

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Исследования Солнечной системы,
состояние и перспективы*

Л.М. Зелёный, А.В. Захаров, Л.В. Ксанфомалити

В статье изложены современные представления о Солнечной системе и планетах других звёзд, о современном состоянии и будущих проектах космических исследований, проводимых в России и за рубежом.

PACS numbers: 96.10. + i, 96.30. – t, 97.82. – j

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200910g.1118

Содержание

1. Введение (1118).
 2. Современные представления о структуре Солнечной системы (1119).
 3. Гипотезы происхождения Солнечной системы (1121).
 4. Формирование планетных систем согласно теории последовательной аккреции (1122).
 5. Солнечная система как исследовательский полигон (1126).
 6. Исследования Солнечной системы и их основные научные задачи (1131).
 7. За пределами Солнечной системы: экзопланеты (1137).
 8. Заключение (1139).
- Список литературы (1140).

1. Введение

Исследование Солнечной системы космическими аппаратами (КА) позволило заново открыть планеты, известные с древности. Сейчас почти у каждой планеты Солнечной системы побывал робот, посланный с Земли. Результаты таких исследований радикально изменили наши представления о телах Солнечной системы, планетах, их спутниках, астероидах, кометах. Например, условия на Венере — соседке и двойнике нашей планеты — оказались кардинально отличными от земных: температура у её поверхности достигает почти 500 °С, а давление почти в 100 раз превышает земное. Марс, несмотря на его интенсивные исследования в основном американскими автоматами, сохраняет возможность обнаружения внеземной жизни. Спутники планет-гигантов Юпитера и Сатурна оказались странными мирами с

действующими вулканами (Ио) или с океаном, покрытым панцирем из льда (Европа).

Как образовались планеты и чем объяснить разнообразие условий на них и их внутреннего строения, как и из чего образовалась Солнечная система, как эволюционируют планеты? Эти и множество подобных вопросов волнуют не только учёных, занимающихся исследованиями Солнечной системы, но и всех, кто интересуется эволюцией естественных условий самой Земли. До последнего времени исследовался только один объект — Солнечная система. В последние годы удалось открыть планетные системы и у других звёзд. Изучение этих новых объектов позволит продвинуться в понимании нашей собственной планетной системы.

Эпоха пионерских космических исследований и разведки условий на других планетах сменяется эпохой последовательных и целенаправленных программ. Одна из таких программ — детальные исследования и поиск возможной жизни или её следов на Марсе — единственной планете земного типа, на которой ещё сохраняется надежда найти жизнь. До последнего времени такие крупномасштабные программы космических исследований существовали только в США и Европе. Три года назад по предложению Российской академии наук была принята Российская программа космических исследований, которая включает в себя исследования Марса, его спутников, Луны, Венеры, а также новое направление в наших космических программах — полёт к спутнику Юпитера Европе и его робототехнические исследования. Этот проект может стать частью большой международной программы исследований галилеевых спутников Юпитера, 400-летний юбилей открытия которых будут праздновать в следующем 2010 году.

Л.М. Зелёный, А.В. Захаров, Л.В. Ксанфомалити.
Институт космических исследований РАН,
ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 333-2045, (495) 333-2322
E-mail: zakharov@iki.rssi.ru

Статья поступила 24 августа 2009 г.

* Статья представляет собой расширенное содержание доклада Л.М. Зелёного "Перспективы Российской программы исследований физических процессов в Солнечной системе" на Научной сессии Общего собрания Отделения физических наук Российской академии наук "Перспективы развития фундаментальной физики и астрономии", состоявшейся 15 декабря 2008 г.

Физические процессы, действующие в Солнечной системе, контролируются многообразием различных факторов, которые определяли её возникновение и эволюцию и действуют вплоть до нашего времени. Для того чтобы понять, как возникла Солнечная система и как она эволюционировала, астрономы, физики, химики и геологи рассматривают разные стороны этого единого эволюционного процесса.

Если попытаться максимально широко сформулировать основные проблемы, которые стоят перед космическими исследованиями, то среди них можно выделить следующие "самые главные" вопросы:

1. Как и из чего возникла Вселенная?
2. Какие фундаментальные физические законы определяют её состояние?
3. Какие условия необходимы для образования планетных систем? Как возникла и как эволюционирует Солнечная система?
4. Какие условия необходимы для возникновения жизни на планетах?
5. Как сформировались условия возникновения жизни на Земле как космической экосистеме, как влияют на неё внешние факторы (излучение Солнца, галактические космические лучи и др.)?

