

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации "Состояние и перспективы исследования солнечной системы"

(26 января 2005 г.)

26 января 2005 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации "Состояние и перспективы исследования солнечной системы". На сессии были заслушаны доклады:

1. **Боярчук А.А.** (Институт астрономии РАН). *Вступительное слово.*

2. **Зеленый Л.М., Веригин М.И., Захаров А.В.** (Институт космических исследований РАН), **Измоленов В.В.** (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, механико-математический факультет, Институт космических исследований РАН, Институт проблем механики РАН), **Скальский А.А.** (Институт космических исследований РАН). *Гелиосфера и взаимодействие планет земной группы с солнечным ветром.*

3. **Кораблев О.И.** (Институт космических исследований РАН). *Исследования атмосфер планет земной группы.*

4. **Оуэн Т.** (Институт астрономии университета Гавайи, Гонолулу, США), **Атрейя С.** (Университет Мичигана, отделение атмосферы, океана и космических исследований, США), **Ниман Х.** (Космический центр им. Годдарда НАСА, Гринбелт, Мэриленд, США). *"Внезапная догадка": первые результаты зондирования атмосферы Титана космическим аппаратом "Гюйгенс".*

5. **Маров М.Я.** (Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН). *Малые тела солнечной системы и некоторые проблемы космогонии.*

Краткое содержание четырех последних докладов публикуется ниже.

PACS numbers: 96.30.-t, 96.35.Kx, 96.50.Ek

Гелиосфера и взаимодействие планет земной группы с солнечным ветром

Л.М. Зеленый, М.И. Веригин, А.В. Захаров, В.В. Измоленов, А.А. Скальский

1. Внешняя гелиосфера и взаимодействие с межзвездной средой

Концепция гелиосферы как окружающего Солнце пространства, в котором свойства среды, в первую очередь, определяются влиянием Солнца, была предложена Дэвисом [1] и предшествовала как теоретическому предсказанию существования солнечного ветра Паркером [2], так и открытию солнечного ветра группой Грингауза с помощью советских космических аппаратов "Луна-2", "Луна-3" и "Венера-1" в 1959–1961 гг. [3]. По современным представлениям граница гелиосферы находится на расстоянии $\sim 120-150$ а.е. (а.е. — астрономическая единица, равная расстоянию от Земли до Солнца — 149,6 млн км). Природа и положение границы гелиосферы, а также структура и свойства внешней области гелиосферы определяются взаимодействием солнечного ветра с межзвездным окружением Солнца — локальным межзвездным облаком (ЛМО). В настоящее время нет сомнений, что ЛМО является частично-ионизованным газоплазменным образованием с характерным размером порядка нескольких парсек. Локальное межзвездное облако принадлежит к небольшой группе облаков, имеющих температуру $\sim 5-10 \times 10^3$ К и концентрацию частиц порядка $0,1 \text{ см}^{-3}$. Вся эта группа облаков находится внутри горячего "Локального пузыря" — области межзвездного пространства (характерный размер порядка 100 пк), заполненной ионизованной плазмой (температура 10^6 К, концентрация частиц около $0,002 \text{ см}^{-3}$). Природа Локального пузыря — тема многочисленных научных дискуссий. Согласно одной из гипотез, Локальный пузырь образовался в результате взрыва сверхновой (или нескольких сверхновых) около миллиарда лет тому назад. Температура локального меж-

звездного облака (~ 6700 К) и скорость его движения относительно Солнца ($\sim 26,4$ км с $^{-1}$) известны с хорошей точностью благодаря прямым измерениям (с космического аппарата "Ulysses") характеристик межзвездных атомов гелия, свободно проникающих внутрь гелиосферы [4, 5]. Скорость и температура потока атомов гелия внутри гелиосферы совпадают со скоростью и температурой газа в невозмущенной локальной межзвездной среде.

Другие параметры ЛМО, такие как плотность межзвездных атомов водорода и протонов, величина и направление межзвездного магнитного поля, пока не определены с достаточной точностью. В отсутствие прямых измерений в области взаимодействия межзвездной среды с гелиосферой, структура ЛМО исследуется на удалении, с помощью космических аппаратов, находящихся на расстоянии одной или нескольких астрономических единиц. Корректная интерпретация таких косвенных измерений возможна только на основе теоретических моделей, разработка которых началась с пионерских работ Паркера [6] и Баранова с соавторами (1970 г.) [7]. Предложенная в [7] структура с двумя ударными волнами легла в основу современной концепции гелиосферного интерфейса (рис. 1). Гелиопауза, являющаяся тангенциальным разрывом, отделяет заряженную компоненту межзвездной среды от плазмы солнечного ветра. Так как движение солнечного ветра и межзвездной среды происходит со сверхзвуковыми скоростями, то при обтекании гелиопаузы образуются две ударные волны. Внутренняя ударная волна, в которой солнечный ветер тормозится до дозвуковых скоростей, называется гелиосферной ударной волной. Во внешней ударной волне происходит торможение сверхзвукового потока межзвездного газа. Из-за больших длин свободного пробега межзвездные атомы свободно проникают сквозь поверхности разрывов внутрь гелиосферы.

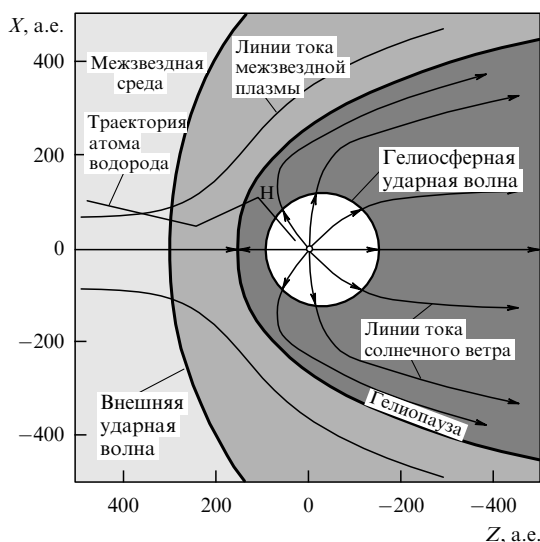


Рис. 1. Картина гелиосферного интерфейса — области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой. Гелиопауза, гелиосферная и внешняя ударные волны разделяют гелиосферный интерфейс на четыре области: 1) до ударной волны со сверхзвуковым солнечным ветром; 2) и 3) гелиошис или ударный слой между гелиопаузой и ударными волнами (внутренней и внешней); 4) поток сверхзвуковой межзвездной плазмы. Положения ударных волн и гелиопаузы получены на основе модели Баранова – Маламы.

Построение полной модели гелиосферного интерфейса и спустя около 40 лет после опубликования первых работ все еще не завершено. Главная трудность заключается в многокомпонентной природе как локальной межзвездной среды, так и солнечного ветра. Локальная межзвездная среда состоит, по меньшей мере, из пяти компонент: плазма (электроны, протоны, ионы гелия), атомы водорода, межзвездное магнитное поле, галактические космические лучи, межзвездная пыль. Плазменная компонента в гелиосфере состоит из частиц солнечного ветра (протонов, электронов, альфа-частиц и др.), а также захваченных ионов и аномальной компоненты космических лучей (АКЛ). Для построения адекватной многокомпонентной модели гелиосферного интерфейса необходимо найти правильное теоретическое описание каждой из компонент межзвездной среды и солнечного ветра. Заряженная компонента как межзвездной среды (электроны, протоны, ионы гелия), так и солнечного ветра (электроны, протоны, альфа-частицы) может быть адекватно описана в рамках гидродинамического приближения. Однако длина свободного пробега межзвездных атомов водорода имеет тот же порядок величины, что и характерный размер гелиосферного интерфейса. Это означает, что для описания атомов водорода в гелиосферном интерфейсе необходимо использовать кинетический подход. Для корректного описания захваченных ионов и АКЛ также необходимо использование кинетических моделей.

Самосогласованная кинетико-континуальная модель взаимодействия солнечного ветра с двухкомпонентной межзвездной средой, содержащей нейтральные атомы водорода и заряженные частицы, была создана Барановым и Маламой [8] и успешно развивалась на протяжении последних лет. В частности, в усовершенствованных моделях удалось учесть влияние галактической и аномальной компонент космических лучей, межзвездного магнитного поля, межзвездных ионов гелия, альфа-частиц солнечного ветра, а также эффекты, связанные с анизотропией солнечного ветра и солнечной активностью. Обзор современных моделей гелиосферного интерфейса дан в [9]. Основным преимуществом этих моделей по сравнению с альтернативными моделями, развиваемыми другими научными группами, является кинетический подход к описанию движения межзвездных нейтралов. Измоденовым и др. [10] с помощью весового метода Монте-Карло с расщеплением траекторий [11] была вычислена функция распределения атомов водорода в области гелиосферного интерфейса и было показано, что она не является максвелловской. Следовательно, применение гидродинамического подхода к описанию движения межзвездных атомов является некорректным.

