, Улисс в феврале 1992 г. обнаружил во внешней низкоширотной магнитосфере Юпитера вблизи полуденного меридиана крупномасштабные антикоротационные потоки плазмы [115–118]. При первом пересечении КА Улисс границы магнитосферы Юпитера магнитные поля по обе стороны магнитопаузы были примерно равны. Следовательно, должны были быть равны и давления плазмы солнечного ветра и магнитосферы (в случае Земли магнитосферная плазма намного более разреженная, чем межпланетная). У Юпитера значительный вклад в баланс давлений вносят тяжелые ионы, полученные из нейтралов, выброшенных Ио. Кроме того, плазма магнитосферы Юпитера образуется в результате ионизации нейтральных атомов его атмосферы, нейтральных частиц торов, связанных с другими спутниками, и нейтральной межзвездной среды с пренебрежимо малой плотностью. Результаты наблюдений показали, что главный вклад даёт Ио. Таким образом, на величину расстояния до подсолнечной точки магнитопаузы Юпитера влияют не только динамическое давление и магнитное поле солнечного ветра, но и состояние вулканической активности Ио. Пересечения дневной магнитопаузы Юпитера наблюдались на расстояниях  $50\text{--}150R_J$  [119].

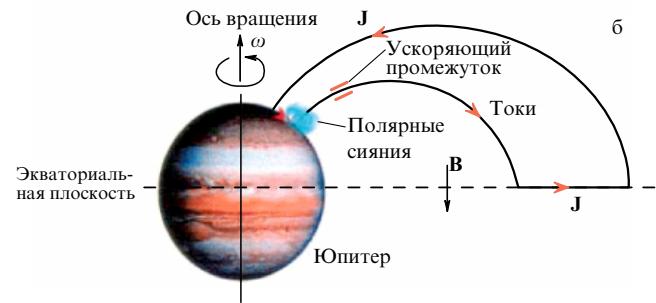
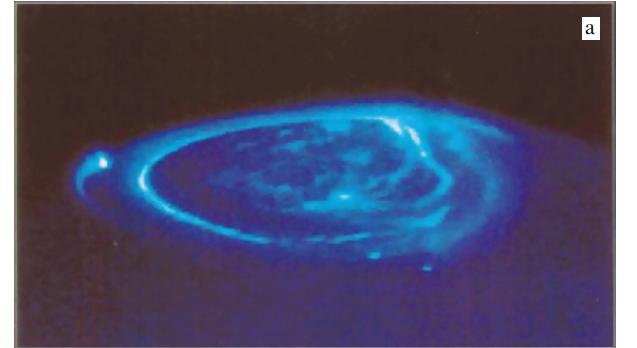
Юпитер — быстро вращающаяся планета с сильным магнитным полем. Юпитерианская атмосфера передаёт момент вращения от поверхности планеты к ионосфере, где плазма переходит в режим коротации благодаря столкновениям с нейтралами. В приближении твердотельного вращения электрическое поле коротации определяется формулой

$$\mathbf{E}_{\text{cor}} = -[\boldsymbol{\Omega}_J \times \mathbf{r}] \times \mathbf{B}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{B}$  — магнитное поле,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор, проведённый из центра Юпитера,  $\boldsymbol{\Omega}_J \approx 1,76 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  — угловая скорость вращения Юпитера. Электрическое поле коротации передаётся в магнитосферу в предположении эквипотенциальности магнитных силовых линий. В плоскости магнитного экватора коротационное электрическое поле направлено от Юпитера и его величина составляет  $E_r = 5,3(R_J/L)^2 \text{ В м}^{-1}$ , где  $L$  — расстояние в экваториальной плоскости от центра Юпитера, выраженное в юпитерианских радиусах. При твердотельном вращении скорость  $V_{\text{rigid}} = 12,6L \text{ км с}^{-1}$ .

Полярные сияния Юпитера исследовались как в ультрафиолетовом диапазоне при помощи космического телескопа Хаббл, так и в инфракрасном на наземных телескопах [120]. В полярных сияниях Юпитера постоянно присутствуют непрерывные относительно стабильные овалы свечения, окружающие северный и южный магнитные полюса и проектирующиеся вдоль замкнутых силовых линий в сердцевину магнитосферы (на расстояния  $\geq 20\text{--}30R_J$ ). Свечение овалов вызвано высыпанием электронов со средней энергией  $5\text{--}150 \text{ кэВ}$ . По доплеровскому смещению линии  $\text{H}_3^+$  ионосферных ионов установлено, что овалы связаны с отставанием от твердотельного вращения магнитосферной плазмы [121].

На рисунке 8а показана структура полярных сияний Юпитера, наблюдавшихся при помощи космического телескопа Хаббл в ультрафиолетовых лучах [122]. Полярные сияния Юпитера включают в себя (по мере увеличения широты): 1) свечения от спутников Ио,



**Рис. 8.** (а) Полярные сияния на Юпитере в ультрафиолетовых лучах, полученные при помощи космического телескопа Хаббл [122]. (б) Схема электрической цепи, возникающей при генерации полярных сияний Юпитера (см. [73]).

Европы, Ганимеда; 2) узкие яркие авроральные овалы на кошиrote  $15\text{--}16^\circ$ ; 3) меняющиеся свечения полярных шапок, которые ограничены приэкваториальной стороной главными овалами.

Хилл [123] интерпретировал главные авроральные овалы Юпитера как ионосферные корни вытекающих продольных токов, связанных с частичным ковращением магнитосферной плазмы, движущейся от её источника — плазменного тора Ио — во внешнюю магнитосферу, а оттуда в солнечный ветер. Для передачи момента импульса Юпитера вовне необходимо, чтобы ток по ионосфере тёк к экватору, а в плоскости магнитосферного экватора — радиально от планеты. Продольные токи, замыкающие эти поперечные токи, направлены от Юпитера на более низких широтах и к Юпитеру на высоких широтах. На рисунке 8б показана упрощенная модель такой токовой системы [73]. Обычно считается, что вытекающие токи переносятся магнитосферными электронами, проходящими через ускоряющий промежуток. Этот ускоряющий промежуток с конечной разностью потенциалов появляется, когда величина продольного тока превышает некоторое предельное значение, определяемое, например, плотностью носителей заряда. Под влиянием конечной разности потенциалов электроны ускоряются вниз к ионосфере.

На экваториальных расстояниях  $\sim 20R_J$  от центра планеты наблюдалось замедление азимутальной скорости по сравнению с твердотельным вращением на  $20\text{--}30\%$  [124], связанное с эффектом радиального разлёта плазмы от тора Ио с сохранением момента импульса. Следовательно, на силовых линиях, проходящих через эту область, должны быть сосредоточены продольные токи. Поскольку именно эта область проектируется в авроральные овалы, можно заключить, что они соот-

ветствуют зонам торможения коротирующей магнитосферной плазмы. Таким образом, источником энергии свечения главных полярных овалов является вращение Юпитера. В случае Земли энергия свечения полярных сияний в конечном счёте черпается из солнечного ветра.

Отставание плазмы от твердотельного вращения в низкоширотной магнитосфере Юпитера зарегистрировали Пионер 10, 11, Вояджер 1, 2, Уллисс и Галилео. Это отставание составляло  $\sim 50\%$  в средней магнитосфере и возрастало ещё больше во внешней магнитосфере. Там, где благодаря разлёту плазмы движение плазмы определяет величину и конфигурацию магнитного поля (в частности, в магнитодиске), заметно отставание от твердотельного вращения.

Эффективное торможение угловой скорости из-за радиального разлёта плазмы в низкоширотной магнитосфере передаётся в ионосферу вдоль высокопроводящих магнитных силовых линий. Это приводит к нарушению твердотельного вращения в ионосфере, которому соответствует потенциал электрического поля

$$U_{\text{rig}} = B_{0J} \Omega_J R_J^2 \sin^2 \vartheta, \quad (5)$$

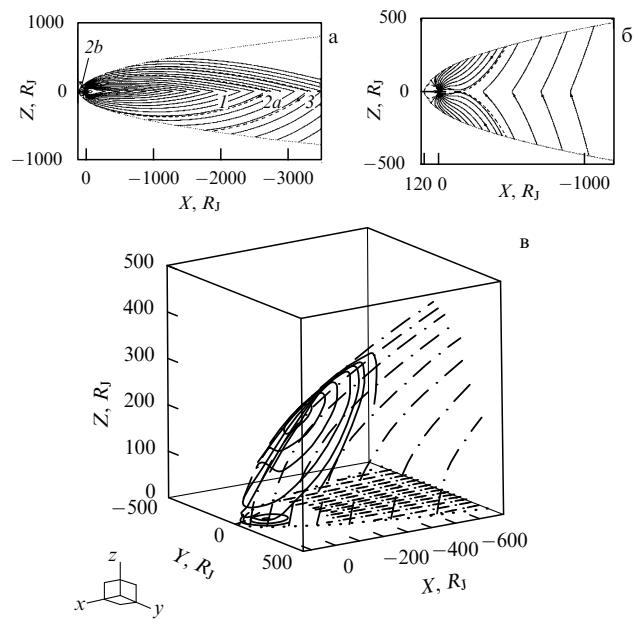
где  $B_{0J}$  — поле на экваторе Юпитера, а  $\vartheta$  — коширота. Исправленное с учётом дифференциального вращения в экваториальной магнитосфере выражение для потенциала электрического поля вращения на уровне ионосферы [112]

$$U_{\text{cor}} = B_{0J} \gamma \Omega_J R_J^2 \sin^2 \vartheta + C, \quad (6)$$

где  $\gamma$  и  $C$  — определяемые из наблюдений константы, зависящие от экваториального удаления от центра Юпитера магнитной силовой линии, ионосферный корень которой имеет полярный угол  $\vartheta$ . Константы  $C$  обеспечивают непрерывность потенциала на границах между областями с разными режимами вращения (различными  $\gamma$ , где  $\Omega = \gamma \Omega_J$  — эффективная угловая скорость вращения). Там, где вращение отсутствует, мы полагаем  $U_{\text{cor}} = 0$ . Из уравнения (6) следует, что линии постоянной широты являются эквипотенциалами электрического поля вращения.

По данным Пионер 10 [119] было обнаружено существование открытых силовых линий, вдоль которых энергичные частицы покидали магнитосферу Юпитера. Следовательно, несмотря на то что Юпитер обладает мощным собственным магнитным полем и ещё более сильным полем магнитодиска, расположенного примерно от  $18$  до  $92R_J$  [125] (расстояние до внешнего края магнитодиска меняется в зависимости от величины  $R_1$ ), слабое ММП, проникшее в магнитосферу, оказывает существенное влияние на топологию магнитосферного поля Юпитера.