Последние три вопроса относятся к исследованиям галактической провинции, в которой расположена Солнечная система. В предлагаемой статье предпринята попытка кратко изложить сведения о прогрессе научных данных о физике Солнечной системы, о состоянии различных направлений её исследований (в том числе, космическими средствами) и о возможной роли в них нашей

страны. Особым остаётся вопрос о поисках жизни на телах Солнечной системы. По существу, эта проблема стоит перед наукой ещё со времён античности. В наше время её чаще всего связывают с планетой Марс. В последней трети XX в. и в первом десятилетии XXI в. к Марсу были отправлены многочисленные экспедиции автоматов, главной задачей которых был поиск признаков жизни и исследование возможной среды её существования. Сегодня, спустя 44 года после получения первых снимков Марса, сделанных с помощью космических аппаратов, единственным определённым ответом остаётся: признаков жизни не обнаружено — хотя оптимисты продолжают предлагать всё новые места возможного существования жизни и новые методы её поиска. Сами методы становятся более изощрёнными и вместо поиска жизни обращаются к поиску следов жизни, может быть, давно исчезнувшей, а возможно, и не возникавшей.

2. Современные представления о структуре Солнечной системы

Принятое единичное расстояние в Солнечной системе — 1 астрономическая единица (а.е.) — равно расстоянию от Земли до Солнца, 149,6 млн км. Свет преодолевает это расстояние за 8,3 световой минуты. Другие характерные масштабы — это орбитальные расстояния от Солнца до окраинных тел системы, пояса Эдварта–Койпера (или транснептуновых объектов, к которым относится и Плутон), составляющие 5 млрд км, или 5 световых часов. Ещё более далёкая периферия — Облако Оорта, клубок некомпланарных орбит множества кометных тел.

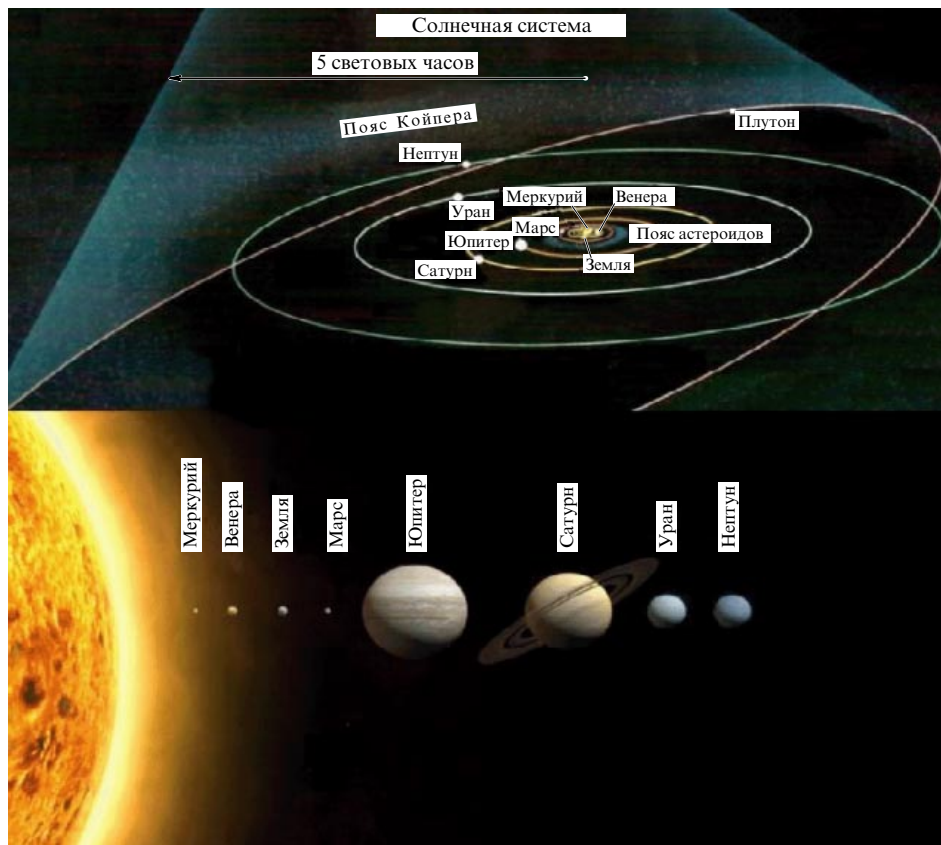


Рис. 1. Солнце, орбиты планет и относительные размеры планет.