В рамках кинетико-континуальной модели [8, 12] удалось сделать несколько предсказаний, подтвержденных экспериментально. Одно из них — наличие так называемой водородной стенки в области внешнего гелиослоя между гелиопаузой и внешней ударной волной (рис. 2). Под водородной стенкой понимается область со значительно большей плотностью атомов по сравнению с характерной для межзвездной среды. Такое увеличение плотности связано с образованием вторичных межзвездных атомов вследствие процесса перезарядки. Движение вторичных атомов водорода сохраняет характеристики движения протонов, из которых они

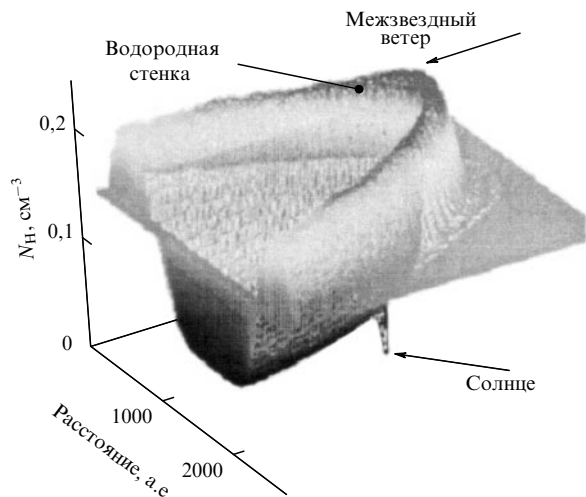


Рис. 2. Водородная стенка — увеличенная, по сравнению с концентрацией в межзвездной среде, концентрация атомов водорода в области между внешней ударной волной и гелиопаузой. Показана концентрация межзвездных атомов водорода N_H в окрестности Солнца. Верхняя стрелка показывает направление движения межзвездной среды относительно Солнца, а нижняя — его положение. Уменьшение концентрации атомов соответствует области сильной ионизации в окрестности Солнца [14].

образовались. Поскольку в области внешнего гелиослоя скорость протонов межзвездной среды меньше их скорости в невозмущенной межзвездной среде, то и скорость вновь рожденных вторичных атомов водорода ниже, чем первичных. Замедление движения вторичных атомов приводит к увеличению общей концентрации атомов или образованию водородной стенки в области внешнего гелиослоя. В ходе интерпретации спектров поглощения, полученных с высоким разрешением на "Hubble Space Telescope" [13, 14], существование водородной стенки было подтверждено экспериментально. Было показано, что спектры поглощения невозможно объяснить без введения в рассмотрение дополнительной поглощающей среды, параметры которой соответствуют параметрам вторичной компоненты межзвездных атомов водорода. Открытие гелиосферной водородной стенки дало новый импульс к лучшему пониманию наблюдаемых спектров поглощения. В частности, в работах [13, 14] (см. также обзор [15]) было показано, что для объяснения некоторых спектров поглощения необходимо предположить существование не только гелиосферной водородной стенки, но и астросферной водородной стенки вокруг наблюдаемых звезд. Оказалось, что по наблюдаемому спектру поглощения можно оценить параметры водородной стенки около данной звезды, а затем и характеристики звездного ветра. Так был открыт новый способ диагностики звездных ветров. Для некоторых типов звезд этот способ оказался единственным. Другим существенным подтверждением достоинств модели [8] стало предсказание торможения солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях вследствие процесса перезарядки, который приводит к потере солнечным ветром протонов, имеющих скорость около 400 км с^{-1} , и приобретению им протонов со скоростью порядка скорости межзвездных атомов — $20\text{--}25 \text{ км с}^{-1}$. В результате происходит медленное торможение солнечного ветра, что и зафиксировали космические аппараты "Voyager-1" и "Voyager-2".

По торможению солнечного ветра можно оценить концентрацию атомов водорода во внешней гелиосфере: в окрестности ударной волны она составляет $0,09\text{--}0,1 \text{ см}^{-3}$. В области гелиосферного интерфейса происходит фильтрация межзвездных атомов водорода, т.е. уменьшение их плотности по сравнению с плотностью межзвездной среды. Согласно модели [8] такая фильтрация составляет примерно 50%. Следовательно, концентрация атомов в локальной межзвездной среде достигает $0,18\text{--}0,2 \text{ см}^{-3}$. Другие способы определения концентрации атомов связаны с косвенными измерениями параметров межзвездных атомов по рассеянному солнечному лайман-альфа-излучению на космических аппаратах "SOHO", "Voyager-1", "Voyager-2", "Pioneer-10", а также по наблюдениям ионов, которые образуются в результате перезарядки и фотоионизации из межзвездных атомов. Такие ионы захватываются гелиосферным магнитным полем и поэтому называются захваченными. Захваченные ионы зарегистрированы космическими аппаратами "Ulysses" и "ACE".

В середине 2003 г. была опубликована статья Криджиса и др. [16], в которой утверждалось, что космический аппарат "Voyager-1" пересек гелиосферную ударную волну во второй половине 2002 г. Эта работа вызвала оживленную дискуссию в гелиосферном научном сообществе. Простым и наиболее прямым подтверждением произошедшего пересечения гелиосферной ударной волны космическим аппаратом можно было бы считать наблюдение резкого торможения солнечного ветра и увеличения его плотности. К сожалению, детектор для измерения параметров солнечного ветра на космическом аппарате "Voyager-1" несколько лет назад вышел из строя. Однако в течение примерно 200 сут, начиная с августа 2002 г., на этом аппарате было зарегистрировано значительное увеличение потоков энергичных (т.е. обладающих энергией, превышающей характерную тепловую) заряженных частиц ($0,57\text{--}1,78 \text{ МэВ}$). По степени анизотропии потоков в [16] была оценена скорость солнечного ветра, которая оказалась равной $\sim 100 \text{ км с}^{-1}$. На основании этого и был сделан вывод о том, что космический аппарат пересек гелиосферную ударную волну в середине 2003 г. Вместе с тем анализ измеренных в 2002 г. на "Voyager-1" потоков космических лучей указывает на наличие их существенной модуляции [17]. Это позволяет заключить, что космический аппарат находился в то время все еще в области сверхзвукового солнечного ветра, т.е. еще не долетел до гелиосферной ударной волны. Теоретические расчеты на основе нестационарной модели гелиосферного интерфейса [18] подтверждают это заключение (рис. 3), а повышенный уровень потоков энергичных частиц указывает лишь на то, что в 2002 г. космический аппарат вошел в зону так называемого предфронта, образующегося перед гелиосферной ударной волной из-за влияния аномальной компоненты космических лучей на плазму солнечного ветра (см., например, [19]). Положение ударной волны в пространстве изменяется в зависимости от фазы солнечного цикла (см. рис. 3). Согласно модельным расчетам, в 2002 г. ударная волна находилась на минимальном расстоянии от Солнца, а затем начала удаляться от него на $3\text{--}4 \text{ а.е.}$ в год. Примерно с такой же скоростью движется от Солнца и космический аппарат "Voyager-1". В течение $3\text{--}4$ лет гелиосферная ударная волна будет удаляться от

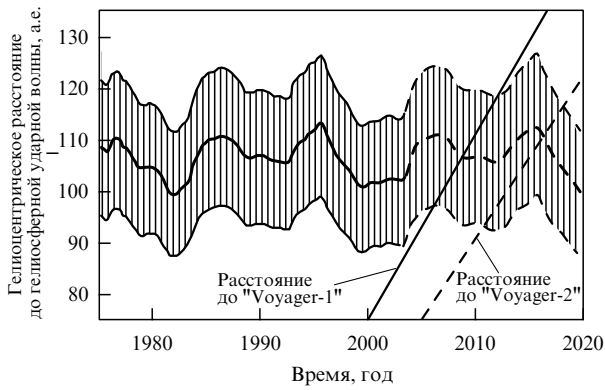


Рис. 3. Положение гелиосферной ударной волны в зависимости от цикла солнечной активности, рассчитанное на основе нестационарной модели гелиосферного интерфейса [18, 21].

Солнца, а затем вновь начнет приближаться к нему. Заметим, что при движении ударной волны возможны

мелкомасштабные колебания ее фронта вследствие флуктуаций среды, которые, естественно, не учитываются в модели. Поэтому уже в ближайшее время "Voyager-1" может несколько раз пересечь гелиосферную ударную волну. Достигнув гелиосферной ударной волны, "Voyager-1" и "Voyager-2" откроют новую страницу в освоении космического пространства.

Несомненно, что измерения, которые будут проведены в области за гелиосферной ударной волной, существенно изменят наши представления о природе среды на границе солнечной системы. НАСА разрабатывает амбициозную программу изучения области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой и измерения параметров невозмущенной межзвездной среды. Планируется за 10–15 лет достичь локальной межзвездной среды, не возмущенной влиянием гелиосферы. Следует заметить, что этот проект ("Interstellar Probe") рассматривается НАСА как пробный перед запуском первого межзвездного космического аппарата к ближайшей звезде альфа-Центавра. Для этого потребуются разрабо-