В параболоидной модели магнитосферы Юпитера [112, 126, 127] магнитопауза представлена параболоидом вращения. Эта модель включает в себя магнитное поле юпитерианского диполя и магнитное поле токов магнитопаузы, экранирующих его, поле токовой системы магнитосферного хвоста (токи поперёк хвоста и токи их замыкания на магнитопаузе), магнитное поле токов магнитодиска и токов его экранировки. В параболоидной модели граничные условия на магнитопаузе для частично проникающего магнитного и электрического



**Рис. 9.** Магнитосфера Юпитера, рассчитанная в параболоидной модели. Показаны магнитные силовые линии в меридиональном сечении полдень– полночь открытой модели магнитосферы Юпитера при южном (а) и северном (б) ММП. Компоненты ММП в юпитерианской солнечно-магнитосферной системе координат: а)  $B_{\text{IMFx}} = -0,26$  нТл,  $B_{\text{IMFy}} = 0$  нТл,  $B_{\text{IMFz}} = -0,2$  нТл,  $k_J = 0,1$  (а); б)  $B_{\text{IMFx}} = -0,02$  нТл,  $B_{\text{IMFy}} = 0$  нТл,  $B_{\text{IMFz}} = 0,5$  нТл,  $k_J = 1$  (б). Пунктирные кривые разделяют магнитные линии различных топологических типов: 1 — замкнутые силовые линии, 2a и 2b — открытые силовые линии южной и северной полярных шапок; 3 — межпланетные силовые линии, проникшие в магнитосферу [112]. (в) Трёхмерная юпитерианская магнитосфера при северном ММП. Компоненты ММП, проникшего в магнитосферу в юпитерианской солнечно-магнитосферной системе координат:  $B_{\text{IMFx}} = -0,02$  нТл,  $B_{\text{IMFy}} = 0$  нТл,  $B_{\text{IMFz}} = 0,5$  нТл. Возле линий постоянной северной широты (сплошные линии) цифрами обозначены юпитерианские широты в градусах; возле линий  $y = \text{const}$  на магнитопаузе (штрих-пунктирные линии) отмечены значения  $y$  в радиусах Юпитера [112].

поля солнечного ветра были выбраны в виде:  $\mathbf{b} = k_J \mathbf{B}_{\text{IMF}}$  и  $\mathbf{E} = k_J \mathbf{E}_{\text{IMF}}$ , где  $k_J$  — коэффициент проникновения, а  $\mathbf{B}_{\text{IMF}}$  и  $\mathbf{E}_{\text{IMF}}$  — невозмущённые межпланетные магнитное и электрическое поля. Вдоль высокопроводящих магнитных силовых линий электрический потенциал с магнитопаузой может быть спроектирован в магнитосферу. Магнитодиск Юпитера не имеет аналогов в земной магнитосфере; подробно его моделирование описано в [112, 126, 127].

Результаты расчётов в параболоидной модели структуры магнитосферы Юпитера для южного и северного ММП показаны на рис. 9а, б [112]. При  $B_{\text{IMFy}} = 0$  электрический потенциал, созданный на магнитопаузе Юпитера МГД-генератором солнечного ветра, равен  $U_{\text{sw}} = y k_J V_{\text{sw}} B_{\text{IMFz}} R_J$ . Значение коэффициента проникновения ММП для магнитосферы Юпитера, возможно, больше, чем для Земли —  $k_J$  может быть близок к единице [112]. Таким образом, эквипотенциали электрического поля  $U_{\text{sw}} = \text{const}$  совпадают с линиями  $y = \text{const}$ . Северное ММП для Юпитера аналогично южному для Земли, и наоборот. При южном ММП пересоединение происходит в нейтральных точках магнитного поля вблизи каспов (рис. 9а), а при северном — на квазинейтральной линии, расположенной на дневной низкоши-

ротной магнитопаузе и в токовом слое хвоста (рис. 9б). При этом картина аналогична полученной Данжи для Земли при сильном южном ММП. Различие возникает из-за быстрого вращения мощного магнитного поля Юпитера. Из рисунка 9 следует, что даже очень малая доля ММП, проникшая в магнитосферу Юпитера ( $b = 0,03$  нТл), существенно влияет на структуру магнитосферного магнитного поля.

На рисунке 9в представлены результаты вычислений магнитного и электрического полей в параболоидной модели магнитосферы Юпитера при северном ММП с  $k_J = 1$ :  $B_{IMF_x} = -0,02$  нТл,  $B_{IMF_y} = 0$  нТл,  $B_{IMF_z} = 0,5$  нТл [112]. Сплошными линиями показаны эквипотенциали электрического поля коротации, образующие вихри в экваториальной плоскости магнитосферы и на магнитопаузе. Штрихпунктирными линиями обозначены эквипотенциали электрического поля, генерируемого солнечным ветром. В долях хвоста твердотельное вращение, вероятно, сохраняется до расстояний, на которых скорость коротации становится порядка альвеновской (до альвеновского радиуса) при условии эквипотенциальности магнитных силовых линий. За альвеновским радиусом информация о твердотельном вращении не может распространяться вдоль магнитных силовых линий с альвеновской скоростью. Альвеновская скорость в долях хвоста Юпитера намного больше, чем в экваториальной плоскости, и составляет  $\sim 31 \times 10^3$  км с<sup>-1</sup> [128, 129], поскольку в долях хвоста плотность плазмы  $\sim 10^{-5}$  см<sup>-3</sup>. В этом приближении альвеновский радиус в долях хвоста  $\sim 2,5 \times 10^3 R_J$ . Таким образом, при северном ММП твердотельное вращение вдоль открытых магнитных силовых линий может передаваться до магнитопаузы [112]. Если нарушается эквипотенциальность магнитных силовых линий, то на открытых силовых линиях при северном ММП возникает отставание от твердотельного вращения.

Наблюдаемые в утренне-дневном секторе при южном ММП на КА Улисс антикоротационные и направленные от Солнца потоки в экваториальной магнитосфере Юпитера и на линиях, связанных с полярными шапками, хорошо согласуются с результатами расчётов в параболоидной модели, учитывающих торможение вращения магнитосферной низкоширотной плазмы и проникновение магнитного поля солнечного ветра в магнитосферу. Наличие таких потоков во время пролёта Улисс и их отсутствие при пролётах Пионер 10 и Вояджеров связано с различной ориентацией северо-южной компоненты ММП для этих случаев. При северном ММП модельные вычисления демонстрируют в дневной и утренней экваториальной юпитерианской магнитосфере преобладание ковращения и отсутствие антикоротационных потоков, а в хвосте за квазинетральной линией — движение в антисолнечном направлении [112]. Эти результаты хорошо согласуются с данными КА Пионер 10 и Вояджеров, наблюдавших при северном ММП в экваториальной магнитосфере Юпитера ковращение до подсолнечной магнитопаузы и движение в антисолнечном направлении в хвосте при  $r > 150 R_J$  (так называемый "магнитосферный ветер").

Перечислим некоторые из существующих в настоящее время моделей магнитосферы Юпитера. Это модели Хилла с соавторами [130], Бариша и Смита [131], Смита с соавторами [132], Берда и Джексона [133], Гоэрца [134–136], Энгэл и Берда [137], Акуны с соавторами [138],

Коннерней с соавторами [111, 139, 140], Кураны [141]. Большинство из них описывали данные, полученные при редких пролётах на космических аппаратах в отдельных областях юпитерианской магнитосферы. Вклад ММП во взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой не принимался во внимание. В отличие от большинства существующих моделей, параболоидная модель Юпитера применима не только в экваториальной плоскости и вблизи планеты, но и на высоких широтах и во внешней магнитосфере. Кроме того, это единственная аналитическая модель, учитывающая влияние ММП.

В модели Кураны [141] для вычисления внутреннего поля применялось разложение по сферическим гармоникам, использовавшееся в модели О6 [142], а внешнее поле рассчитывалось по эйлеровым потенциалам. В частности, магнитное поле токового диска моделировалось при помощи эйлерова потенциала, используемого в [119, 143]. В модели Кураны [141] учитывалась сложная форма и геометрия магнитодиска Юпитера, а также реалистичный профиль азимутальной плотности тока в диске. При радиальном расстоянии больше  $\sim 30 R_J$  магнитодиск располагался в магнитном экваторе, а затем вытягивался вдоль географического экватора. Такое поведение магнитодиска соответствует наблюдениям и обусловлено разлётом плазмы, её отставанием от твердотельного вращения и сохранением момента импульса. Также рассчитывалось отклонение силовых линий от меридиональной плоскости, вызванное радиальными токами.

В модели Коннерней с соавторами [140] предполагается аксиальная симметрия магнитосферного поля, включающего магнитодиск. Разложение планетарного магнитного поля по сферическим гармоникам проводилось с использованием непосредственных измерений магнитного поля. Поле магнитодиска моделировалось по данным Вояджер. Хилл [123] описал трёхмерную токовую систему, связанную с главными авроральными овалами Юпитера. Кивелсон и Саусвуд [144], используя наблюдения на Кассини и Галилео, исследовали влияние ММП на магнитосферу Юпитера. Положения магнитопаузы и головной ударной волны менялись при изменении северо-южной компоненты ММП. Волкер с соавторами [145] использовали трёхмерное МГД моделирование взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Юпитера.

Наблюдения на КА Вояджер, Улисс, Галилео, Винд и Кассини показали, что все планеты, обладающие собственным магнитным полем, особенно внешние планеты, создают интенсивное нетепловое радиоизлучение [146]. Радиоволновое излучение внешних планет происходит из авроральных областей и радиационных поясов, а также модулируется некоторыми спутниками. Электроны радиационных поясов Юпитера являются источниками синхротронного излучения в дециметровом диапазоне [147].

В 1955 г. было обнаружено мощное декаметровое радиоизлучение Юпитера [148, 149], которое вскоре было ассоциировано с циклотронным излучением электронов. Это было первым указанием на существование магнитного поля Юпитера. Впоследствии были предложены модели генерации излучения, основанные на циклотронной неустойчивости. В настоящее время предполагается, что авроральное и когерентное радиоизлучение, индуцированное спутниками Юпитера, возникает вследствие циклотронной мазерной неустойчивости, а

радиационные пояса являются источником некогерентного синхротронного радиоизлучения [146]. Усиление и возбуждение излучения мазерной циклотронной неустойчивости обусловлено неравновесностью распределения электронов по скоростям, которое аналогично инверсионной заселённости энергетических уровней мазера и при релаксации приводит к быстрому когерентному излучению [150].

Предполагается, что излучение в средней и высокочастотной части планетарного радиоспектра (от нескольких кГц до нескольких МГц) генерируется циклотронной мазерной неустойчивостью вблизи планеты на силовых линиях, связанных с полярными сияниями. Это гектодекаметровое радиоизлучение Юпитера в  $10^5$  раз сильнее излучения из радиационных поясов [146]. У Юпитера продольные токи, связанные с полярным овалом, возникают в результате нарушения твердотельного вращения, поэтому источники гектометрового и декаметрового радиоизлучения находятся на всех локальных временах. Авроральное радиоизлучение Юпитера генерируется вдоль высокоширотных магнитных силовых линий ускоренными электронами, вызывающими полярные сияния [151]. Было обнаружено, что радиоизлучение в гектометровом диапазоне варьируется вместе с полярными сияниями. Одновременные наблюдения на КА Кассини и Галилео гектометрового радиоизлучения и полярных сияний Юпитера в крайнем ультрафиолетовом диапазоне показали, что триггером интенсификации этих двух типов излучения является распространение от Солнца межпланетных ударных волн. С приходом ударной волны к Юпитеру возникает сжатие и перестройка магнитосферы, что приводит к возбуждению электрических полей и ускорению электронов вдоль авроральных силовых линий [151].

В последнее десятилетие проводился постоянный мониторинг радиоизлучения Юпитера с помощью космических и наземных измерений [152]. КА Галилео изучал радиоизлучение в километровом и гектометровом диапазонах; КА Винд и наземные телескопы — в гектометровом и декаметровом диапазонах. В комбинации с наземными наблюдениями использовалась конкретная геометрическая конфигурация между КА Кассини, приближающимся к Юпитеру, и Винду, облетающим Землю; Галилео, вращающимся вокруг Юпитера, и Винду. Это позволило провести радиотомографию Юпитера [152].