Удалённость Облака Оорта составляет примерно 20 тыс. а.е. — около 3000 млрд км или 0,31 светового года.

Вокруг Солнца обращаются восемь планет (рис. 1): четыре планеты группы Земли (Меркурий, Венера, Земля и Марс), две планеты-гиганта (Юпитер и Сатурн) и два так называемых ледяных гиганта (далёкие Уран и Нептун). Орбиты планет почти круговые и компланарные. Вокруг планет, в свою очередь, обращаются спутники, которых сейчас известно уже 166, и их число постоянно возрастает с обнаружением всё более мелких объектов. У каждой из четырёх планет-гигантов имеется система планетных колец.

В интервалах между орбитами Марса и Юпитера обращаются астероиды, пояс "малых тел". По оценкам в этом поясе находится несколько сотен тысяч астероидов с диаметром более 1 км. Более мелкие тела относят к метеороидам.

Пространство между орбитами Юпитера и Нептуна, самой далёкой планеты Солнечной системы, населяет ещё одна группа астероидов, называемая кентаврами. За пределами орбиты Нептуна, примерно на расстоянии 40–50 а.е. от Солнца, располагаются малые тела, так называемые транснептуновые объекты (ТНО), или пояс Эджворта–Койпера. Эта область подобна поясу астероидов, однако намного больше его: в 20 раз по протяжённости и в 20–200 раз по массе. В этой области расположено большое количество малых тел Солнечной системы (реликтов времён образования Солнечной системы), а также, как минимум, три карликовые планеты: Хаумеа, Макемаке и Плутон, который до 2006 г. считался девятой планетой Солнечной системы.

Сфера гравитационного влияния Солнца простирается на расстояние во много тысяч астрономических единиц. На её внешних границах сохранились малые объекты, оставшиеся от формирования Солнечной системы. Можно выделить две такие области. Гораздо дальше, чем пояс Эджворта–Койпера, на расстоянии примерно 20 тыс. а.е. от Солнца, в условиях низких температур, находится Облако Оорта. Здесь расположены афелии кометных орбит. Иногда под действием

различных гравитационных возмущений ТНО покидают эту область и попадают во внутренние области Солнечной системы, где могут достигать орбит Земли и других планет.

Вероятно, совокупная масса вещества в поясе Эджворта–Койпера во много раз превышает массу пояса астероидов, но, как предполагается, уступает массе Облака Оорта.

В отличие от планет, астероидов и кентавров, кометы находятся на очень вытянутых орбитах с большим эксцентриситетом. Два типа кометных орбит, короткопериодические и долгопериодические, соответствуют афелиям комет или в поясе Эджворта–Койпера, или в Облаке Оорта.

Кроме перечисленных типов тел, в Солнечной системе существует целый ряд факторов, которые чрезвычайно важны для понимания её формирования и современного состояния, а именно: пылевая компонента; электромагнитное излучение Солнца во всех диапазонах (от радиодиапазона до жёсткого рентгеновского диапазона); солнечный ветер, представляющий собой потоки заряженных частиц, которые постоянно распространяются от Солнца; наконец, солнечные и галактические космические лучи — высокоэнергичные частицы, которые ускоряются в магнитном поле Солнца или других областей Галактики и достигают Солнечной системы. Космические лучи не являются плазмой (т.е. средой с коллективными свойствами) и подчиняются более простым законам движения отдельных заряженных частиц. Наконец, Солнечная система постоянно пополняется веществом, приходящим из межзвёздной среды, — нейтральными атомами, помимо уже упоминавшихся галактических космических лучей. Все эти факторы взаимодействуют в едином ансамбле, и для полного понимания процессов, которые происходят в окружающем Землю пространстве, их необходимо рассматривать в комплексе.