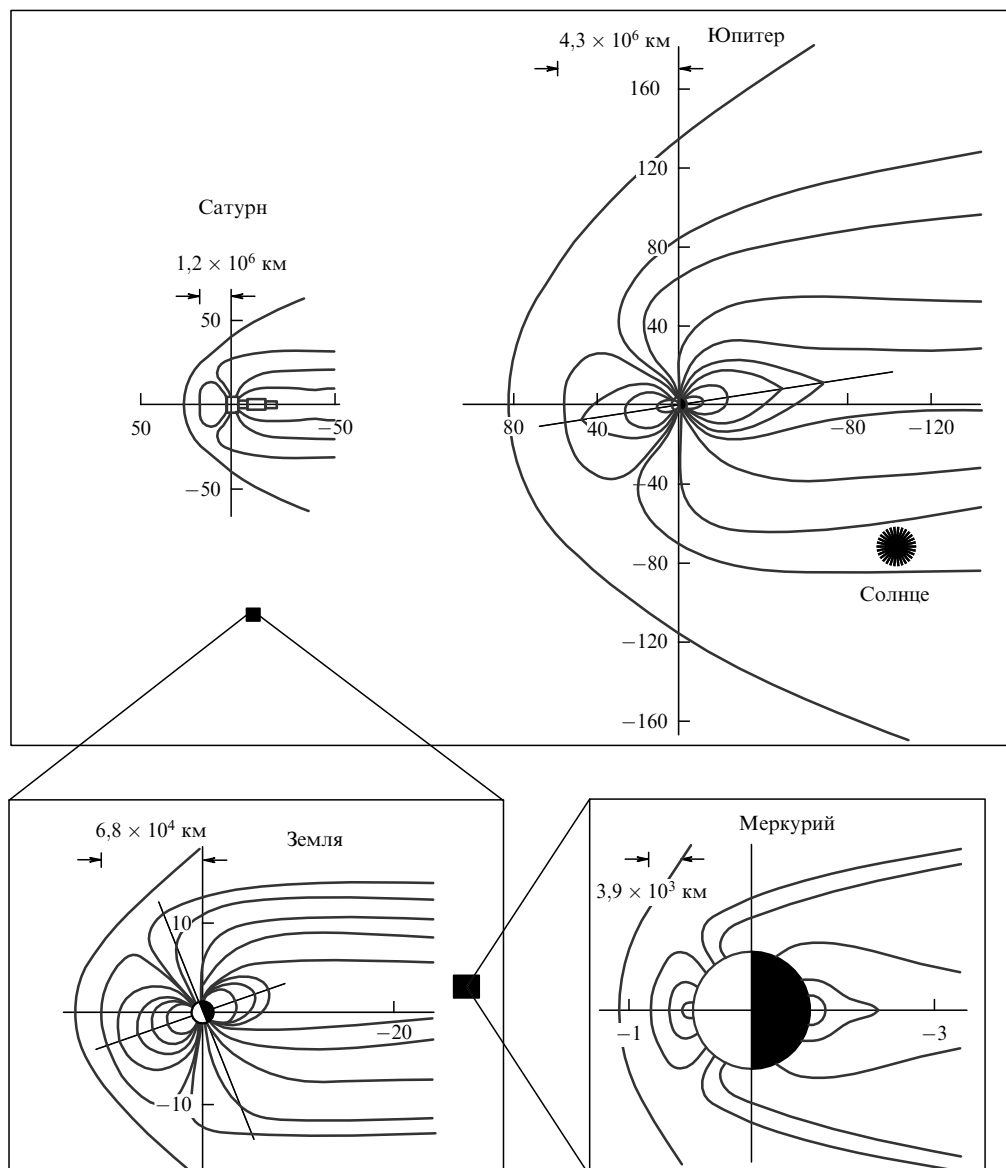


Рис. 4. Сравнительные размеры магнитосфер планет солнечной системы.

тать новые типы космических аппаратов и научных приборов. По мнению авторов настоящей статьи, соответствующий отечественный проект исследования межзвездной среды мог бы стать одним из важных элементов будущей федеральной космической программы.

2. Внутренняя гелиосфера

Внутренние области гелиосферы заполнены плазмой солнечного ветра, который представляет собой постоянное радиальное истечение плазмы солнечной короны в межпланетное пространство, увлекающее за собой силовые линии магнитного поля солнечного происхождения [2, 3]. Плазма солнечного ветра, состоящая в основном из протонов, альфа-частиц и электронов (с небольшой долей более тяжелых ионов), ускоренная уже в ближайшей окрестности Солнца до сверхзвуковых скоростей, взаимодействует со всеми планетами солнечной системы. Характер этого взаимодействия и особенности структуры области обтекания потоком солнечного ветра той или иной планеты зависят от наличия у нее собственного магнитного поля, а также свойств ее газовой оболочки.

Внешние планеты солнечной системы (Уран, Нептун, Сатурн, Юпитер), Земля и предположительно Меркурий обладают собственными магнитными полями и, как следствие, собственными магнитосферами, иерархия масштабов которых показана на рис. 4. Как видно из рисунка, магнитосферы внешних планет имеют размеры, сравнимые с размерами гелиосферы, и, таким образом, могут оказывать влияние на динамику всего окосолнечного пространства. Примером другого типа взаимодействия с солнечным ветром является взаимодействие с ним Венеры, у которой отсутствует собственное магнитное поле, и поэтому поток межпланетной плазмы напрямую взаимодействует с верхними слоями ее газовой оболочки (ионосферой). Возникающая при этом структура потоков плазмы и магнитного поля вокруг планеты, получила название индуцированной магнитосферы.

Ниже основное внимание будет уделено внутренним планетам солнечной системы (планетам земной группы) и особенностям их взаимодействия с потоком солнечного ветра.

3. Планеты земной группы

К планетам земной группы относятся Меркурий, Венера, Земля и Марс. Они располагаются вблизи Солнца на

расстояниях от 0,39 до 1,52 а.е. Планеты земной группы имеют относительно небольшие размеры и массы при высокой средней плотности — $5,5 \text{ г см}^{-3}$. Основные характеристики этих планет приведены в табл. 1.

3.1. Магнитные поля планет земной группы

Источником собственного магнитного поля планеты является процесс, известный как планетарное динамо [22]. В его основе лежит явление электромагнитной индукции, т.е. генерация магнитного поля и связанной с ним системы токов при турбулентном движении или конвекции проводящей среды поперек силовых линий магнитного поля. В теории планетарного динамо предполагается, что в недрах планеты существует жидкое проводящее ядро и имеется источник энергии, который (наряду с вращением планеты вокруг своей оси) поддерживает в ядре конвективные движения жидкости. В качестве внутреннего источника энергии для планет земной группы рассматривается радиоактивный распад в их недрах. Если в центре планеты формируется твердое внутреннее ядро (например, как у Земли), то кристаллизация вещества на его поверхности из расплава внешнего жидкого ядра создает дополнительный источник тепла для поддержания конвекции.

Из всех планет земной группы достаточно сильным собственным магнитным полем обладает только Земля. Ее поле является в основном дипольным; в настоящее время дипольный магнитный момент составляет $8 \times 10^{25} \text{ Гс см}^{-3}$, соотношение квадрупольной и дипольной составляющих 0,14. Палеомагнитные исследования свидетельствуют о том, что магнитный диполь Земли изменял свою ориентацию (Юг–Север) несколько сотен раз за 160 млн лет, сам переворот поля происходил за относительно короткое время, $\sim 1000\text{--}6000$ лет, и напряженность магнитного поля значительно уменьшалась во время переворотов.

Обнаружение в 1972 г. собственного магнитного поля у Меркурия явилось совершенно неожиданным. Собственное магнитное поле планеты было аппроксимировано дипольным полем с магнитным моментом, составляющим $\sim 1\%$ от земного, с осью диполя, наклоненной на 7° относительно оси вращения планеты. По существовавшим представлениям недра Меркурия должны были остыть 1,5–2 млрд лет назад и ядро должно находиться в твердом состоянии, в котором планетарное динамо работать не может. Однако, предположив легирование серой железо-никелевого сплава в недрах планеты, которое понижает температуру затвердевания ядра, можно

Таблица 1. Планеты земной группы: основные характеристики

Планета	Расстояние от Солнца, а.е.	Масса (относительно массы Земли)	Период вращения, земные сутки	Температура поверхности, К	$P_{\text{атм}}$ на поверхности, бар	Состав атмосферы	Собственное магнитное поле	Ионосфера
Меркурий	0,39	0,052	58,8	440	10^{-16}	Na, He	+	–
Венера	0,72	0,81	243	735	92	CO ₂ , N ₂	–	+
Земля	1	1	1	289	1	N ₂ , O ₂ (CO ₂ , H ₂ O)	+	+
Марс	1,52	0,11	1,03	214	0,006	CO ₂ , N ₂ (H ₂ O)	±*	+

*Сильная остаточная намагниченность отдельных участков поверхности.

ожидать, что жидкое состояние ядра способно поддерживать в течение более длительного времени, и, следовательно, планетарное динамо и связанное с ним магнитное поле могли "дожить" до наших дней. Другое объяснение связано с большим эксцентриситетом орбиты Меркурия и плавлением внешних слоев твердого ядра вследствие приливного рассеяния энергии на определенных участках его орбиты. В качестве альтернативы классическому гидромагнитному динамо в последнее время рассматривается механизм генерации магнитного поля Меркурия, основанный на термоэлектрическом эффекте [23, 24].

Измерения магнитных полей и плазмы, проведенные на пролетных траекториях и эллиптических орбитах советскими и американскими космическими аппаратами в 60–80-х годах XX века, дали ряд косвенных свидетельств наличия собственного магнитного поля Марса. На рисунке 5 представлены оценки дипольного магнитного момента этой планеты, сделанные различными авторами.

Однако измерения магнитного поля, проведенные позднее на относительно низких орбитах американским аппаратом "Mars Global Surveyor" (MGS) [24], показали, что вместо глобального магнитного поля на поверхности планеты существуют участки достаточно сильной намагниченности, расположенные главным образом в южном полушарии (рис. 6). Космическая станция MGS зарегистрировала множество районов с протяженностью до нескольких сотен километров, обладающих полями различной ориентации. Сильная намагниченность отдельных участков поверхности позволяет сделать предположение о существовании в далеком прошлом собственного глобального магнитного поля планеты и соответственно активного планетарного динамо. Противоположная ориентация магнитного поля над отдельными областями поверхности, по-видимому, связана с переориентацией магнитного диполя Марса в прошлом. Возможно, что сейчас магнитное поле Марса находится в процессе инверсии (следовательно, может быть значительно ослабленным), аналогичном известным палеомагнитным земным явлениям.