Декаметровое радиоизлучение Юпитера имеет спорадический характер, т.е. состоит из отдельных всплесков разной интенсивности. Несмотря на спорадичность, декаметровое радиоизлучение Юпитера обладает свойствами, свидетельствующими о связи с устойчивой магнитной конфигурацией [150]. По измеренному на Земле декаметровому радиоизлучению Юпитера, коррелирующему с долготой его центрального меридиана, был определён период вращения планеты. Также было обнаружено, что интенсивность декаметрового радиоизлучения возрастает в некоторых активных юпитерианских областях. Удалось выделить декаметровое радиоизлучение Юпитера, контролируемое Ио. При обтекании Ио магнитосферной плазмой Юпитера возбуждаются альвеновские крылья, связывающие Ио с ионосферой Юпитера в северном и южном полушариях. Максимальный ток в альвеновских крыльях порядка  $10^8$  А. В индуцированном электрическом поле ускоряются элек-

троны, участвующие в генерации декаметрового радиоизлучения [150].

Особенности радиоизлучения Юпитера, связанного с Ио и её плазменным тором, изучались, в частности, в [153, 154]. Статистический анализ декаметрового радиоизлучения Юпитера, модулированного Ио, показал, что оно зависит от долготы центрального меридиана Юпитера. Это связано с тем, что существуют "активные" долготы Ио — особые положения Ио на орбите, которые фиксированы по отношению к юпитерианскому магнитному полю и на которых наиболее часто возникает связанное с Ио излучение. Механизм формирования "активных" долгот Ио рассмотрен в [153, 154]. Он определяется двумя факторами: во-первых, модуляющей эффективности ускорения частиц в ионосфере Ио при её движении в неоднородном магнитосферном магнитном поле Юпитера, во-вторых, рассеянием по питч-углам ускоренных электронов в плазменном торе Ио. Рассмотренный механизм позволил объяснить преимущественную локализацию источников радиоизлучения в северном полушарии Юпитера [154].

Движение Ио в магнитном поле Юпитера может вызвать ускорение электронов в её ионосфере [153]. При движении Ио по орбите в её ионосфере индуцируется электрическое поле  $E_i$ , перпендикулярное магнитному полю. Однако благодаря анизотропной проводимости ионосферы Ио в ней возникают педерсеновский (вдоль  $E_i$ ) и холловский (перпендикулярный магнитному и электрическому полям, а также поверхности Ио) токи. Благодаря непроводящей атмосфере холловский ток не замкнут. Поэтому в ионосфере возникает разделение зарядов. Электрическое поле, связанное с разделением зарядов, имеет проекцию вдоль магнитного поля, величина которой сравнима с величиной  $E_i$ . Эта проекция электрического поля ускоряет электроны. В дополнение к влиянию электрического поля при столкновениях с атомами быстрые электроны приобретают скорость, превышающую тепловую, что приводит к возникновению бунемановской неустойчивости и к дополнительному нагреву электронов. В результате вдоль магнитного поля возникает "убегание" быстрых электронов. Оценены значения типичных энергий и потоков ускоренных электронов в силовой трубке Ио. Энергия, запасённая в электронных потоках, достаточна для поддержания электромагнитного излучения магнитных силовых трубок Ио [153].

Таким образом, часть декаметрового радиоизлучения Юпитера модулируется спутником Ио, индуцирующим дополнительное высыпание электронов в магнитной трубке, связывающей Ио с Юпитером. Кроме того, как показали измерения, проведённые на Галилео и Вояджер 1 и 2, на радиоизлучение Юпитера влияют также Каллисто и Ганимед.

В июле 1994 г. произошло необычайно редкое космическое событие — столкновение кометы Шумейкера-Леви 9 с Юпитером. Комета состояла из 25 светящихся объектов, вытянувшихся в цепочку длиной несколько миллионов километров, предположительно осколков единого космического тела. Согласно траекторным расчётом, в июле 1992 г. это космическое тело уже пролетало вблизи Юпитера и было разрушено, вероятно, приливными силами, вызванными градиентом гравитационного поля Юпитера [155]. Это столкновение сопровождалось различными эффектами в атмосфере, ионосфере и

магнитосфере Юпитера. За процессом столкновения наблюдали почти все крупные обсерватории мира, космический телескоп Хаббла, космические аппараты Галилео, Улисс и Вояджер. Были зарегистрированы вспышки излучения в широком спектральном диапазоне, вызванные падением распавшихся осколков кометы. Ударом были инициированы мощные газовые выбросы. В атмосфере Юпитера возникли крупномасштабные долгоживущие вихри. При падении осколков кометы наблюдалось уярчение радиационных поясов Юпитера в дециметровом диапазоне, генерация искусственных полярных сияний в обоих полушариях, ослабление яркости плазменного тора Ио в крайнем УФ-диапазоне и ряд других явлений. В обзоре [155] собраны данные наблюдений и предложена физическая модель, непротиворечиво их объясняющая.

Следует отметить, что большинство измерений в магнитосфере Юпитера, включая миссии Вояджер и Галилео, было проведено вблизи экваториальной плоскости, за исключением участков траекторий КА Пионер 11 и Улисс на выходе из магнитосферы на средних широтах. Первые полярные наблюдения авроральной плазмы и полей Юпитера планируется провести в рамках будущей миссии НАСА Джуно (Juno) [120]. Джуно должен покинуть Землю в августе 2011 г. и, долетев до Юпитера, начиная с 2016 г. стать его спутником, вращаясь от полюса к полюсу на низкой эллиптической орбите. Джуно будет измерять гравитационное и магнитное поля Юпитера и изучать структуру его атмосферы и внутреннее строение. Для изучения происхождения Юпитера Джуно будет измерять общее количество кислорода и азота. Это будет первый космический корабль, определяющий структуру и динамику атмосферы Юпитера ниже слоя облаков. Будут собраны данные по юпитерианскому большому красному пятну, которое можно назвать своего рода вращающимся циклоном, существующим сотни лет. Будет исследоваться природа полярных сияний Юпитера, самых мощных в Солнечной системе. Энергию на Джуно будут вырабатывать солнечные батареи. Поскольку Юпитер находится от Солнца в 5,2 раза дальше Земли, Джуно получит 3,7 % той солнечной энергии, которую он имел бы, находясь на орбите Земли. Траектория Джуно рассчитывается таким образом, чтобы избежать прохождения радиационных поясов Юпитера, более плотных, чем у Земли.

Ещё один будущий проект под названием Лаплас (Laplace) планируется в период с 2015 по 2025 гг. российскими и европейскими учёными. Цель проекта — поиск простейших форм жизни на спутнике Юпитера Европе. Главной задачей проекта является исследование поверхности Европы, на которой, как предполагают, под слоем льда находится океан воды. Планируется включение в проект спускаемого аппарата для бурения поверхностного льда и взятия проб из более глубоких слоёв.

## 5. Магнитосфера Сатурна

Сатурн расположен на расстоянии 9,58 а.е. от Солнца. Он состоит из жидкого водорода и гелия и окружён мощной системой колец и множеством спутников (на сегодняшний день известно 56), самый крупный из которых — Титан, с радиусом 5150 км. Оборот вокруг Солнца Сатурн совершает по почти круговой орбите за

29,5 земных лет. Угол наклона орбиты к плоскости эклиптики составляет  $2^\circ$ , а экваториальная плоскость Сатурна наклонена на  $27^\circ$  к плоскости его орбиты, что обеспечивает смену времён года. Радиус Сатурна  $R_S = 60268$  км. Период вращения Сатурна вокруг оси 10 ч 40 мин. В атмосфере Сатурна содержится 94 % водорода и 6 % гелия. Тепловой поток из недр Сатурна, как и у Юпитера, превышает поток энергии, получаемой от Солнца. Сатурн обладает сильным магнитным полем, дипольный момент направлен на север и равен  $0,21 \text{ Гс } R_S^3$ ; ось магнитного диполя совпадает с осью вращения планеты (для Земли и Юпитера угол с осью вращения составляет  $\sim 10^\circ$ ) и немного смешена вдоль полярной оси (на  $0,04 \pm 0,02 R_S$  [156]). Внутреннее поле Сатурна можно представить дипольным, квадрупольным и октупольным членами. Октупольный член для Сатурна значительно меньше, чем для Земли и Юпитера.

Первым космическим аппаратом, исследовавшим Сатурн, был Пионер 11. Запущенный 15 апреля 1973 г., он оказался на ближайшем расстоянии до планеты 1 сентября 1979 г. Следующими космическими кораблями, прошедшими через магнитосферу Сатурна, были Вояджер 1 и 2. Вояджер 1 приблизился к Сатурну на минимальное расстояние 124000 км 12 ноября 1980 г. При помощи Вояджера 1 были получены фотографии многих спутников Сатурна. Выяснилось, что большинство из них состоит из водяного льда. 12 ноября 1980 г. Вояджер 1 прошёл на расстоянии 4000 км от поверхности самого крупного спутника Сатурна — Титана. На полученном им снимке видна толстая атмосфера, на 90 % состоящая из азота, почти полностью закрывающая поверхность Титана. Вояджер 2 максимально приблизился к Сатурну 26 августа 1981 г. Космические аппараты Пионер 11 и Вояджер 1 и 2 входили в магнитосферу Сатурна вблизи полудня, а выходили утром. КА Кассини, запущенный в 1997 г., приблизился к Сатурну 1 июля 2004 г. и стал его искусственным спутником. В конце первого оборота он доставил спускаемый аппарат Гюйгенс на Титан для исследования его атмосферы.

Магнитосфера Сатурна оказалась промежуточной между земной и юпитеринской. Расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы Сатурна составляет  $R_1 = 17 - 24 R_S$ . Плазма в магнитосфере Сатурна приводится в движение вращением планеты и солнечным ветром. Электрическое поле коротации преобладает над электрическим полем конвекции, генерируемым солнечным ветром, до радиальных расстояний  $21 R_S$  [156]. Твердотельное вращение сохраняется до  $10 R_S$  (в случае Земли вращение заканчивается на  $6 R_E$ ), дальше вращение происходит с угловой скоростью  $\sim 0,3 - 0,8$  скорости твердотельного вращения. Пионер 11 обнаружил протяжённый хвост магнитосферы Сатурна.

Расстояние до подсолнечной точки  $R_1$  зависит от давления солнечного ветра. Во время пролёта Пионер 11 быстрый солнечный ветер ( $V_{sw} = 470 \text{ км с}^{-1}$ ) привёл к сжатию магнитосферы до  $R_1 = 17 R_S$ . Во время пролёта Вояджера 2 солнечный ветер был менее возмущённый и  $R_1 = 19 R_S$ . При пролёте Вояджер 1 во время спокойного солнечного ветра  $R_1 = 23 - 24 R_S$ . Ещё более разреженный и замедленный солнечный ветер был при первом обороте Кассини вокруг Сатурна, при этом  $R_1 = 28 R_S$ .