Плазменное пространство Солнца (иногда его образно называют "империей Солнца") ограничено меньшей областью, называемой гелиосферой (рис. 2), т.е. той областью околосолнечного пространства, в которой

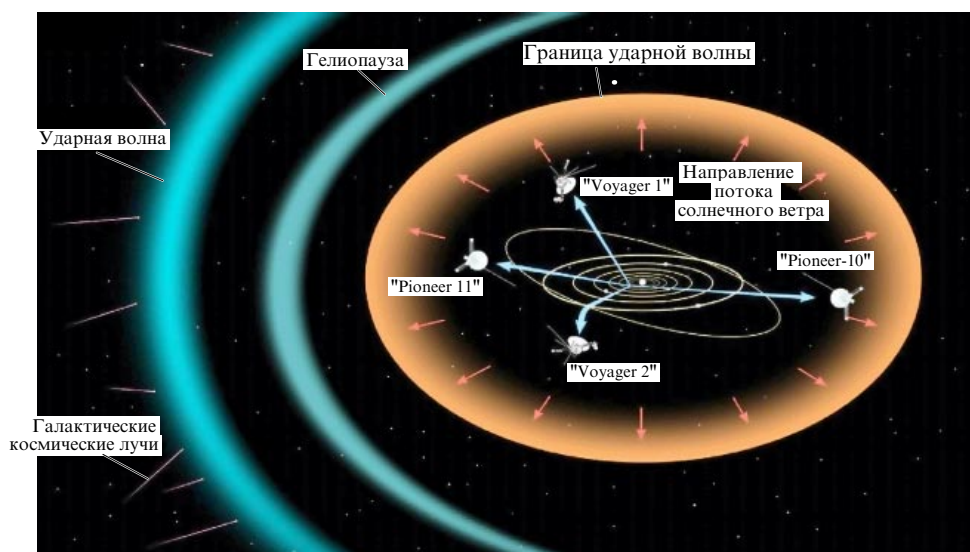


Рис. 2. Плазменная гелиосфера. Показаны траектории космических аппаратов "Voyager-1" и "Voyager-2" и более ранних: "Pioneer-10" и "Pioneer-11".

плазма солнечного ветра со сверхзвуковой скоростью растекается от Солнца. Встречаясь с межзвёздной средой, солнечный ветер сначала тормозится, становится более плотным, горячим и турбулентным. Поверхность, на которой происходит этот переход, соответствует границе ударной волны и находится на расстоянии около 85–95 а.е. от Солнца. Эту границу пересекли американские космические аппараты "Voyager-1" и "Voyager-2", запущенные в 1977 г. ("Voyager-1" пересёк эту границу в декабре 2004 г., а "Voyager-2" — в августе 2007 г.). Пройдя расстояние ещё приблизительно в 40 а.е., солнечный ветер сталкивается с межзвёздным веществом и окончательно останавливается. Эта граница, отделяющая межзвёздную среду от вещества Солнечной системы, называется гелиопаузой. Она определяется балансом динамического давления солнечного ветра и совместного давления межзвёздного газа и межзвёздного магнитного поля. Вследствие движения Солнечной системы относительно межзвёздной среды (со скоростью 20–25 км с⁻¹) гелиосфера не сферична, по форме она напоминает каплю, вытянутую в сторону, противоположную движению Солнца. За внешней границей гелиопаузы, где происходит торможение межзвёздного вещества, набегающего на Солнечную систему, возникает ещё одна бесстолкновительная ударная волна (bow shock).

Таким образом, Солнечная система представляет собой сложный конгломерат твёрдого вещества, нейтрального газа, плазмы, пыли, энергичных заряженных частиц и электромагнитных полей. Неизбежно возникает вопрос: каким образом она сформировалась около 4,5 млрд лет назад? В поиске ответа сегодня могут существенно помочь новые экспериментальные данные, которые были получены после открытия планет у других звёзд. Теория формирования звёзд и планетных дисков была разработана довольно давно, но сейчас, благодаря успехам астрофизики и наблюдательной астрономии, мы начинаем гораздо лучше понимать подробности формирования этой сложной системы, а теория значительно усложняется.