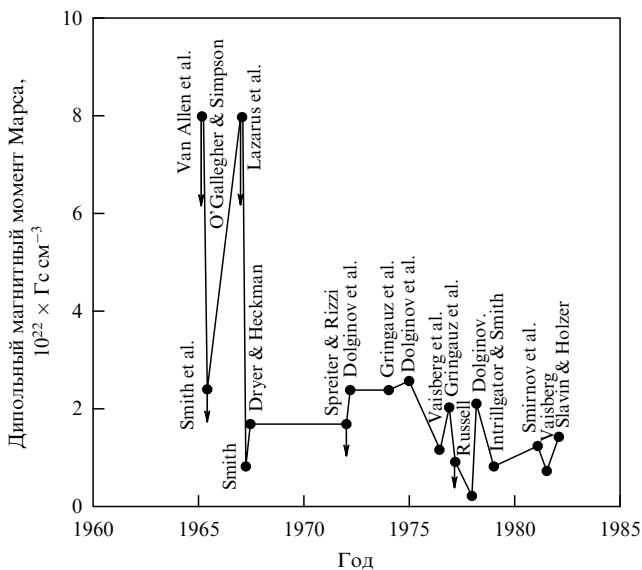


Рис. 5. Оценки дипольного магнитного момента Марса различными авторами.

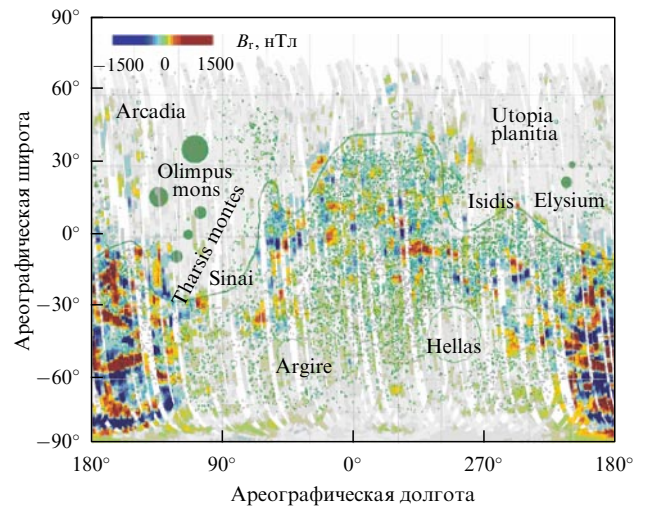


Рис. 6. Магнитные аномалии на поверхности Марса. Положение и интенсивность радиальной компоненты магнитного поля B_r , измеренного на аппарате MGS во время полета по 916 эллиптическим орбитам на высотах 100–200 км, наложенные на структурные особенности поверхности Марса [42].

Измерения, проведенные на космических аппаратах около Венеры, не обнаружили у нее собственного магнитного поля. Венера во многом сходна с Землей, и отсутствие у нее магнитного поля явилось во многом неожиданным. В качестве вероятных причин отсутствия собственного магнитного поля планеты рассматриваются ее медленное вращение, а также отсутствие достаточного потока тепла в ее недрах, что приводит к слабой конвекции в жидком ядре планеты, недостаточной для активного гидромагнитного динамо [23].

3.2. Магнитосферы планет и процессы пересоединения
Наиболее изученной из магнитосфер в солнечной системе является магнитосфера Земли, строение и динамика которой в зависимости от направления межпланетного магнитного поля схематически представлены на рис. 7. В начале 60-х годов сформировались концепции открытой и закрытой магнитосфер [26]. При южной компоненте межпланетного магнитного поля его силовые линии могут пересоединяться с линиями земного поля на дневной стороне магнитосферы, что приводит к проникновению частиц плазмы солнечного ветра в геомагнитную полость (открытая магнитосфера). При северной компоненте межпланетного поля такой процесс невозможен, и магнитосфера закрыта для проникновения плазмы извне. По данным последующих космических экспериментов взаимодействие магнитосферы Земли с набегающим потоком солнечного ветра оказалось несколько сложнее, но гипотеза о его зависимости от направления межпланетного магнитного поля в целом подтвердилась.

Пересоединение силовых линий противоположно направленных магнитных полей до сих пор является одной из основных задач теоретического и численного анализов, а также экспериментальных исследований, проводимых в околоземном космическом пространстве и наземных лабораториях [27]. Пересоединение подробно изучено и достаточно хорошо понято в магнитной гидродинамике, согласно представлениям которой

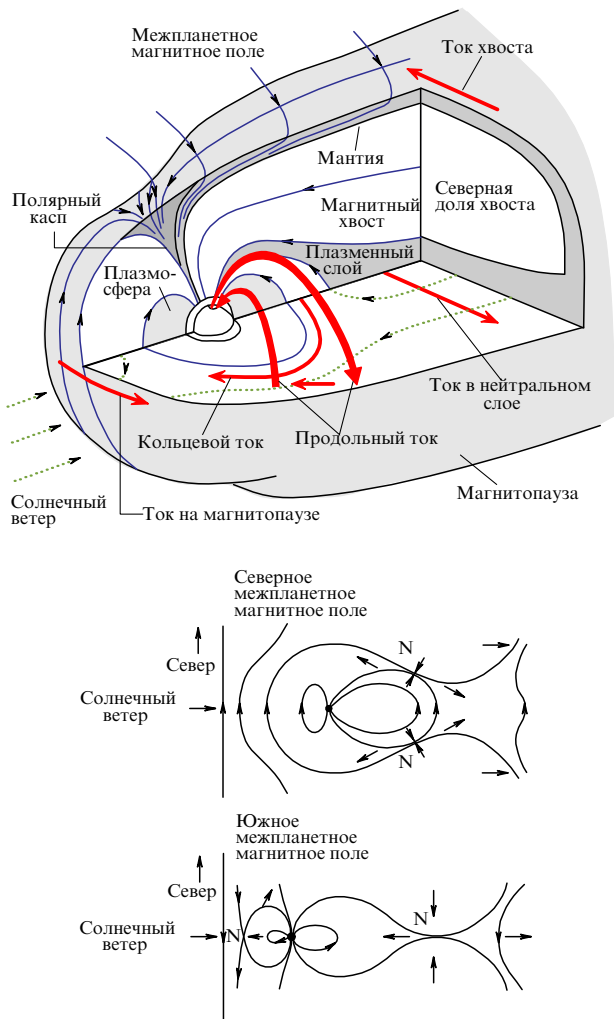


Рис. 7. Строение магнитосферы Земли, взаимодействие магнитных силовых линий земного и межпланетного полей (их пересоединение при южной компоненте межпланетного поля приводит к "открытой" магнитосфере) [26].

конечная проводимость "рвет" силовые линии в особых точках магнитного поля. Гораздо сложнее этот процесс происходит в горячей плазме планетных магнитосфер, где практически отсутствуют столкновения, и нет очевидного необратимого механизма диссипации. Как показывают расчеты, выполненные в рамках кинетической теории, роль такой диссипации могут играть хорошо известные по явлению сверхпроводимости скин-эффекты, обусловленные тем, что элементарный носитель тока электрон имеет хотя и очень малую, но конечную массу. Одним из наблюдаемых следствий пересоединения на дневной стороне магнитосферы являются "общие" силовые магнитные трубки, проходящие из солнечного ветра внутрь магнитосферы (flux transfer events) и конвектирующие вдоль границы магнитосферы — магнитопаузы. На рисунке 8 представлены пример наблюдения пересоединенной магнитной трубки и схема, поясняющая природу явления.

Пересоединение силовых линий на дневной стороне магнитосферы при южной компоненте межпланетного поля приводит к "накачке" магнитного потока в хвост магнитосферы Земли. Диссипация магнитной энергии, накопленной таким образом в долях хвоста, происходит

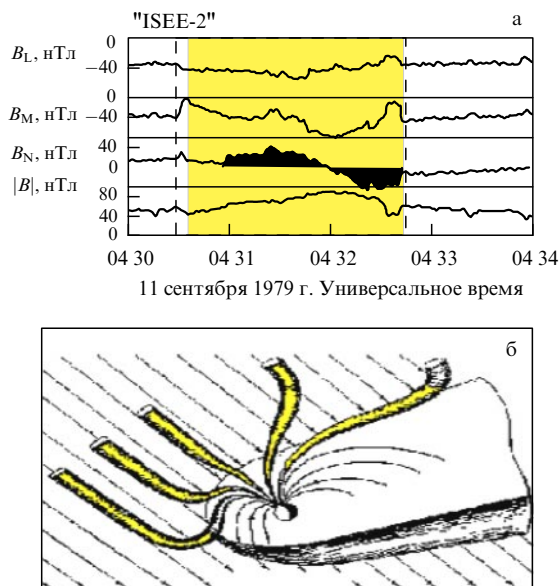


Рис. 8. (а) Явление переброса магнитного потока (flux transfer event) по данным космического аппарата "ISEE-2". Показаны измерения магнитного поля в системе координат, связанной с магнитопаузой Земли (B_N — компонента поля, направленная вдоль нормали к поверхности магнитопаузы, компоненты B_M и B_L взаимно ортогональны и лежат в плоскости магнитопаузы). В нижней части рисунка приведено абсолютное значение магнитного поля. (б) Пересоединенная магнитная силовая трубка, конвектирующая в хвост магнитосферы Земли, движется вдоль магнитопаузы; "обтягивание" внешнего магнитного поля вокруг нее приводит к характерному биполярному сигналу компоненты магнитного поля, нормальной к поверхности магнитопаузы [29].