Быстрое вращение Сатурна и наличие магнитосферной плазмы приводят к образованию относительно сильного кольцевого тока — уменьшенного аналога

магнитодиска Юпитера. В отличие от Юпитера, у которого главный источник магнитосферной плазмы — его спутник Ио, источниками магнитосферной плазмы Сатурна являются ледяные спутники и кольца, атмосфера Сатурна и Титана. Полный интегральный кольцевой ток равен  $\sim 10^7$  А. Размеры кольцевого тока определялись по данным космических аппаратов Пионер 11, Вояджер 1 и 2 и Кассини [157–159]. Оказалось, что внутренняя и внешняя границы кольцевого тока, находящегося в экваториальной магнитосфере, так же как и его толщина, меняются с течением времени. С увеличением размеров системы ( $R_1$ ) при уменьшении динамического давления солнечного ветра увеличиваются расстояния до границ кольцевого тока, величина полного тока в нём и магнитный момент кольцевого тока. Предполагается, что это происходит вследствие баланса радиальных напряжений плазмы в быстро вращающейся магнитосфере [159].

Полярные сияния на Сатурне расположены ближе к полюсам (на кошиrote  $10\text{--}15^\circ$ ), чем на Юпитере ( $16^\circ$ ) [160]. Приполярная граница аврорального овала Сатурна лежит вблизи ожидаемой границы между открытыми и замкнутыми силовыми линиями [161]. Овалы полярных сияний Сатурна вызваны не нарушением твердотельного вращения, как на Юпитере, а связаны с токами, осуществляющими связь магнитосферы с солнечным ветром, как на Земле [160]. Кларк с соавторами [162] отмечали, что полярные сияния Сатурна меняются медленно, некоторые детали участвуют в частичном ковращении, другие нет, что, возможно, указывает на их связь с солнечным ветром. Полярные сияния Сатурна отражают изменения структуры и магнитного поля солнечного ветра [163–166]. Во время бурь в магнитосфере Сатурна, генерируемых солнечным ветром, интенсивность свечения овала возрастает главным образом в утреннем секторе [167].

В то время как скорость солнечного ветра почти не меняется с расстоянием, плотность плазмы уменьшается от  $\sim 5 \text{ см}^{-3}$  на орбите Земли до  $\sim 0,03 \text{ см}^{-3}$  на орбите Сатурна, а величина ММП убывает обратно пропорционально расстоянию от Солнца. Поэтому на орбите Сатурна ММП ( $\sim 0,3 \text{ нТл}$ ) примерно на порядок меньше, чем у Земли ( $\sim 5 \text{ нТл}$ ). Кроме того, меняется средний угол, под которым ММП приходит к орбите по спирали Архимеда. Тем не менее при определённых условиях магнитное и электрическое поля солнечного ветра существенно меняют структуру магнитосферы Сатурна, что, в частности, отражается на полярных сияниях [164–166, 168]. Это происходит, главным образом, когда в солнечном ветре возникают сильные возмущения.

Прямое свидетельство зависимости УФ-сияний на Сатурне от солнечного ветра было впервые получено во время совместных наблюдений, выполненных на КА Кассини и космическом телескопе Хаббл в январе 2004 г., когда Кассини находился вверх по потоку от Сатурна. Во время пролёта Кассини на фазе спада солнечного цикла межпланетная среда на орбите Сатурна была структурирована коротационными взаимодействующими потоками (corotating interaction regions — CIRs) [169]. Солнечный ветер состоял из чередующихся зон с большим магнитным полем и высоким давлением — так называемых зон сжатия — и зон с низким давлением и слабым полем — зон разрежения. Продолжительность этих зон составляла несколько дней. В зонах сжатия в солнечном

ветре магнитное поле достигало  $0,5\text{--}2 \text{ нТл}$ , а в зонах разрежения оно было  $\leq 1 \text{ нТл}$ .

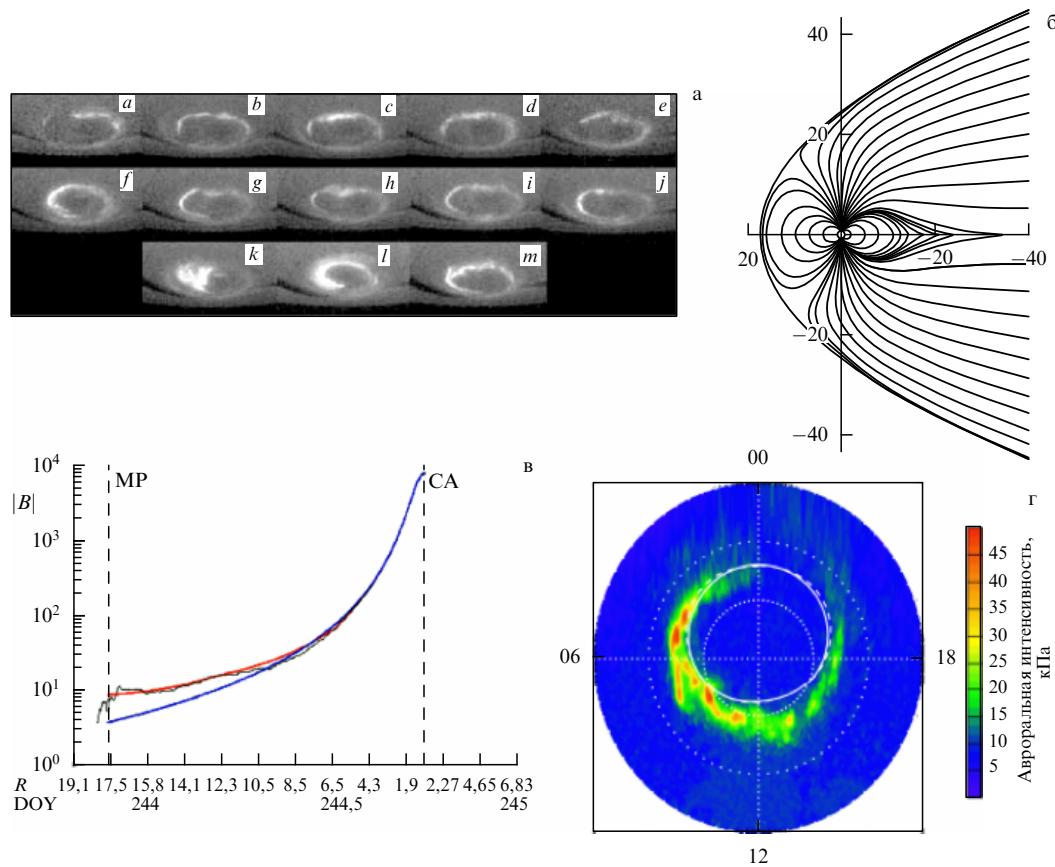
Фотографии, полученные в это время на космическом телескопе Хаббл, приведены на рис. 10а. Зонам разрежения в солнечном ветре соответствует расширенный овал, а зонам сжатия — суженный [161, 163]. В предположении, что приполярная граница сияний Сатурна совпадает с границей области открытых силовых линий, оказывается, что резкое уменьшение потока открытых силовых линий вызвано условиями в межпланетном пространстве — приходом зон сжатия солнечного ветра.

Параболоидная модель магнитосферы Сатурна была построена для описания глобальных токовых магнитосферных систем и учёта взаимодействия с солнечным ветром и его магнитным полем [158, 159, 164–166]. Она включает дипольное собственное поле планеты, поле кольцевого тока, токовую систему хвоста и токи магнитопаузы, экранирующие магнитосферные источники поля. Кроме того, учитывается проникающее в магнитосферу ММП. Каждая токовая система включена в модель в виде самостоятельного блока.

На рисунке 10б показано меридиональное сечение полдень – полночь магнитосферы Сатурна. Расчёты проведены в параболоидной модели с параметрами, найденными по данным, полученным во время входа КА Пионер 11 в магнитосферу [158]. На рисунке 10в сильно изрезанной сплошной кривой (чёрной в электронной версии) показан модуль магнитного поля в логарифмической шкале, измеренный на КА Пионер 11 при входе в магнитосферу Сатурна. Положение магнитопаузы (МР) и точка максимального приближения к Сатурну (СА) показаны вертикальными пунктирными линиями. Вдоль горизонтальной оси отмечены номер дня в году (DOY) и соответствующее расстояние от центра планеты в  $R_S$ . Нижней кривой (синей в электронной версии) показан модуль магнитного поля, рассчитанный в модели SPV — наилучшей модели, описывающей магнитное поле на расстояниях до  $8R_S$ , построенной по совокупности данных, полученных на КА Пионер 11 и Вояджер 1 и 2 [170]. Более гладкой кривой (красной в электронной версии) отмечен результат расчёта в параболоидной модели Сатурна с параметрами, определёнными в работе [158]. Вычисленное поле согласуется с наблюдениями на всём участке траектории Пионер 11 при его подлёте к Сатурну, в отличие от модели SPV, которая хорошо работает только на очень близких расстояниях  $< 4R_S$ .

На рисунке 10г показано сопоставление полярных сияний Сатурна, полученных на космическом телескопе Хаббл 30 января 2009 г., с расчётом границы области открытых силовых линий в параболоидной модели магнитосферы для северного ММП с компонентами  $(-0,3; 0,7; 0,7)$  нТл, измеренного на КА Кассини [166]. В расчётах коэффициент проникновения ММП в магнитосферу Сатурна считался равным  $\sim 0,2$ . Белые кривые показывают результаты модельных вычислений для динамического давления солнечного ветра  $0,03$  (сплошная линия) и  $0,08 \text{ нПа}$  (пунктирная линия). Граница открытых силовых линий хорошо совпадает с приполярной границей овала сияний Сатурна.

В настоящее время параболоидная модель — единственная модель, позволяющая рассчитать глобальное магнитное поле магнитосферы Сатурна и дающая хорошее согласие с наблюдениями. Другие имеющиеся



**Рис. 10.** (а) УФ-снимки полярных сияний Сатурна в южной полярной шапке, полученные на телескопе Хаббл 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 21, 23, 24, 26, 28 и 30 января 2004 г., отмеченные буквами от а до м [161, 163]. Полдень сверху, утро слева. Тёмная дуга внизу каждого снимка обозначает южный полярный лимб планеты. (б) Меридиональное сечение полдень – полночь магнитосферы Сатурна. Расчёты были проведены в параболоидной модели с параметрами, найденными по данным, полученным во время входа КА Пионер 11 в магнитосферу [158]. (в) Изрезанная кривая (чёрная в электронной версии) показывает в логарифмической шкале модуль магнитного поля, измеренный на КА Пионер 11 на его входящем в магнитосферу участке траектории. Модуль поля, вычисленный по модели SPV, показан нижней кривой (синий в электронной версии). Результат вычисления в параболоидной модели представлен более гладкой кривой (красной в электронной версии). MP и CA обозначают магнитопаузу и максимальное приближение к Сатурну. Вдоль горизонтальной оси отмечены номера дней в году (DOY) и соответствующие расстояния от центра планеты в её радиусах [158]. (г) Сопоставление наблюдаемых полярных сияний в южной полярной шапке Сатурна с расчётами в параболоидной модели (белые кривые) для снимка, полученного 30 января 2004 г. Сплошная линия соответствует динамическому давлению солнечного ветра 0,03 нПа, а пунктирная — 0,08 нПа [166]. Коэффициент проникновения ММП ( $-0,3; 0,7; 0,7$ ) нТл был принят равным 0,2.