3. Гипотезы происхождения Солнечной системы

Большой вклад в теорию образования звёзд и планетных дисков был сделан О.Ю. Шмидтом и его учениками из Института физики Земли РАН. Основная идея О.Ю. Шмидта, которая опиралась на гипотезу Канта – Лапласа (XVIII в.), заключалась в следующем. Первоначально в протяжённом межзвёздном газопылевом облаке частицы начинают концентрироваться вокруг случайного центра гравитации, образуя протопланетное облако (рис. 3). Это облако начинает вращаться и в условиях сохранения углового момента становится плоским. В таком вращающемся диске происходит фрагментация, зарождаются значительно более мелкие источники конденсации вещества — планетезимали, которые, в свою очередь, сталкиваясь и слипаясь, становятся протопланетами. Затем при множественных столкновениях с окружающим веществом протопланеты образуют планеты, которые возникают в результате столкновений и аккреции вещества из газопылевого диска, окружающего молодую звезду. Массы дисков варьируются от одной тысячной до одной-двух десятых

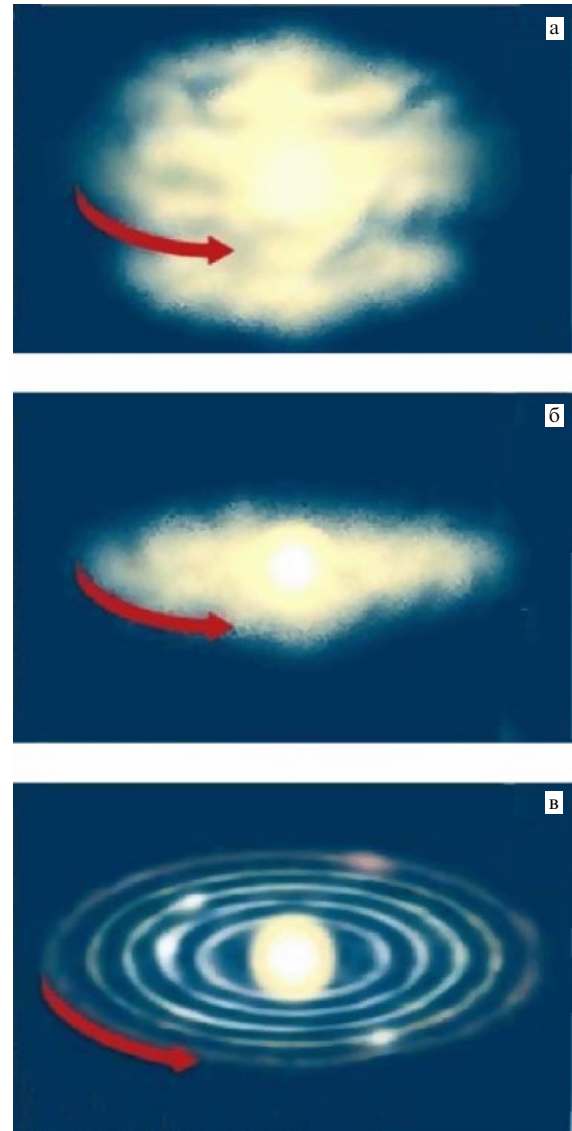


Рис. 3. Три этапа формирования Солнечной системы согласно ранним представлениям аккреционной теории (XX в.). Газопылевое облако вращается и постепенно уплощается (а), превращаясь в тонкий диск (б) вокруг формирующегося в центре Солнца. Образуются кольца (в), из которых затем формируются планеты.

массы звезды, а размеры — от нескольких десятков до нескольких сотен астрономических единиц. Ранее представления о допланетном диске можно было получить лишь на основе данных о нашей собственной планетной системе, планеты которой было принято делить на две группы: планеты земного типа, состоящие из твёрдых каменных пород, и газо-жидкие планеты-гиганты. Было ясно, что диск не мог быть только пылевым и в его составе должны были преобладать водород и гелий, поскольку именно они доминируют на Юпитере и Сатурне, заключающих в себе 92 % массы всей планетной системы и состоящих в основном из водорода и гелия. Все остальные элементы и соединения могли находиться в конденсированной (твёрдой) фазе и входили в состав твёрдых частиц и тел в зависимости от температуры, которая главным образом определялась расстоянием от Солнца.