во время магнитных суббурь. Магнитная суббуря сопровождается появлением в магнитосфере частиц с высокой энергией и возникновением системы продольных токов в хвосте магнитосферы Земли. Продольные токи связывают внешнюю магнитосферу и ионосферу, делая их единой электродинамической системой. Одна часть поперечного тока плазменного слоя хвоста магнитосферы, поддерживающего его конфигурацию из двух долей с антипараллельными магнитными полями, замыкается током, текущим по границе магнитосферы, другая часть ответвляется в продольные токи.

Собственное магнитное поле Меркурия было зарегистрировано с помощью пролетного космического аппарата "Mariner-10". Измерения магнитного поля на его борту в окрестности планеты показали, что максимальная напряженность поля наблюдается на минимальном расстоянии от поверхности планеты, что позволило сделать вывод о наличии собственного магнитного поля Меркурия [28]. Имея собственное магнитное поле, Меркурий обладает достаточно развитой магнитосферой, топология которой во многом сходна с топологией магнитосферы Земли. Более того, несмотря на весьма ограниченную статистику наблюдений (3–4 пролета "Mariner-10" в окрестности планеты), были обнаружены физические явления, хорошо известные по измерениям в земной магнитосфере. Были отмечены события, которые очень напоминают конвекцию пересоединенных магнитных силовых трубок вдоль магнитопаузы (flux transfer events) [29]. В хвосте магнитосферы Меркурия наблюдались явления, аналогичные происходящим в магнито-

сфере Земли во время развития суббури: ускоренные потоки частиц и параллельные токи в хвосте магнитосферы на фоне резких изменений напряженности и топологии магнитного поля в долях хвоста [30].

Наблюдение подобных явлений поставило ряд вопросов перед физикой магнитосфер планет, обладающих собственным магнитным полем. В частности, малые поперечные размеры меркурианской магнитосферы создают проблему объяснения механизмов ускорения плазмы в ее хвосте. В свою очередь, отсутствие собственной плотной газовой оболочки сделало Меркурий уникальным объектом, взаимодействие которого с солнечным ветром определяется лишь собственно его магнитосферой, без участия проводящей и плотной ионосферы. Сопоставляя физические явления в магнитосферах Земли и Меркурия, можно исследовать, какую роль играет ионосфера планеты в динамике магнитосферы и ее токовой системы. Не исключено, что токовые системы, определяющие динамику меркурианской магнитосферы, могут быть связаны с проводящей поверхностью планеты, фотозлектронным облаком над ней, а также разреженной экзосферой, состоящей из нейтральных и ионизованных атомов Na и K.

Процессы пересоединения могут играть также важную роль в динамике магнитосферы Марса, на поверхности которого находятся области с сильной намагниченностью. Пересоединение силовых линий, связанных с магнитными аномалиями, а также линий межпланетного магнитного поля на дневной стороне планеты и их последующая конвекция в хвост планеты приводит к формированию достаточно сложной топологии магнитных полей на ночной стороне и образованию вблизи границы плазменной оболочки Марса слоя с широким магнитным полем [31]. Такие конфигурации магнитных полей неустойчивы к возбуждению тиринг-моды, что на нелинейной стадии ее развития приводит к стохастиза-

ции магнитного поля в слое (возникновению магнитных островов) [32]. При этом происходит своего рода просачивание (диффузия) силовых линий, приводящая к перколяционному пересоединению (рис. 9). Данный механизм реконфигурации магнитных полей может быть одним из основных процессов, определяющих конвекцию магнитных силовых линий в магнитосфере Марса в условиях сильно проводящей ионосферы.

3.3. Взаимодействие солнечного ветра с Венерой

Взаимодействие Венеры с потоком солнечного ветра представляет собой классический случай взаимодействия сверхзвукового потока плазмы с планетой, которая не обладает собственным магнитным полем (рис. 10). Давления ионосферы и верхней атмосферы планеты достаточно для практически полной остановки солнечного ветра. В этих условиях с подсолнечной стороны планеты образуется стоячая ударная волна, которая отклоняет набегающий поток, заставляя его обтекать препятствие. При этом поток плазмы солнечного ветра, заторможенный и разогретый ударной волной, взаимодействует со свежоионизованными ионами планетарного происхождения, что приводит к существенному изменению параметров потока плазмы вблизи планеты и формированию магнитного шлейфа Венеры.

Данные о взаимодействии солнечного ветра с Венерой получены главным образом советскими межпланетными станциями "Венера-9" и "Венера-10" в 1975–1976 гг., а также американским космическим аппаратом "Pioneer-Venus Orbiter" (PVO) в течение 1978–1992 гг. [33]. Измерения, проведенные на этих аппаратах, показали, что Венера обладает так называемой наведенной магнитосферой, для которой характерно наличие относительно резкой границы (ионопаузы) между набегающим потоком солнечного ветра и ионосферой планеты, а также магнитного хвоста, образующегося вследствие взаимодействия межпланетного магнитного поля, "вмороженного" в плазму солнечного ветра и ионосферы планеты. С

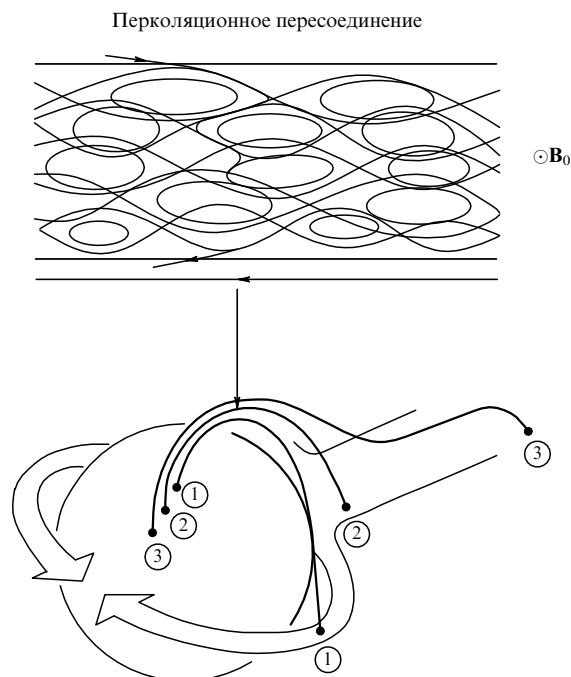


Рис. 9. Перколяционное пересоединение на границе плазменной оболочки Марса [31].

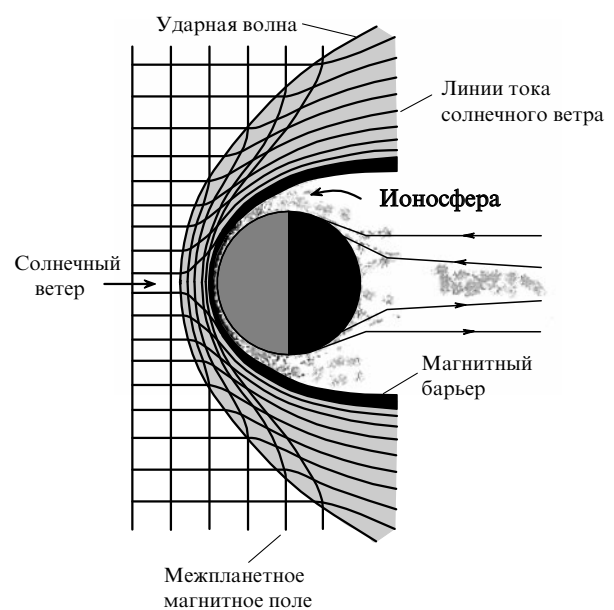


Рис. 10. Венера: характерные границы и структура области взаимодействия Венеры с солнечным ветром [44].

внешней стороны ионопауза отделена от обтекающей плазмы солнечного ветра магнитным барьером, в котором давление магнитного поля превосходит давление плазмы и начинается замещение протонов солнечного ветра ионами планетарного происхождения. Эта структура формируется за счет торможения потока плазмы солнечного ветра вблизи препятствия, сопровождающегося сжатием магнитных силовых трубок.

Характерной особенностью хвоста планеты является наличие двух долей с магнитным полем, вытянутым вдоль направления Солнце–Венера и имеющим противоположные ориентации вдоль этого направления в каждой из долей. При пересечении границы хвоста отмечается резкое изменение параметров плазмы — ее скорости, плотности, температур ионов и электронов. В качестве основной ионной компоненты в хвосте доминируют ионы планетарного происхождения.

Формирование хвоста Венеры и происхождение потоков ионов в нем были рассмотрены в [34]. Показано, что межпланетное магнитное поле проникает в верхние слои ионосферы планеты на дневной стороне планеты и нагружается планетарными фотоионами, ионизованными солнечным излучением (рис. 11). Конвекция магнитных силовых трубок, заполненных плазмой планетарного происхождения, на ночную сторону приводит к образованию магнитного шлейфа (хвоста) Венеры и плазменной мантии (поток ионов в шлейфе). Конфигурация магнитного поля в шлейфе планеты (ориентация поперечной компоненты магнитного поля) зависит от направления межпланетного магнитного поля и изменяется во времени [35]. Другой интересной особенностью хвоста Венеры является его "скрученность" по часовой стрелке независимо от направления межпланетного магнитного поля [36]. Имеются также косвенные свидетельства о возможных процессах пересоединения в шлейфе Венеры [37].