модели описывали магнитосферные источники магнитного поля лишь частично. Так, например, в работе Коннерней с соавторами [171] по данным космических аппаратов Вояджер 1 и 2 была разработана модель кольцевого тока в магнитосфере Сатурна. Позднее Банс и Каули [172] обобщили эту модель, использовав данные Пионер 11. Маурис и Энгэл [173] построили модель магнитосферы Сатурна, которая включала в себя токи на магнитопаузе, но в этой модели отсутствовали токи хвоста, магнитное поле которых особенно существенно в ночной стороне магнитосферы. Кольцевой ток был построен по данным, полученным на КА Вояджер [174], но результаты расчётов, проведённых в рамках этой модели, отличались от измерений, проведённых КА Кассини при первом облёте Сатурна на орбите SOI (Saturn Orbit Insertion). Для удовлетворительного описания измерений магнитного поля (особенно во внешней магнитосфере) необходима глобальная модель магнитосферы, включающая все три основные токовые системы: кольцевой ток, токи магнитопаузы и токовую систему хвоста, причём параметры модели должны меняться со временем. Расчёты по

параболоидной модели дали хорошее согласие с измерениями на орбите SOI [159].

В 1980 г. КА Вояджер впервые зарегистрировал километровое радиоизлучение Сатурна. Позже это радиоизлучение было зафиксировано также на Улиссе и Кассини, его происхождение связывалось с генерацией циклотронной мазерной неустойчивости [146]. Период импульсов оказался близок к периоду вращения планеты, а интенсивность излучения коррелировала с динамическим давлением солнечного ветра. Интенсивные всплески радиоизлучения возникали, когда области сжатия в солнечном ветре подходили к Сатурну [175]. По-видимому, радиоволны возбуждаются за счёт потери энергии электронами на авроральных силовых линиях.

Радиоизлучение Сатурна уступает по интенсивности только радиоизлучению Юпитера. Оно охватывает частотный диапазон от нескольких кГц до 1,3 МГц и соответствует магнитному моменту диполя Сатурна, равному  $0,215 \text{ Гс } R_p^3$ . В динамическом спектре километрового радиоизлучения Сатурна наблюдается тонкая структура. Километровое радиоизлучение Сатурна затухает, когда магнитосфера Сатурна оказывается внутри

юпитерианского магнитосферного хвоста [146]. Синхротронное радиоизлучение Сатурна очень слабое.

Источники километрового радиоизлучения и УФ полярных сияний Сатурна в основном расположены в утренне-дневном секторе силовых линий, связанных с авроральными областями. В качестве причин, вызывающих необходимое ускорение электронов, были предложены неустойчивость Кельвина – Гельмгольца на утренней магнитопаузе [176] или вытекающий продольный ток на утренней стороне ионосферной границы области открытых силовых линий [168, 177]. И в той и в другой модели предполагалось, что сдвиг скоростей между частично коротирующей плазмой внутри магнитосферы и обтекающей сжатой плазмой магнитослоя играет главную роль в процессе, приводящем к высыпанию электронов [178]. Скорость плазмы в магнитослое зависит от скорости солнечного ветра и от местного времени вдоль магнитопаузы.

В [178] предложено объяснение наблюдаемой 1%-ной вариации периода километрового радиоизлучения Сатурна. Поскольку это излучение строго контролируется солнечным ветром, предполагается, что вариации характеристик солнечного ветра, особенно скорости, на орбите Сатурна могут привести к систематическому смещению авроральных источников радиоизлучения по времени и к модификации видимого периода радиоизлучения. По периоду высоколатитного аврорального километрового радиоизлучения определялся период вращения Сатурна: 10 ч 39,4 мин.

В ближайшее время Кассини будет продолжать работу на орбите Сатурна, изучая планету, кольца и спутники. В 2015 г. планируется запуск к Сатурну с целью исследования его атмосферы научного космического корабля Пробс (Probes). Предполагалось, что миссия Тандем (Tandem) для изучения спутников Сатурна Титан и Энцелад начнёт работу на орбите Сатурна около 2030 г. Однако в рамках программы Европейского космического агентства Cosmic Vision (2015–2025 гг.) в феврале 2009 г. в результате выбора между двумя миссиями: Лаплас к Юпитеру и Тандем к Сатурну — было принято решение поддержать миссию к Юпитеру, запуск которой планируется в 2020 г.

## 6. Магнитосфера Урана

Уран находится на расстоянии 19,18 а.е. от Солнца. Его масса в 14 раз больше массы Земли; плотность составляет  $1,25 \text{ г см}^{-3}$ , радиус Урана  $R_U = 25559 \text{ км}$ . Период вращения Урана зависит от широты: на широте  $33^\circ$  он составляет 16,2 ч, а на широте  $70^\circ$  — 14 ч [36]. Один оборот Урана вокруг Солнца составляет 84 земных года. Ось вращения Урана расположена почти в плоскости его орбиты (угол между осью вращения и нормалью к плоскости орбиты равен  $97,9^\circ$ ) и перпендикулярна орбитальному направлению движения планеты. Плоскость орбиты планеты практически совпадает с плоскостью эклиптики. У Урана есть луны и наблюдается система девяти очень узких и плотных колец, окружающих его. Кольца и спутники Урана, находящиеся от него на расстояниях до 600 тыс. км, расположены в плоскости, почти перпендикулярной плоскости эклиптики. Орбиты более далёких спутников ориентированы хаотично.

Уран состоит из трёх слоёв. В центре находится ядро из металлов, силикатов, льдов аммиака ( $\text{NH}_3$ ) и метана

( $\text{CH}_4$ ), которое занимает около 0,3 радиуса планеты. Над ним расположена мантия, состоящая из смеси водяного ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и аммиачно-метанового льда. Над мантией находится газовая оболочка, занимающая предположительно 0,3 радиуса планеты, содержащая водород (85 %), гелий (12 %) и метан (2,3 %). Уран, в отличие от других планет-гигантов, излучает меньше тепла, чем поглощает.

Два КА Вояджер были запущены в 1977 г. с целью исследования планет-гигантов: Юпитера и Сатурна. КА Вояджер 1 исследовал Юпитер в 1979 г., а Сатурн в 1980 г. В дальнейшем он покинул Солнечную систему — гелиосферу, двигаясь в направлении движения Солнца относительно ближайших звёзд. Направления удаления от Солнца Пионера 10 и Вояджера 1 почти противоположны. В цели полёта, в частности, входило исследование верхнего предела расстояния, на котором ещё существенно влияние магнитного поля солнечного ветра и его радиальной скорости.

КА Вояджер 2 облетел Юпитер в 1979 г., а Сатурн в 1981 г., после чего 24 января 1986 г. он подошёл к Урану, а 25 августа 1989 г. максимально приблизился к Нептуну. 30 августа 2007 г. Вояджер 2 покинул Солнечную систему. Оба Вояджера будут продолжать изучать источники ультрафиолетового излучения звёзд. Их детекторы полей и частиц определяли границу между областью, где существенно влияние Солнца, и межзвёздной средой. Ожидается, что связь с аппаратами будет поддерживаться до тех пор, пока их источники энергии, электрогенераторы на радиоизотопах, будут работать.

Таким образом, до сих пор только один космический аппарат побывал в окрестностях Урана. 24 января 1986 г. Вояджер 2 максимально приблизился к Урану на расстояние 107 тыс. км. В это время южный полюс Урана и его ось вращения были направлены к Солнцу. По измерениям КА Вояджер было определено магнитное поле планеты. Величина магнитного момента диполя Урана примерно в 50 раз больше дипольного момента Земли. Вклад квадрупольного члена на поверхности планеты сравним с вкладом диполя. Только у Нептуна квадрупольный член даёт ещё больший вклад [179]. Хо с соавторами [180] пришли к выводу, что магнитные моменты более высокого порядка, чем октуполь, могут быть существенны тогда, когда велик недипольный член магнитного поля планеты, что верно для магнитного поля Урана и Нептуна.

По данным Вояджера, магнитный момент диполя Урана, в отличие от Меркурия, Земли, Юпитера и Сатурна, наклонён под большим углом ( $59^\circ$ ) к оси вращения планеты и смещён к северному полюсу на 8000 км [36]. В результате магнитосфера Урана обладает особенностями, связанными с взаимным расположением оси вращения и оси магнитного диполя. Перед магнитосферой Урана возникает головная ударная волна и у магнитосферы существует протяжённый магнитный хвост. Для Урана  $R_1 = 25R_U$ , а расстояние до ударной волны  $33R_U$ . У Урана обнаружены некоторые свидетельства магнитосферной динамики типа магнитосферных суббурыв на Земле [181, 182].

## 7. Магнитосфера Нептуна

Масса Нептуна в 17 раз больше массы Земли. Он находится на расстоянии 30,02 а.е. от Солнца. Экваториальный радиус Нептуна  $R_N = 24764 \text{ км}$ . Это наимень-

шая из планет-гигантов в Солнечной системе. Оборот вокруг оси вращения Нептуна совершает за 16,1 ч [179]. Один оборот вокруг Солнца составляет почти 165 земных лет. Плоскость орбиты планеты наклонена под углом  $1,8^\circ$  к плоскости эклиптики. Наклон экватора к плоскости орбиты составляет  $29,6^\circ$  (у Земли  $23^\circ$ ).

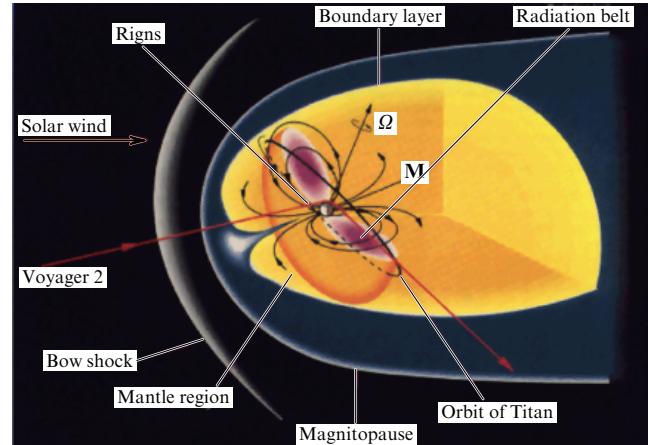
Атмосфера Нептуна, как и у других планет-гигантов, в основном состоит из водорода. На долю гелия приходится 15 % и 1 % — на долю метана. Благодаря наличию метана в атмосфере Нептуна, как и Уран, имеет голубой цвет: более длинноволновой участок спектра солнечного света метан поглощает, а голубой и зелёный — рассеивает. Предполагается, что на дне атмосферы Нептуна находится океан из воды, насыщенной различными ионами. Значительное количество метана содержится глубже, в ледяной мантии планеты, где смесь воды, метана и аммиака может образовывать твёрдые льды. На долю горячей ледяной мантии приходится 70 % массы всей планеты, а на долю ядра — около 25 %. Ядро Нептуна состоит из окислов кремния, магния, железа и его соединений и каменных пород. Предполагается, что давление в центре Нептуна 7 Мбар, а температура  $\sim 7000$  К. Поток тепла из недр Нептуна почти втрое больше тепла, получаемого от Солнца [36].

Вояджер 2 спустя 12 лет после запуска, 24–25 августа 1989 г. максимально приблизился к Нептуну на расстояние 4950 км от поверхности облачного слоя планеты, а ещё через 5 лет он облетел на расстоянии 40000 км спутник Нептуна Тритон — последнее небесное тело, исследованное этим космическим аппаратом. Всего Вояджер 2 исследовал Нептун с июня по октябрь 1989 г. Было обнаружено, что скорость ветра в атмосфере Нептуна достигает  $400\text{--}700$  м  $\text{s}^{-1}$ . Кольца Нептуна оказались похожими на кольца Урана, хотя у Нептуна суммарная площадь их поверхности в 100 раз меньше, чем у Урана. Нептун обладает многочисленными спутниками, наиболее крупный из которых Тритон, размером с Луну, — единственный крупный спутник в Солнечной системе, вращающийся вокруг планеты в направлении, противоположном направлению её вращения. Это позволило предположить, что Нептун захватил Тритон во время своего движения в пространстве.