Классическая теория [1–3] предполагает, что образование планет-гигантов происходит в несколько этапов. В схематичном изложении — это длительная, до 10^8 лет, аккреция пылевых частиц на растущее ядро первой планеты-гиганта с накоплением в нём примерно 10–15 масс Земли [4], а затем более быстрая аккреция на ядро газа, доводящая массу гиганта до окончательной величины. Однако выполненные в последней четверти XX в. наблюдения звёздно-планетных систем в стадии формирования указали на существенную трудность, с которыми сталкивается эта теория. Фактическое время, за которое протопланетный диск теряет газовую составляющую, т.е. 98 % своей массы, оказывается очень коротким, менее 10^7 лет [5–8]. Поэтому материала для формирования планеты не остаётся. Были предприняты многочисленные попытки спасти положение посредством учёта "самоускоряющегося" роста планетезималей и ядра, благодаря чему время формирования последнего сокращается почти до тех же 10^7 лет (см., например, [9]).

С накоплением экспериментальных данных разрабатываемые теории всё более усложнялись. Существует "стандартная" аккреционная модель формирования планет (в которой, к сожалению, сохраняются противоречия, особенно в связи с открытием экзопланет, о чём будет сказано в разделе 4). Но в самых общих чертах схема аккреционной теории подтверждается наблюдениями, в том числе, на космическом телескопе им. Хаббла. Обнаружено около 150 протопланетных дисков, дающих представление о том, как выглядела протосолнечная туманность 5 млрд лет назад (рис. 4). Вместе с тем дальнейшее исследование протопланетных дисков обнаружило серьёзные противоречия с аккреционной теорией.

В конце XX в. была предложена гипотеза гравитационной нестабильности [10, 11], основная идея которой впервые была опубликована ещё в 1951 г. [12]. Согласно этой гипотезе, возникающие в протопланетном диске нестабильности могут вызвать гравитационный кол-

лапс, способный образовать планету всего за 10000–50000 лет. Гипотеза активно разрабатывается, но встречается с трудностями и серьёзной критикой.

Аккреционная теория разработана более детально, но и её радикальная ревизия стала неизбежной, прежде всего в отношении временной шкалы явлений. Проблема заключается в том, что газовая составляющая протопланетных дисков (водород с примесью гелия) довольно быстро диссипирует, сохраняясь в количестве, достаточном для образования планет-гигантов, не более 3 млн лет, а через 10 млн лет газовая составляющая исчезает почти полностью, тогда как аккреционная теория требовала для образования планет около 100 млн лет. Лишь в результате серьёзной ревизии аккреционной теории стало понятным, что именно вода, другие летучие и так называемая "линия льдов", или "линия снега" (о чём будет сказано в разделе 4) относятся к важнейшим факторам формирования будущей планетной системы.

4. Формирование планетных систем согласно теории последовательной аккреции

Открытие в 1995 г. внесолнечной планеты-гиганта 51 Peg b явилось стартом развития новой физики планетных систем. В руках исследователей оказался уникальный экспериментальный материал, который позволил по-новому взглянуть на аккреционные процессы. Чрезвычайно важным фактором для теории аккреции оказалась обнаруженная миграция экзопланетных тел до низких околозвёздных орбит — явление, которого Солнечная система, по-видимому, каким-то образом избежала. Метод лучевых скоростей позволил обнаружить много гигантов с массой, сравнимой с массой Юпитера. Поиск прямых аналогов планет земной группы пока остаётся за пределами технически возможного. Основной признак присутствия планеты — это обнаружение кеплеровской орбитальной знакопеременной составляющей в лучевой скорости звезды. Для Солнца кеплеровская скорость,