На дневной стороне планеты в результате проникновения магнитных силовых трубок межпланетного поля происходит образование так называемых магнитных "жгутов" (рис. 12), которые были выявлены по наблюдениям весьма характерного поведения компонент магнитного поля (его годографа). Нагружение магнитных трубок фотоионизованными ионами планетарного происхождения вблизи подсолнечной области ионопаузы

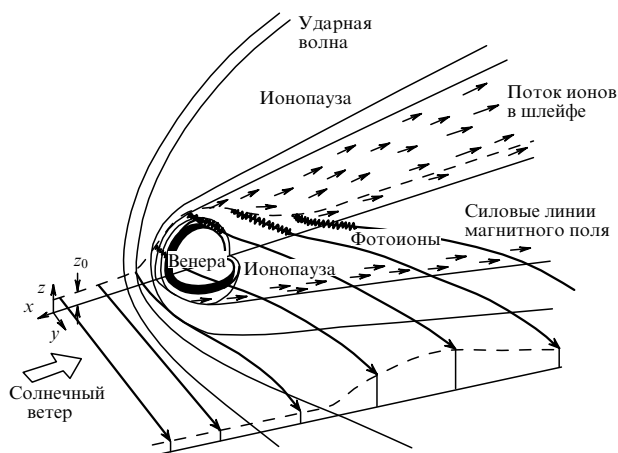


Рис. 11. Венера: взаимодействие солнечного ветра с ионосферой планеты (аккреционный хвост) [34].

приводит к их погружению в ионосферу, сопровождающемуся их сжатием (увеличением амплитуды магнитного поля в них), а также скручиванием магнитных силовых линий [38]. Другой механизм, приводящий к образованию жгутов, может быть связан с нелинейной стадией развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на границе ионосферы [39].

3.4. Взаимодействие солнечного ветра с Марсом

Марс, обладающий достаточно разреженными атмосферой и ионосферой и сильными магнитными аномалиями в южном полушарии, представляет собой по типу взаимодействия с солнечным ветром уникальный объект. С одной стороны, отсутствие глобального магнитного поля делает взаимодействие Марса с солнечным ветром во многом аналогичным взаимодействию межпланетной плазмы с Венерой. С другой стороны, магнитные поля аномалий, создавая дополнительное препятствие (сопротивление) потоку солнечного ветра и пересоединяясь с линиями межпланетного поля, усложняют форму препятствия, структуру области взаимодействия и динамику ее характерных границ.

Исследования, проведенные на космических аппаратах показали, что у Марса, как и у Венеры, имеется головная ударная волна — область сжатия и сдавливания межпланетного магнитного поля (магнитный барьер). В области магнитного барьера происходит резкое падение потока протонов солнечного ветра и его замещение ионами планетарного происхождения. Сносимые на ночную сторону планеты линии межпланетного магнитного поля вытягиваются вдоль направления Солнце–планета и формируют магнитный шлейф Марса. Как и в случае Венеры, в центре шлейфа находится плазменный слой, в котором наблюдаются интенсивные потоки ускоренных планетарных ионов [40]. Магнитная конфигурация шлейфа и положение плазменного слоя зависят от ориентации межпланетного магнитного поля.

В ионосфере северного полушария, где сильные магнитные аномалии отсутствуют, наблюдаются магнитные жгуты, аналогичные открытым в ионосфере Венеры.

Магнитные аномалии, находящиеся в южном полушарии, достаточно интенсивны, чтобы оказывать воздействие как на размеры и динамику препятствия солнечного ветра на Марсе, так и на положение и структуру границы магнитного барьера. Показано, что над областями магнитных аномалий высота магнитного барьера увеличивается на несколько сотен километров.

Внешние силовые линии магнитного поля аномалий могут пересоединяться с силовыми линиями межпланетного магнитного поля, что позволяет части энергичных протонов и электронов солнечного ветра проникать вдоль открытых силовых линий через области пересоединения в глубокие слои марсианской атмосферы, ионизируя и разогревая ее. Число подобных областей может быть достаточно велико, и они могут оказывать значительное влияние на тепловой баланс и глобальную динамику ионосферы и атмосферы Марса.

Взаимодействие солнечного ветра с атмосферой Марса приводит к ее постепенной диссипации. Основными процессами, приводящими к потерям составляющих атмосферы, являются (рис. 13): диссоциативная рекомбинация ($O_2^+ + e^- \rightarrow O^* + O^* + dE$); столкновения планетных ионов с ионами солнечного ветра и захвачен-

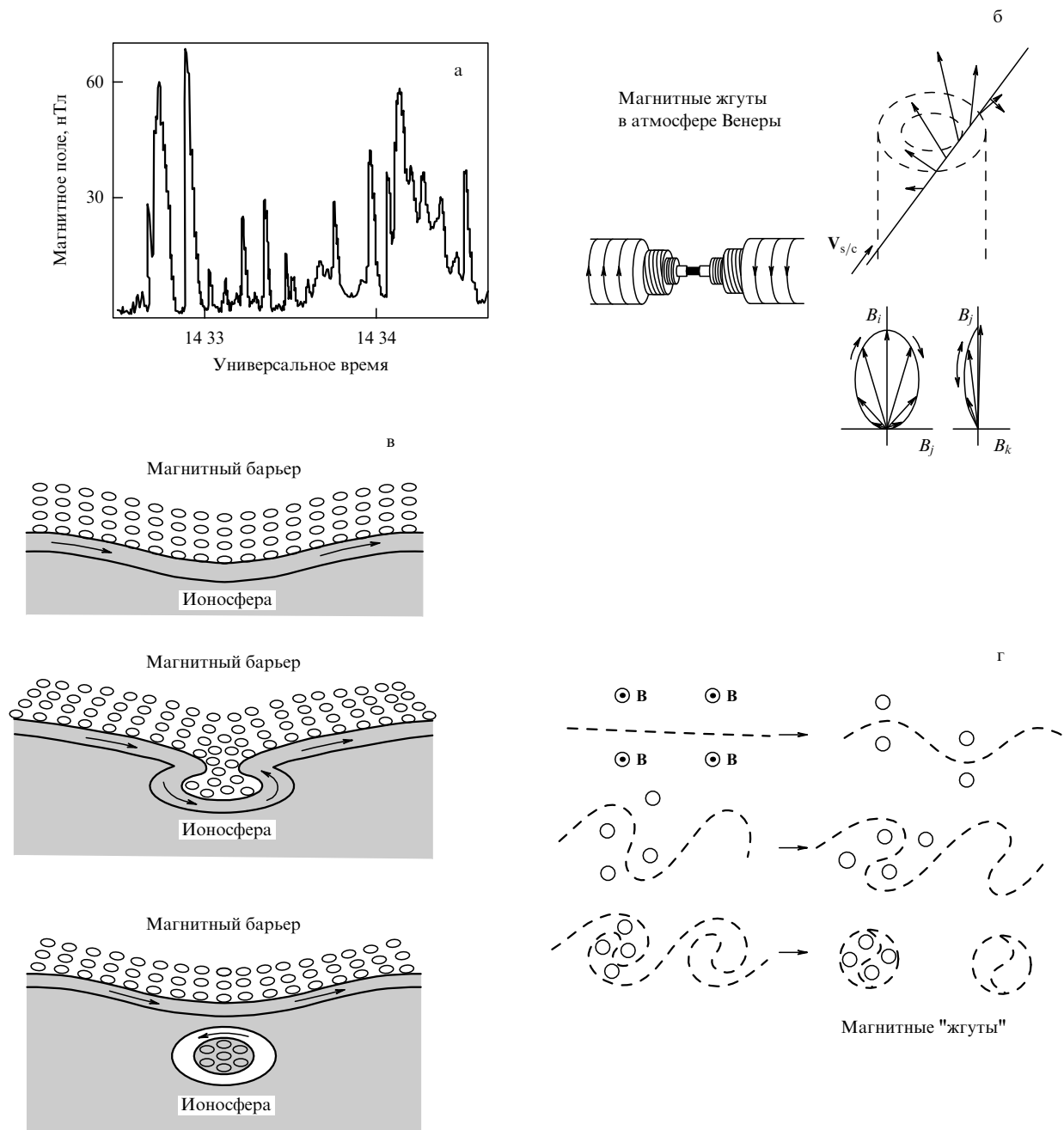


Рис. 12. Магнитные жгуты в ионосфере Венеры и возможные механизмы их образования. (а) Пример наблюдений магнитных жгутов в ионосфере Венеры на космическом аппарате "Pioneer-Venus-Orbiter". (б) Топология магнитного поля и его годограф при пересечении жгута космическим аппаратом (направление движения спутника указано стрелкой $V_{s/c}$). Возможные механизмы образования магнитных жгутов: (в) за счет нагружения силовых линий межпланетного поля фотоионами планетного происхождения (стрелками показано направление тока вдоль границы ионосферы); (г) за счет развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца на границе ионосферы [43].

ными частицами (sputtering); захват ионизованных планетных ионов потоком солнечного ветра (pick-up) на дневной стороне; планетарный ветер на ночной стороне, в шлейфе планеты — захват ионов магнитным полем солнечного ветра, проникающим в ионосферу. В таблице 2 представлены оценки скорости потерь ионных компонент атмосферы за счет перечисленных выше механизмов. Как видно из табл. 2, потери атмосферных составляющих происходят главным образом вследствие процессов захвата ионов потоком солнечного ветра, которые и играют ключевую роль в общем балансе потерь "тяжелых" компонент (в частности кислорода) газовой оболочки планеты.