Магнитное поле Нептуна почти вдвое слабее, чем магнитное поле Урана. Как и Уран, Нептун имеет большое недипольное поле [183]. Вклад квадрупольного момента Нептуна в поверхностное поле больше, чем у какой-либо другой планеты солнечной системы [179].

Сложные магнитные поля Урана и Нептуна можно аппроксимировать с относительно хорошей точностью дипольным полем, смещённым от центра планеты и наклонённым к оси вращения [184]. Магнитный момент диполя Нептуна примерно в 27 раз превышает земной. Угол между осью магнитного диполя и осью вращения составляет  $47^\circ$ . Центр диполя смещён в южное полушарие, поэтому величина магнитного поля у южного магнитного полюса в 10 раз больше, чем у северного. Магнитный момент Нептуна направлен на север, как у Юпитера и Сатурна, противоположно земному полю.

Однако дипольное представление хорошо только на расстояниях, больших нескольких радиусов планеты. Вблизи планеты магнитное поле должно быть представлено разложением по сферическим гармоникам, а точность такого представления возрастает с ростом



**Рис. 11.** Магнитосфера Нептуна. Схема представлена университетом Джона Хопкинса, США ([http://sd-www.jhuapl.edu/VOYAGER/neptune\\_gif.html](http://sd-www.jhuapl.edu/VOYAGER/neptune_gif.html)). На рисунке показаны солнечный ветер (solar wind); ударная волна (bow shock); магнитопауза (magnetopause); приграничный слой (boundary layer); мантия магнитосферы (mantle region); кольца (rings); радиационный пояс (radiation belt); орбита Титана (orbit of Titan); орбита КА Вояджер 2 (Voyager 2);  $\Omega$  — ось вращения;  $M$  — магнитный момент диполя планеты.

числа членов разложения [180]. Поскольку Вояджер 2 очень близко подошел к Нептуну (на расстояние  $1,18R_N$ ), оказалось возможным найти высшие члены разложения внутреннего поля Нептуна [180, 183].

Магнитосфера Нептуна похожа на магнитосферу Урана. Она средних размеров, но значительно больше земной. Относительные размеры ударной волны, магнитопаузы и хвоста подобны земным. Расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы  $R_1$  для Нептуна в среднем порядка  $26R_N$ , а до ударной волны  $34R_N$  [179]. В то же время магнитосфера Нептуна имеет уникальную структуру, обусловленную конкретной геометрией расположения осей вращения и диполя. Магнитосфера Нептуна схематически показана на рис. 11. КА Вояджер вошёл в магнитосферу Нептуна в августе 1989 г. через касп [185] и находился в ней 38 ч. Во время его пролёта магнитосфера была спокойна, не было зафиксировано никаких динамических явлений, южный магнитный полюс был направлен к Солнцу.

Полярные сияния на Нептуне достаточно слабые, так же как радиоизлучение. Из-за сложной структуры магнитного поля Нептуна полярные сияния представляют собой очень сложный процесс, происходящий над обширными областями планеты, расположенными не вблизи магнитных полюсов.

## 8. Заключение

В работе представлен обзор магнитосфер планет Солнечной системы, обладающих собственным магнитным полем. Магнитное поле планет создаёт препятствие для набегающего потока солнечного ветра. Вокруг планеты образуется полость — магнитосфера, ограниченная магнитопаузой, по которой текут токи, экранирующие межпланетную среду от магнитного поля магнитосферных источников. Этими источниками, помимо поля планеты, являются крупномасштабные магнитосферные токовые системы, главные из которых — токовая

система хвоста, кольцевой ток и токи экранировки на магнитопаузе. Показано, что для всех планет от Меркурия до Сатурна существенно взаимодействие с солнечным ветром и его магнитным полем.

Наряду с общими свойствами, каждая магнитосфера обладает своими индивидуальными особенностями, определяемыми параметрами планеты и её расположением в Солнечной системе. Магнитосфера Меркурия — самая миниатюрная из-за относительно слабого собственного поля планеты. Вследствие близости к Солнцу большую роль играет магнитное поле солнечного ветра. Магнитосфера Юпитера — самая крупная в Солнечной системе. Благодаря быстрому вращению и наличию постоянно действующего источника плазмы — вулканической деятельности спутника Юпитера Ио — в магнитосфере образуется мощный магнитодиск, магнитное поле которого более чем вдвое превосходит собственное поле планеты, являющееся самым сильным в Солнечной системе. На Земле полярные сияния возникают в результате процесса пересоединения магнитосферного и межпланетного полей. Полярные сияния на Юпитере связаны с вытекающими из ионосфера продольными токами, вызванными нарушением из-за радиального разлёта твердотельного вращения плазмы в экваториальной магнитосфере. Магнитосфера Сатурна — промежуточная между земной и юпитерианской. Сатурн тоже быстро вращающаяся планета, но он обладает меньшим собственным магнитным полем и имеет менее интенсивные источники магнитосферной плазмы, чем Юпитер. Поэтому хотя в магнитосфере Сатурна и образуется магнитодиск, называемый кольцевым током, он меньше юпитерианского. На полярные сияния Сатурна оказывает сильное влияние взаимодействие с солнечным ветром и его магнитным полем. Магнитосфера Урана и Нептуна менее изучены; их особенности связаны с необычным взаимным расположением осей вращения и магнитного поля планет.

Ключевую роль в исследовании магнитосфер планет Солнечной системы играют прямые измерения, проводимые на космических аппаратах, а также наземные данные. Особое значение имеет развитие теоретических представлений и построение моделей, позволяющих проводить расчёты, описывающие имеющиеся измерения и прогнозирующие новые. Исследование взаимодействия солнечного ветра с магнитосферами планет Солнечной системы приводит как к новым открытиям в физике космической плазмы и астрофизики, так и к возникновению новых вопросов и нерешённых проблем. В частности, такими проблемами являются динамика и устойчивость токовых слоёв и сдвиговых течений в замагниченной плазме, некоторые детали функционирования магнитосферных циклотронных мазеров [186]. До сих пор до конца не ясны механизмы ускорения электронов, вызывающие полярные сияния на планетах.

Посредством солнечного ветра активные процессы на Солнце влияют на состояние магнитосфер планет Солнечной системы, и в частности на околоземное пространство, на технические и биологические системы на Земле. Поэтому необходимо развивать методы прогноза солнечной активности и магнитных бурь. Эти задачи особенно актуальны при планировании запусков космических аппаратов.

Несмотря на большие успехи, достигнутые в теории динамо, существует много неопределённостей, касаю-

щихся применимости различных динамических моделей к магнитным полям Солнца и планет [2]. Возможно, механизм генерации магнитных полей Земли и Юпитера аналогичен процессу динамо, возбуждаемому конвекцией в недрах быстро вращающихся звёзд, обладающих небольшой массой [187]. До сих пор до конца не известно, каков источник энергии движений в ядре, реализующих земное динамо. В такой ситуации особую ценность представляют наиболее общие результаты, не зависящие от деталей, определяющих динамические уравнения [2].

Хотя результаты теоретических работ [188, 189] показали, что в некоторых моделях динамо система может перейти в состояние, в котором магнитная энергия испытывает колебания с конечной амплитудой, до сих пор не ясно, могут ли такие модели, базирующиеся на уравнениях магнитной гидродинамики во вращающейся среде, объяснить обращение полярности магнитного поля в сферической конфигурации. Эта проблема остаётся одной из важнейших в теории динамо [2].

Движения плазмы в лабораторных условиях, в Солнечной системе и в далёких областях Вселенной генерируют магнитные поля, но движение плазмы может также приводить и к пересоединению этих полей [3]. В настоящее время известно, что этот процесс актуален для магнитосфер планет Солнечной системы, обладающих собственным магнитным полем, от Меркурия до Сатурна. Однако вопрос о роли пересоединения за пределами Солнечной системы остается неясным. Особенно востребованным является теоретическое исследование пересоединения, поскольку оно включает в себя нелинейные, неидеальные процессы в сложных топологиях [3].

Несмотря на то что в этом обзоре рассматриваются магнитосфера планет Солнечной системы, следует отметить, что в настоящее время обнаружены также экзопланеты — планеты, вращающиеся вокруг других звёзд. Существуют также экзопланеты, вращающиеся вокруг пульсаров. В 1995 г. были обнаружены первые три экзопланеты. В каталоге ближайших (< 200 пк) экзопланет за 2006 г. [190] перечислено 172 экзопланеты с относительно низкой массой (< 24 масс Юпитера), найденные по измерениям радиальной скорости (по доплеровскому смещению) и во время видимого прохождения по диску центральной звезды. Впервые прохождение планеты по диску звезды было зафиксировано в 1999 г. В январе 2008 г. насчитывалось 228 экзопланет, и их число постоянно растёт. Наряду с наблюдаемыми системами, подтверждающими стандартные представления об образовании звёзд и планет, неожиданно были обнаружены системы с массивными планетами, расположеными близко к центральной звезде на орбитах с большим эксцентриситетом. Из-за применяемого при наблюдениях метода селекции большинство обнаруженных экзопланет имеют массы, равные нескольким массам Юпитера. Газовые гиганты, находящиеся на расстоянии < 0,1 а.е. от центральной звезды, называются "горячими Юпитерами". Их период обращения вокруг звезды < 11 дней. После некоторой реконструкции мощных наземных радиотелескопов, применив соответствующие методы наблюдения, в будущем можно будет проводить поиск возможного радиоизлучения экзопланет.

По аналогии с взаимодействием магнитных планет Солнечной системы с солнечным ветром предполагается, что возможно также существование магнитных полей экзопланет и их взаимодействие с ветром центральной звезды. При этом могут возникать магнитосфераы экзопланет. Однако магнитосфераы экзопланет должны существенно отличаться от магнитосфер планет Солнечной системы. Эти отличия продиктованы, в частности, близким расположением горячих Юпитеров к центральной звезде. На небольших расстояниях от звезды скорость звёздного ветра мала, а плотность и давление велики. Поэтому следует ожидать больших потоков быстрых частиц и рентгеновского излучения, а также сильного влияния приливов и корональных выбросов массы. Из-за субальвеновской скорости звёздного ветра не возникает головной ударной волны перед магнитосферой [191]. Когда магнитное поле звёздного ветра параллельно магнитному моменту диполя планеты, генерируемая при магнитном пересоединении энергия может достигать  $\sim 10^{27}$  эрг  $s^{-1}$ . Может происходить мощный сброс энергии в авроральные зоны экзопланет, приводящий к сильному наблюдаемому оттоку вещества из атмосфер [191].