Структура планетарного ветра (потоков атмосферных ионов в шлейфе Марса) как одного из важнейших механизмов потерь газовой оболочки планеты исследуется на космическом аппарате "Марс-Экспресс" (рис. 14). Показано, что планетарный ветер имеет две компоненты. Переменные по интенсивности и энергии потоки ионов кислорода зарегистрированы вблизи границы магнитного шлейфа в области пограничного слоя. Энергия этих ионов, максимальная около границы, уменьшается при приближении к центру магнитного хвоста Марса. В центре хвоста, в области плазменного слоя, всегда наблюдается поток ионов, энергия и интенсивность которого относительно постоянны.

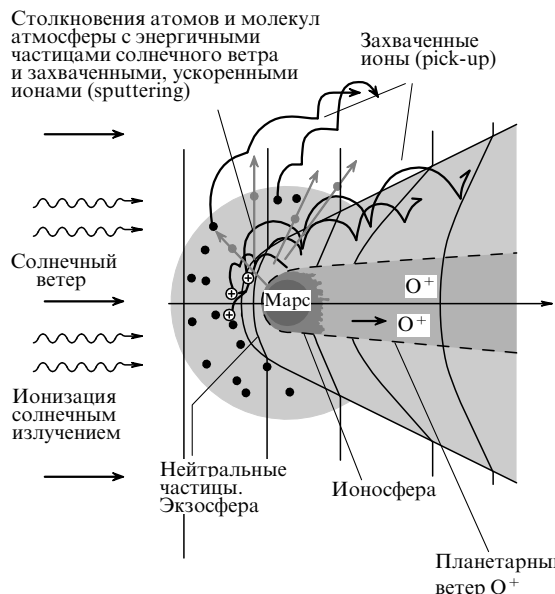


Рис. 13. Основные механизмы нетепловой потери планетой со слабым магнитным полем своей атмосферы.

Таблица 2. Скорости потерь ионов атмосферы Марса [с⁻¹]

Механизм потери ионного компонента	O ⁺	O ₂ ⁺	CO ₂ ⁺	N ⁺
Диссоциативная рекомбинация	6 × 10 ⁶			5 × 10 ⁵
Диссипация за счет столкновений (sputtering)	1 × 10 ²⁴		8 × 10 ²³	
Захват солнечным ветром (pick-up)	3 × 10 ²⁶			
Планетарный ветер	2 × 10 ²⁵	~ 10 ²⁴	5 × 10 ²²	

Подробный обзор данных о взаимодействии солнечного ветра с планетой Марс приведен в сборнике [41].

4. Перспективы исследований внутренних планет солнечной системы

4.1. Меркурий

Европейское космическое агентство (ESA) совместно с японским космическим агентством (JAXA) приступили к осуществлению проекта "Veri Colombo", нацеленного на максимально полное исследование Меркурия: его строения и химического состава, взаимодействия с солнечным ветром, структуры магнитосферы и экзосферы. Миссия к планете, запуск которой назначен на 2012 г., включает в себя два космических аппарата: магнитосферный и планетный спутники. Космические аппараты предполагается разместить на полярных орбитах с максимальным (минимальным) удалением от поверхности планеты — 11800(400) км для магнитосферного спутника и 1500(400) км для планетного.

На обоих аппаратах будут установлены приборы для измерения характеристик заряженных частиц и электромагнитных полей; в разработке некоторых приборов принимают участие российские ученые.

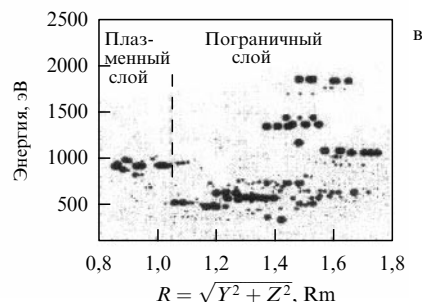
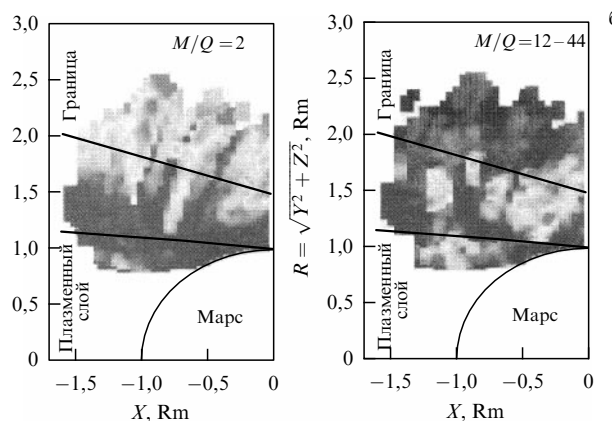
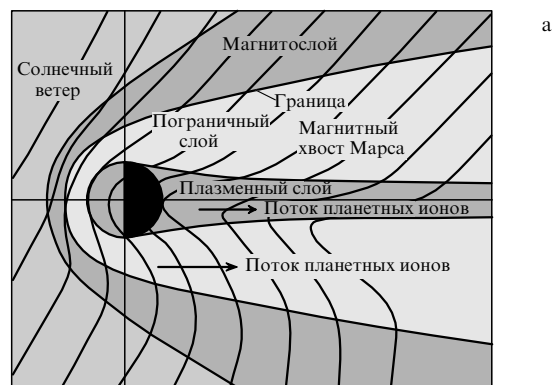


Рис. 14. Планетарный ветер (по данным АМС "Марс-Экспресс", 2004 г.). (а) Характерные области и границы околомарсианского пространства. (б) Пространственные распределения потоков ионов с различными соотношениями массы и заряда (M/Q) на ночной стороне Марса, представленные в ареоцентрической цилиндрической системе координат. В качестве единицы длины используется радиус Марса $R_m = 3393$ км. В левой части рисунка — потоки ионов с $M/Q = 2$ (альфа-частицы солнечного ветра), в правой — потоки ионов планетного происхождения с $M/Q > 12$. (в) Характерные значения энергии ионов планетного происхождения в пограничном слое и плазменном слое Марса.

4.2. Венера

В октябре 2005 г. российским носителем "Союз-Фрегат" будет осуществлен запуск космического аппарата "Венера-Экспресс", созданного под эгидой ESA. Космический аппарат предполагается вывести на эллиптическую полярную орбиту вокруг планеты с минимальным и максимальным расстояниями от поверхности 450 и 66000 км соответственно. В состав научной аппаратуры, размещенной на межпланетном зонде, входят приборы для измерений магнитного поля (MAG), нейтральных и заряженных частиц (ASPERA-4).

Российские ученые участвуют в проведении экспериментов, нацеленных на изучение атмосферы планеты (см. доклад О.И. Кораблева на этой же сессии).

4.3. Марс

Космический аппарат Европейского космического агентства "Марс-Экспресс", запущенный с Земли и выведенный на орбиту около Марса в 2003 г., успешно работает уже более года, находясь на полярной орбите с высотами перигея и апогея 258 и 11560 км соответственно.

На борту аппарата размещены научные приборы, предназначенные в основном для дистанционного исследования поверхности и атмосферы Марса. Прямые измерения плазмы и ускоренных нейтральных частиц проводятся на борту "Марс-Экспресса" с помощью только прибора ASPERA; приборы для измерений магнитного поля в состав научной аппаратуры не вошли.

4.4. Проект "Фобос-Грунт"

В 2009 г. в России планируется запустить автоматическую межпланетную станцию (АМС) "Фобос-Грунт", главной задачей которой является посадка на естественный спутник Марса — Фобос — и доставка образцов грунта с его поверхности на Землю (рис. 15). Кроме того, на борту АМС будет находиться комплекс научных приборов, позволяющих исследовать магнитосферу, ионосферу и атмосферу Марса с помощью как прямых, так и дистанционных измерений.

Для изучения процессов взаимодействия солнечного ветра с планетой на борту АМС "Фобос-Грунт" устанавливается ряд датчиков заряженных частиц и магнитного поля, составляющих в целом единый прибор "Фобос: плазменно-магнитная система" (ФПМС), в задачи которого входит измерение магнитного поля и параметров плазмы в околомарсианском пространстве.

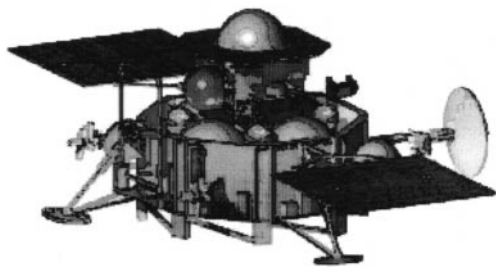
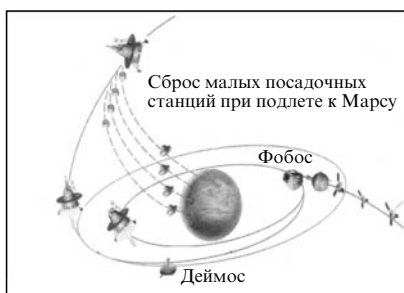


Рис. 15. Межпланетная космическая станция "Фобос-Грунт". В верхней части рисунка — сценарий миссии: полет к Марсу, опорная орбита, близкая к орбите естественного спутника планеты — Фобоса, и старт возвращаемого аппарата; в нижней части рисунка — общий вид АМС — орбитальный и возвращаемый модули.

Таблица 3. Состав прибора ФПМС*

Блок прибора ФПМС	Измеряемые параметры	Диапазон измерений
Блок датчиков магнитного поля	Квазипостоянное и переменное магнитное поле	–2000 – +2000 нТл
Датчик планетарных ионов	Потоки ионов различных энергий и масс в магнитосфере Марса	Энергия 10 эВ – 10 КэВ; разрешение по массам $M/dM \sim 100$
Датчик захваченных ионов	Потоки ионов планетарного происхождения в области солнечного ветра вокруг Марса	Энергия 10 эВ – 50 КэВ
Датчик электронов	Энергетические распределения электронов в магнитосфере Марса	Энергия 1 эВ – 5 КэВ
Блок обработки и управления	Сбор, предварительная обработка и хранение информации, полученной отдельными блоками прибора	

* Общий вес прибора 3 кг, потребляемая мощность 3,3 Вт.

Основной научной задачей ФПМС является изучение процессов эрозии марсианской атмосферы, вызванных взаимодействием планеты с солнечным ветром, получение оценки скорости потерь ионов планетарного происхождения и исследование относительных вкладов различных механизмов в эрозию атмосферы (планетарный ветер, захват потоком солнечного ветра ионов планетарного происхождения из кислородной (водородной) короны планеты). В задачи прибора ФПМС также входят:

исследование механизмов ускорения (нагрева) заряженных частиц в хвосте марсианской магнитосферы;

изучение физических процессов в окрестности магнитопаузы — верхней границы области "нагревания" (pill-up) межпланетного магнитного поля;

исследование движения плазменных границ в околомарсианском пространстве и уточнение физических моделей их движения в зависимости от фазы вращения планеты и параметров солнечного ветра;

изучение кинетических процессов на околомарсианской ударной волне и оценка роли в этих процессах планетарных ионов, захваченных солнечным ветром;

поиск свидетельств взаимодействия солнечного ветра и (или) магнитосферной плазмы Марса со спутником Фобосом и исследование химического состава поверхности Марса с помощью масс-анализа ионов, "выбитых" солнечным ветром.

Обширная программа марсианских исследований подготовлена также специалистами НАСА. Можно надеяться, что к середине нынешнего столетия многие загадки плазменной оболочки Марса будут раскрыты, и это станет одним из элементов подготовки пилотируемой экспедиции к планете.

Настоящая работа велась в рамках программы ОФН РАН № 18 "Плазменные процессы в солнечной системе"

и, в частности, благодаря гранту поддержки научных школ 1739.2003.2.

Список литературы

1. Davis L (Jr) *Phys. Rev.* **100** 1440 (1955)
2. Parker E N *Astrophys. J.* **128** 664 (1958)
3. Грингауз К И и др. *ДАН СССР* **131** 1301 (1960)
4. Witte M *Astron. Astrophys.* **426** 835 (2004)
5. Möbius E et al. *Astron. Astrophys.* **426** 897 (2004)
6. Parker E N *Astrophys. J.* **134** 20 (1961)
7. Баранов В Б, Краснобаев К В, Куликовский А Г *ДАН СССР* **194** 41 (1970)
8. Baranov V B, Malama Yu G *J. Geophys. Res.* **98** (A9) 15157 (1993)
9. Izmodenov V V, in *The Sun and the Heliosphere as an Integrated System* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 317, Eds G Poletto, S Suess) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004)
10. Izmodenov V V, Gruntman M, Malama Yu G *J. Geophys. Res.* **106** (A6) 10681 (2001)
11. Malama Yu G *Astrophys. Space Sci.* **176** 21 (1991)
12. Baranov V B, Lebedev M G, Malama Yu G *Astrophys. J.* **375** 347 (1991)
13. Linsky J L, Wood B E *Astrophys. J.* **463** 254 (1996)
14. Izmodenov V V, Lallement R, Malama Y G *Astron. Astrophys.* **342** L13 (1999)
15. Wood B E *Living Rev. Solar Phys.* **1** (2) (2004); <http://www.livingreviews.org/lrsp-2004-2>
16. Krimigis S M et al. *Nature* **426** 45 (2003)
17. McDonald F B et al. *Nature* **426** 48 (2003)
18. Izmodenov V, Gloeckler G, Malama Yu *Geophys. Res. Lett.* **30** (7) 3 (2003)
19. Alexashov D B et al. *Astron. Astrophys.* **420** 729 (2004)
20. McComas D et al. *AIP Conf. Proc.* **719** 162 (2004)
21. Izmodenov V, Malama Yu, Ruderman M S *Astron. Astrophys.* **429** 1069 (2005)
22. Stevenson D J *Earth Planet. Sci. Lett.* **208** (1) 1 (2003)
23. Stevenson D J *Earth Planet. Sci. Lett.* **82** (1–2) 114 (1987)
24. Giampieri G, Balogh A *Planet. Space Sci.* **50** 757 (2002)
25. Acuna M H et al. *Science* **279** 1676 (1998)
26. Dungey J W *Phys. Rev. Lett.* **6** 47 (1961)
27. Frank A G et al. *AIP Conf. Proc.* **703** 431 (2004)
28. Ness N F et al. *Icarus* **28** 479 (1976)
29. Russell C T *Adv. Space Res.* **26** 393 (2000)
30. Slavin J A et al. *Planet. Space Sci.* **45** 133 (1997)
31. Kennel C F et al. *Geophys. Res. Lett.* **16** 915 (1989)
32. Galeev A A, Kuznetsova M M, Zelenyi L M *Space Sci. Rev.* **44** (6) 1 (1986)
33. Vaisberg O L et al., in *Solar System Plasmas in Space and Time* (Geophysical Monograph, 84, Eds J Burch, J H Waite (Jr)) (Washington, DC: Am. Geophys. Union, 1994) p. 207
34. Vaisberg O L, Zelenyi L M *Icarus* **58** 412 (1984)
35. Ерошенко Е Г *Космич. уислел.* **17** 93 (1979)
36. Verigin M, Luhmann J G, Russell C T, in *Plasma Environments of Non-Magnetic Planets* (COSPAR Colloquia Ser., Vol. 4, Ed. T I Gombosi) (Oxford: Pergamon Press, 1993) p. 259
37. Verigin M I, Gringauz K I, Ness N F *J. Geophys. Res.* **89** (A7) 5461 (1984)
38. Russell C T, Elphic R C *Nature* **279** 616 (1979)
39. Wolff R S, Goldstein B E, Yeates C M *J. Geophys. Res.* **85** (A12) 7697 (1980)
40. Котова Г А и др. *Космич. уислел.* **37** (1) 31 (1999)
41. Winterhalter D, Acuña M, Zakharov A (Eds) *Mars' Magnetism and its Interaction with the Solar Wind* (Space Science Series of ISSI, Vol. 18) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004)
42. Ness N F et al. *J. Geophys. Res.* **105** (A7) 15991 (2000)
43. Russell C T, in *Physics of Magnetic Flux Ropes* (Geophysical Monograph, 58, Eds C T Russell, E R Priest, L C Lee) (Washington, DC: Am. Geophys. Union, 1990) p. 413
44. Luhmann J G, in *Physics of Magnetic Flux Ropes* (Geophysical Monograph, 58, Eds C T Russell, E R Priest, L C Lee) (Washington, DC: Am. Geophys. Union, 1990) p. 425

PACS numbers: **96.30**. – t, **96.35**.Hv, **96.35**.Cr

Исследования атмосфер планет земной группы

О.И. Кораблев

1. Введение

Из планет земной группы значительными атмосферами обладают Венера, Земля и Марс. Меркурий и Луна считаются безатмосферными небесными телами, хотя и в том, и в другом случае обнаружены разреженные атмосферы. Процессы в гораздо более плотных атмосферах Венеры и Марса можно напрямую сравнивать с аналогичными процессами на Земле, и их исследования связаны с такими актуальными проблемами, как изменение условий обитания на Земле и происхождение жизни. За последние полтора десятилетия наиболее продвинулись исследования Марса. Летучие компоненты, в частности вода, и их история, а также серьезные свидетельства об изменениях климата привлекают особое внимание ученых. Доклад посвящен сравнительному анализу атмосфер планет земной группы, особое внимание уделено новым результатам исследования Марса, полученным в миссии Европейского космического агентства (ЕКА) "Марс-Экспресс" при участии российских исследователей.

2. Гипотезы формирования и первичного состава

Считается, что Солнце, планеты и их атмосферы сконденсировались около 4,6 млрд лет (1 Ga) назад из примитивной солнечной туманности, близкой по составу к солнечному (H, He, с небольшой примесью более тяжелых элементов). Соединения этих элементов (минералы и льды) сконденсировались и аккрецировали в планеты [1]. Атмосферы и летучие компоненты планет могут быть остатками первичных атмосфер, результатом ударной или постепенной дегазации планетеземалей либо, возможно, они были позднее занесены кометами. Планеты-гиганты, образовавшиеся вдали от Солнца, оказались способными удержать большое количество газа — в составе их спутников и систем колец содержится большое количество льдов. Планеты земной группы состоят преимущественно из минералов и содержат льды и летучие лишь в виде небольшой примеси, из которой состоят их атмосферы, океан Земли, полярные шапки и т.д.

Существует несколько гипотез, связанных с процессами аккреции планет земной группы. Согласно одной из них [2], в результате гравитационных возмущений планетеземали из любого места внутренней солнечной системы могли войти в состав любой из планет земной группы. Таким образом, первичный состав летучих на планетах должен быть приблизительно одинаковым. Различия в составе появились в процессе эволюции: Меркурий и Луна либо потеряли атмосферы в результате крупных ударов, либо вследствие малой массы просто оказались неспособными удержать атмосферы. Согласно этой гипотезе, Марс и Венера образовались с таким же количеством воды, как и Земля. В соответствии с количеством получаемой от Солнца энергии, вода на