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-05-00529. В обзоре использованы результаты совместных работ с сотрудниками лаборатории вычислительной математики ОИВМ НИИЯФ МГУ И.И. Алексеевым, В.В. Калегаевым, М.С. Блохиной, М.С. Григорян, С.Ю. Бобровниковым, а также с зарубежными коллегами: С. Каули (Stanley W.H. Cowley, Professor, Head, Radio and Space Plasma Physics Group, University of Leicester, United Kingdom), Дж. Славиным (Dr. James A. Slavin, Director, Heliophysics Science Division, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA), Б. Клауэром (C. Robert Clauer, Professor of Space Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, USA), Р. Пранже (Rene Prange, Dr., Research Director, LESIA, Observatoire de Paris, Meudon, France), которым автор выражает благодарность и искреннюю признательность за плодотворное сотрудничество.

## Список литературы

1. Петрович А А, Дмитриев А В, Струминский А Б, в сб. *Плазменная гелиофизика* Т. 2 (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 176
2. Moffatt H K *Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1978) [Моффат Г *Возбуждение магнитного поля в проводящей среде* (М.: Мир, 1980)]
3. Priest E, Forbes T *Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000) [Прист Э, Форбс Т *Магнитное пересоединение: магнитогидродинамическая теория и приложения* (М.: Физматлит, 2005)]
4. Horning G, in *Magnetic Helicity in Space and Laboratory Plasmas* (Eds M Brown, R C Canfield, A A Pevtsov) (Washington, DC: Am. Geophys. Union, 2000)
5. Siscoe G L et al. *J. Geophys. Res.* **106** (A7) 13015 (2001)
6. Кадомцев Б Б *Коллективные явления в плазме* 2-е изд. (М.: Наука, 1988) [Kadomtsev B B, in *Reviews of Plasma Physics* Vol. 22 (Ed. V D Shafranov) (New York: Kluwer Acad./Plenum Publ., 2001) p. 1]
7. Зеленый Л М, Малова Х В, в сб. *Плазменная гелиофизика* Т. 2 (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 490
8. Dungey J W *Philos. Mag.* **44** 725 (1953)
9. Dungey J W, in *Geophysique Extérieure. Geophysics: The Earth's Environment. Lectures Delivered at Les Houches, 1962 Session* (Eds C DeWitt, J Hiebert, A Lebeau) (New York: Gordon and Breach, 1963) [Данжи Дж *Геофизика. Околоземное космическое пространство. Лекции в летней школе теоретической физики при Гренобльском университете, 1962* (М.: Мир, 1964)]
10. Crooker N U *J. Geophys. Res.* **84** (A3) 951 (1979)
11. Heppner J P, Maynard N C *J. Geophys. Res.* **92** (A3) 4467 (1987)
12. Cowley S W H *J. Geomagn. Geoelectr.* **38** 1223 (1986)
13. Paschmann G et al. *J. Geophys. Res.* **91** (A10) 11099 (1986)
14. Paschmann G *Geophys. Res. Lett.* **35** L19109 (2008)
15. Gosling J T et al. *J. Geophys. Res.* **96** (A8) 14097 (1991)
16. Onsager T G et al. *J. Geophys. Res.* **106** (A11) 25467 (2001)
17. Mozer F S *J. Geophys. Res.* **110** A12222 (2005)
18. Vaivads A, Retinò A, André M *Space Sci. Rev.* **122** 19 (2006)
19. Зеленый Л М, Перумян В, Ашур-Абдала М *Труды ФИАН* **227** 70 (2000)
20. Буланов С В и др. *Труды ФИАН* **227** 48 (2000)
21. Сыроватский С И *Труды ФИАН* **74** 3 (1974)
22. Сомов Б В, Сыроватский С И *Труды ФИАН* **74** 14 (1974)
23. Сомов Б В *Космическая электродинамика и физика Солнца* (М.: Изд-во МГУ, 1993)
24. Вайнштейн С И, Быков А М, Топтыгин И Н *Турбулентность, токовые слои и ударные волны в космической плазме* (М.: Наука, 1989) [Vainshtein SI, Bykov A M, Toptygin IN *Turbulence, Current Sheets, and Shocks in Cosmic Plasma* (Langhorne, Pa.: Gordon and Breach Sci. Publ., 1993)]
25. Petschek H E, in *The Physics of Solar Flares: Proc. of the AAS-NASA Symp.*, 1963 (Ed. W N Hess) (Washington, DC: Natl. Aeronautics and Space Administration, Science and Technical Information Division, 1964) p. 425
26. Priest E R, Titov V S *Philos. Trans. R. Soc. London A* **354** 2951 (1996)
27. Belenkaya E S *J. Geophys. Res.* **103** (A11) 26487 (1998)
28. Belenkaya E S *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **60** 1343 (1998)
29. Pritchett P L, Coroniti F V *J. Geophys. Res.* **109** A01220 (2004)
30. Dungey J W *Phys. Rev. Lett.* **6** 47 (1961)
31. Cowley S W H *Radio Sci.* **8** 903 (1973)
32. Green J M *J. Geophys. Res.* **93** 8583 (1988)
33. Escoubet C P, Schmidt R, Goldstein M L, in *The Cluster and Phoenix Missions* (Eds C P Escoubet, C T Russell, R Schmidt) (Dordrecht: Kluwer Acad., 1997) p. 11
34. Phan T D et al. *Phys. Rev. Lett.* **99** 255002 (2007)
35. He J-S et al. *J. Geophys. Res.* **113** A05205 (2008)
36. Астрономия: Век XXI (Ред.-сост. В Г Сурдин) (Фрязино: Век 2, 2008)
37. Алексеев И И, Калегаев В В, в сб. *Плазменная гелиофизика* (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 422
38. Russell C T *Planet. Space Sci.* **49** 1005 (2001)
39. Russell C T *Planet. Space Sci.* **51** 731 (2003)
40. Зеленый Л М и др. *УФН* **175** 643 (2005) [Zelenyi L M et al. *Phys. Usp.* **48** 615 (2005)]
41. Савин С П, в сб. *Плазменная гелиофизика* Т. 1 (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 398
42. Ковтюх А С, Панасюк М И, в сб. *Плазменная гелиофизика* (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 510
43. Sonnerup B U Ö et al. *J. Geophys. Res.* **86** 10049 (1981)
44. Etemadi A et al. *Planet. Space Sci.* **36** 471 (1988)
45. Алексеев И И, Беленькая Е С *Геомагнетизм и аэрономия* **23** 75 (1983)
46. Алексеев И И, Беленькая Е С *Геомагнетизм и аэрономия* **29** 725 (1989)
47. Belenkaya E S *J. Geophys. Res.* **98** (A4) 5941 (1993)
48. Russell C T, in *Physics of the Magnetopause* (Geophys. Monograph, Vol. 90, Eds P Song, B U Ö Sonnerup, M F Thomsen) (Washington, DC: Am. Geophys. Union, 1995) p. 81
49. Phan T-D, Paschmann G, Sonnerup B U Ö *J. Geophys. Res.* **101** (A4) 7817 (1996)
50. Russell C T, in *Critical Problems of Magnetospheric Physics: Proc. of the Symp., 11–13 May, 1972, Madrid, Spain* (Ed. E R Dyer) (Washington, DC: Natl. Acad. of Sci., 1972) p. 1

51. Kaymaz Z et al. *J. Geophys. Res.* **101** (A6) 13321 (1996)
52. Алексеев И и Геомагнетизм и аэрономия **18** 656 (1978)
53. Slavin J A et al. *J. Geophys. Res.* **90** (A11) 10875 (1985)
54. Alexeev I I et al. *J. Geophys. Res.* **101** (A4) 7737 (1996)
55. Alexeev I I, Feldstein Ya I J. *Atmos. Sol. Terr. Phys.* **63** 431 (2001)
56. Alexeev I I, Belenkaya E S, Clauer C R (Jr.) *J. Geophys. Res.* **105** (A9) 21119 (2000)
57. Feldstein Y I et al. *J. Geophys. Res.* **110** A11214 (2005)
58. Mead G D, Fairfield D H *J. Geophys. Res.* **80** 523 (1975)
59. Olson W P, Pfizer K A *J. Geophys. Res.* **87** (A8) 5943 (1982)
60. Tsyganenko N A *Planet. Space Sci.* **35** 1347 (1987)
61. Tsyganenko N A *Planet. Space Sci.* **37** 5 (1989)
62. Hiltner R V, Voigt G-H *J. Geophys. Res.* **100** (A4) 5613 (1995)
63. Tsyganenko N A *J. Geophys. Res.* **100** (A4) 5599 (1995)
64. Мальцев Ю П, Остапенко А А *Геомагнетизм и аэрономия* **41** 761 (2001) [Maltsev Y P, Ostapenko A A *Geomagn. Aeron.* **41** 726 (2001)]
65. Tsyganenko N A *J. Geophys. Res.* **107** (A8) 1176 (2002)
66. Кузнецов В Д, в сб. *Плазменная гелиофизика* Т. 1 (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 81
67. Панасюк М И и др. (Коллаборация "Солнечные экстремальные события 2003 г." (CЭС-2003)) "Магнитные бури в октябрьские события 2003 г." *Космич. исслед.* **42** 509 (2004) [Panasyuk M I et al. (Solar Extreme Events in 2003 Collab. (SEE-2003)) "Magnetic storms in October 2003" *Cosmic Res.* **42** 489 (2004)]
68. Alexeev I I, Feldstein Ya I J. *Atmos. Sol. Terr. Phys.* **63** 431 (2001)
69. Russell C T, Luhmann J G, Lu G *J. Geophys. Res.* **106** (A9) 18495 (2001)
70. Janhunen P et al. *Space Sci. Rev.* **122** 89 (2006)
71. Козлов Б В, в сб. *Плазменная гелиофизика* Т. 1 (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 569
72. Angelopoulos V et al. *Science* **321** 931 (2008)
73. Mauk B H, Anderson B J, Thorne R M, Preprint SPR-05-02 (Laurel, MD: Space Phys. Group, The Johns Hopkins Univ. Applied Phys. Lab., 2002)
74. Clauer C R et al. *J. Geophys. Res.* **106** (A11) 25695 (2001)
75. Russell C T et al. *Geophys. Res. Lett.* **19** 1227 (1992)
76. Ohtani S, Kokubun S, Russell C T *J. Geophys. Res.* **97** (A3) 3129 (1992)
77. Гинзбург В Л *О физике и астрофизике* 3-е изд. (М.: Бюро Квантум, 1995) [Ginzburg V L *The Physics of a Lifetime* (Berlin: Springer, 2001)]
78. Турышев В Г УФН **179** 3 (2009) [Turyshov S G *Phys. Usp.* **52** 1 (2009)]
79. Giampieri G, Balogh A *Planet. Space Sci.* **49** 1637 (2001)
80. Ness N F et al. *J. Geophys. Res.* **80** 2708 (1975)
81. Anderson B J et al. *Science* **321** 82 (2008)
82. Siscoe G, Christopher L *Geophys. Res. Lett.* **2** 158 (1975)
83. Ogilvie K W et al. *J. Geophys. Res.* **82** 1807 (1977)
84. Wurz P, Blomberg L *Planet. Space Sci.* **49** 1643 (2001)
85. Boardsen S A, Slavin J A *Geophys. Res. Lett.* **34** L22106 (2007)
86. Slavin J A et al. *Science* **321** 85 (2008)
87. Zurbuchen T H et al. *Science* **321** 90 (2008)
88. Slavin J A, Holzer R E J. *Geophys. Res.* **86** (A13) 11401 (1981)
89. Slavin J A, Holzer R E *Phys. Earth Planet. Inter.* **20** 231 (1979)
90. Slavin J A *Adv. Space Res.* **33** 1859 (2004)
91. Slavin J A, Holzer R E J. *Geophys. Res.* **84** (A5) 2076 (1979)
92. Glassmeier K-H et al. *Space Sci. Rev.* **132** 511 (2007)
93. Shue J-H et al. *J. Geophys. Res.* **103** (A8) 17691 (1998)
94. Grard R *Planet. Space Sci.* **45** (1) 67 (1997)
95. Ness N F, in *Solar System Plasma Physics* Vol. 2 (Eds E N Parker, C F Kennel, L J Lanzerotti) (Amsterdam: North-Holland, 1979) p. 183
96. Alexeev I I et al. *J. Geophys. Res.* **113** A12210 (2008)
97. Sarantos M et al. *Planet. Space Sci.* **49** 1629 (2001)
98. Toffoletto F R, Hill T W *J. Geophys. Res.* **98** (A2) 1339 (1993)
99. Kabin K et al. *Icarus* **143** 397 (2000)
100. Ip W-H, Kopp A J. *Geophys. Res.* **107** (A11) 1348 (2002)
101. Kallio E, Janhunen P *Geophys. Res. Lett.* **30** 1877 (2003)
102. Kallio E, Janhunen P *Ann. Geophys.* **21** 2133 (2003)
103. Trávníček P, Hellinger P, Schriever D *Geophys. Res. Lett.* **34** L05104 (2007)
104. Lukyanov A V et al. *Planet. Space Sci.* **49** 1677 (2001)
105. Engle I M *Planet. Space Sci.* **45** 127 (1997)
106. Beard D B J. *Geophys. Res.* **84** (A5) 2118 (1979)
107. Luhmann J G, Russell C T, Tsyganenko N A *J. Geophys. Res.* **103** (A5) 9113 (1998)
108. Elsasser W M *J. Geophys. Res.* **61** 340 (1956)
109. Hill T W, Pontius D H (Jr.) *J. Geophys. Res.* **103** (E9) 19879 (1998)
110. Bunce E J, Cowley S W H *Planet. Space Sci.* **49** 261 (2001)
111. Connerney J E P, Acuña M H, Ness N F *J. Geophys. Res.* **86** (A10) 8370 (1981)
112. Belenkaya E S *Planet. Space Sci.* **52** 499 (2004)
113. Ness N F et al. *Science* **204** 982 (1979)
114. Ness N F et al. *Science* **206** 966 (1979)
115. Phillips J L et al. *Planet. Space Sci.* **41** 877 (1993)
116. Staines K et al. *Planet. Space Sci.* **41** 931 (1993)
117. Cowley S W H et al. *Planet. Space Sci.* **41** 987 (1993)
118. Cowley S W H et al. *J. Geophys. Res.* **101** (A7) 15197 (1996)
119. Goertz C K et al. *J. Geophys. Res.* **81** 3393 (1976)
120. Cowley S W H, Deason A J, Bunce E J *Ann. Geophys.* **26** 4051 (2008)
121. Rego D et al. *Nature* **399** 121 (1999)
122. Clarke J T "Satellite Footprints Seen in Jupiter Aurora", Space Telescope Science Institute Press Release STSci-PRC00-38 (Baltimore, MD, December 14) (2000)
123. Hill T W *J. Geophys. Res.* **106** (A5) 8101 (2001)
124. Laxton N F et al. *Planet. Space Sci.* **47** 205 (1999)
125. Беленъкая Е С *Геомагнетизм и аэрономия* **43** (2) 174 (2003)
126. Alexeev I I, Belenkaya E S *Ann. Geophys.* **23** 809 (2005)
127. Алексеев И И, Беленъкая Е С, в сб. *Плазменная гелиофизика* Т. 2 (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 61
128. Goldstein M L, Lepping R P, Sittler E C (Jr.) *J. Geophys. Res.* **90** (A9) 8223 (1985)
129. Goldstein M L, Lepping R P, Sittler E C (Jr.) *J. Geophys. Res.* **91** (A6) 7133 (1986)
130. Hill T W, Dessler A J, Michel F C *Geophys. Res. Lett.* **1** 3 (1974)
131. Barish F D, Smith R A *Geophys. Res. Lett.* **2** 269 (1975)
132. Smith E J et al. *Science* **188** 451 (1975)
133. Beard D B, Jackson D J *J. Geophys. Res.* **81** 3399 (1976)
134. Goertz C K, in *Jupiter, the Giant Planet* (Ed. T Gehrels) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 1976) p. 23
135. Goertz C K *J. Geophys. Res.* **81** 3368 (1976)
136. Goertz C K *Space Sci. Rev.* **23** 319 (1979)
137. Engle I M, Beard D B J. *Geophys. Res.* **85** (A2) 579 (1980)
138. Acuña M H, Behannon K W, Connerney J E P, in *Physics of the Jovian Magnetosphere* (Ed. A J Dessler) (New York: Cambridge Univ. Press, 1983) p. 1
139. Connerney J E P *J. Geophys. Res.* **86** (A9) 7796 (1981)
140. Connerney J E P et al. *J. Geophys. Res.* **103** (A6) 11929 (1998)
141. Khurana K K *J. Geophys. Res.* **102** (A6) 11295 (1997)
142. Connerney J E P *J. Geophys. Res.* **98** (E10) 18659 (1993)
143. Khurana K K et al., in *Jupiter: The Planet, Satellites, and Magnetosphere* (Eds F Bagenal, T E Dowling, W B McKinnon) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004) p. 593
144. Kivelson M G, Southwood D J *Planet. Space Sci.* **51** 891 (2003)
145. Walker R J, Ogino T, Kivelson M G *Planet. Space Sci.* **49** 237 (2001)
146. Zarka P, Kurth W S *Space Sci. Rev.* **116** 371 (2005)
147. Carr T D, Desch M D, Alexander J K, in *Physics of the Jovian Magnetosphere* (Ed. A J Dessler) (New York: Cambridge Univ. Press, 1983) p. 226
148. Burke B F, Franklin K L *J. Geophys. Res.* **60** 213 (1955)
149. Робертс Дж УФН **83** 503 (1964); Roberts J A *Planet. Space Sci.* **11** 221 (1963)
150. Рябов Б П, Герасимова Н Н *Декаметровое спорадическое радиоизлучение Юпитера* (Киев: Наукова думка, 1990)
151. Gurnett D A et al. *Nature* **415** 985 (2002)
152. Rucker H O et al. *Astrophys. Space Sci.* **277** 325 (2001)
153. Zaitsev V V, Shaposhnikov V E, Rucker H O *Adv. Space Res.* **36** 2106 (2005)
154. Zaitsev V V, Shaposhnikov V E, Rucker H O *Astron. Astrophys.* **454** 669 (2006)
155. Фортов В Е и др. УФН **166** 391 (1996) [Fortov V E et al. *Phys. Usp.* **39** 363 (1996)]
156. Smith E J et al. *J. Geophys. Res.* **85** (A11) 5655 (1980)

157. Sittler E C (Jr.), Ogilvie K W, Scudder J D *J. Geophys. Res.* **88** (A11) 8847 (1983)
158. Belenkaya E S et al. *Ann. Geophys.* **24** 1145 (2006)
159. Alexeev I I et al. *Geophys. Res. Lett.* **33** L08101 (2006)
160. Cowley S W H, Bunce E J *Ann. Geophys.* **21** 1691 (2003)
161. Badman S V et al. *J. Geophys. Res.* **110** A11216 (2005)
162. Clarke J T et al. *Nature* **433** 717 (2005)
163. Bunce E J et al. *Adv. Space Res.* **38** 806 (2006)
164. Belenkaya E S, Cowley S W H, Alexeev I I *Ann. Geophys.* **24** 1649 (2006)
165. Belenkaya E S et al. *Ann. Geophys.* **25** 1215 (2007)
166. Belenkaya E S et al. *Ann. Geophys.* **26** 159 (2008)
167. Prangé R et al. *Nature* **432** 78 (2004)
168. Cowley S W H, Bunce E J, Prangé R *Ann. Geophys.* **22** 1379 (2004)
169. Jackman C M et al. *J. Geophys. Res.* **109** A11203 (2004)
170. Davis L (Jr.), Smith E J J. *Geophys. Res.* **95** (A9) 15257 (1990)
171. Connerney J E P, Acuña M H, Ness N F *J. Geophys. Res.* **88** 8779 (1983)
172. Bunce E J, Cowley S W H *Ann. Geophys.* **21** 661 (2003)
173. Maurice S, Engle I M *J. Geophys. Res.* **100** (A9) 17143 (1995)
174. Dougherty M K et al. *Science* **307** 1266 (2005)
175. Badman S V et al. *Ann. Geophys.* **26** 3641 (2008)
176. Galopeau P H M, Zarka P, Le Quéau D *J. Geophys. Res.* **100** (E12) 26397 (1995)
177. Talboys D L et al. *J. Geophys. Res.* **114** A06220 (2009)
178. Cecconi B, Zarka P J. *Geophys. Res.* **110** A12203 (2005)
179. Russell C T, Luhmann J G, in *Encyclopedia of Planetary Sciences* (Eds J H Shirley, R W Fairbridge) (New York: Chapman & Hall, 1997)
180. Ho C W, Huang T S, Gao S J. *Geophys. Res.* **102** (A11) 24393 (1997)
181. Mauk B H et al. *J. Geophys. Res.* **92** (A13) 15283 (1987)
182. Sittler E C (Jr.), Ogilvie K W, Selesnick R J. *Geophys. Res.* **92** (A13) 15263 (1987)
183. Connerney J E P, Acuña M H, Ness N F *J. Geophys. Res. Suppl.* **96** 19023 (1991)
184. Ness N F et al. *Science* **246** 1473 (1989)
185. Belcher J W et al. *Science* **246** 1478 (1989)
186. Зеленый Л М, в сб. *Плазменная гелиофизика* Т. 1 (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 11
187. Christensen U R, Holzwarth V, Reiners A *Nature* **457** 167 (2009)
188. Proctor M R E *Astron. Nachrichten* **298** 19 (1977)
189. Soward A M *Philos. Trans. R. Soc. London A* **275** 611 (1974)
190. Butler R P et al. *Astrophys. J.* **646** 505 (2006)
191. Ip W-H, Kopp A, Hu J-H *Astrophys. J.* **602** L53 (2004)

## Magnetospheres of magnetized planets

**E.S. Belenkaya**

D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University,  
Vorob'evy gory 1, str. 2, 119992 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-495) 939-39 21. Fax (7-495) 939-35 53  
E-mail: elena@dec1.sinp.msu.ru

This review presents the modern understanding of the physics of magnetized planet magnetospheres in the solar system and of the magnetospheric magnetic field structure. In the interiors of Mercury, the Earth, Jupiter, Saturn, Uranus, and Neptune, their intrinsic magnetic fields are generated under the action of the dynamo mechanism. Their magnetic fields are strong enough to sustain the solar wind flow. The magnetosphere surrounding a planet forms during the interaction of the solar wind with the planetary magnetic field. The magnetospheric dynamics is mainly determined by solar wind variations. The magnetosphere of each planet is unique. In this review, the common and individual magnetic field sources and properties of planetary magnetospheres are discussed.

PACS numbers: 94.20.Ss, **94.30.-d**, 94.30.Bg, 94.30.Ch

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200908a.0809

Bibliography — 191 references

Received 2 February 2009, revised 7 March 2009

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **179** (8) 809–835 (2009)

*Physics – Uspekhi* **52** (8) (2009)