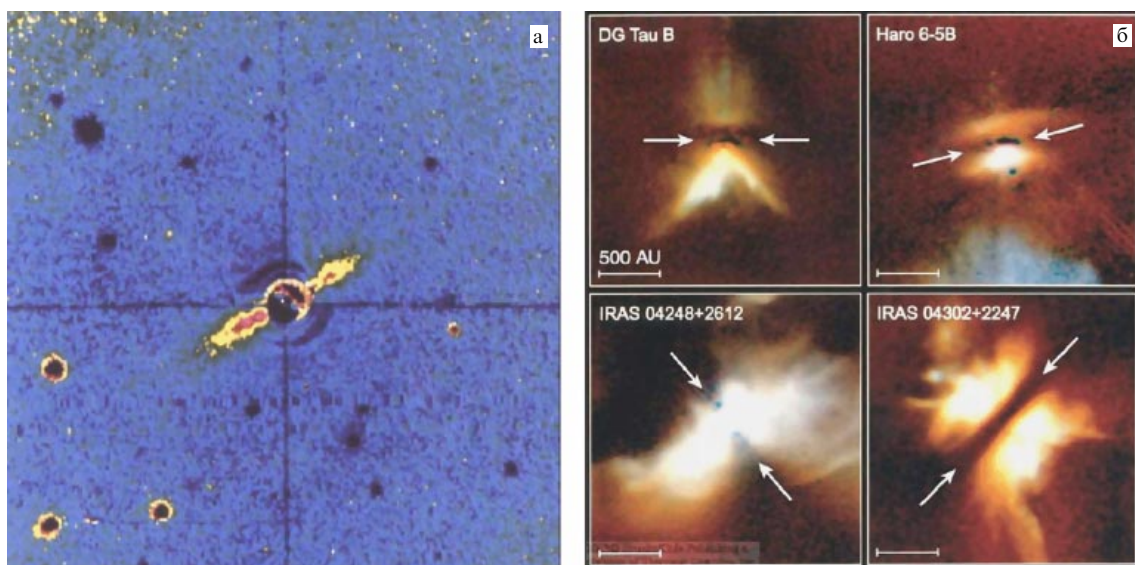


Рис. 4. (а) Формирующаяся планетная система у звезды Beta Pictoris (расстояние 63 световых года) — иллюстрация к "стандартной" модели происхождения планетных систем, согласно которой планеты возникают в результате аккреции материала из газопылевого диска, окружающего молодую звезду. Изображение получено со спутника IRAS (InfraRed Astronomical Satellite). Пылевая составляющая видна в диске, наблюдаемом "с ребра". (б) Примеры пылевых дисков вокруг молодых звёзд типа Т Тельца.

возникающая под действием Земли, составляет всего $0,09 \text{ м с}^{-1}$: это в 20–30 раз за пределами лучших достигнутых результатов измерений. Зато крайне важные результаты получены в наблюдениях гигантов, оказавшихся на неожиданно низких орбитах. Статистические сведения об орбитальных и массовых характеристиках экзопланет стали надёжной основой для проверки создаваемых новых теорий.

Современная, значительно усложненная, аккреционная теория [13–17] обратила более пристальное внимание на определяющую роль последовательности процессов, которая в какой-то мере была известна, но недооценивалась исследователями. Оказалось, что фактически один и тот же процесс отгонки, конденсации и фазовых переходов летучих при его последовательном многократном повторении приводит к совершенно различным результатам, которые составляют чередующиеся этапы формирования планетной системы. В целом, процесс оказался настолько сложным и критичным к окружающим условиям, что его результаты оказываются непредсказуемыми. По-видимому, именно это обстоятельство приводит к тому, что среди 350 обнаруженных к настоящему времени внесолнечных планет трудно найти похожие между собой.

Согласно наиболее развитым современным представлениям процесс, называемый последовательной аккрецией, имеет следующие особенности [17, 18]. Конденсация массивного межзвёздного газопылевого облака может происходить достаточно быстро; за время от 150 тысяч лет до нескольких миллионов лет образуется группа молодых звёзд, вокруг каждой из которых возникает протопланетное облако из остаточного материала, приобретающее благодаря вращению форму диска. Пылевая составляющая облака представляет собой частицы неправильной формы с субмикронными размерами. На пылевую составляющую приходится всего несколько процентов массы облака, остальное вещество, как уже указывалось, — это водород и гелий. Сталкиваясь, частицы иногда объединяются, иногда разрушаются. Под действием усиливающейся радиации молодой звезды начинается стадия испарения летучих из внутренней части диска, воды и включений летучих в силикатных частицах. Но значительная часть диска экранирована пылевой средой от нагрева прямой радиацией. Однако разогретая среда переизлучает поглощённую энергию в инфракрасном диапазоне и доносит её таким образом до затенённых областей внутри облака, разогревая их до высокой температуры. На периферии внутренней зоны температура уже недостаточно высока для испарения летучих. Происходит мощная отгонка летучих (правая часть рис. 5) за линию льдов. Эта линия делит планетную систему на внутреннюю область, почти лишённую летучих веществ и содержащую твёрдые тела, и внешнюю область, богатую летучими веществами и содержащую ледяные тела. На линии льдов происходит конденсация летучих (прежде всего воды), а вне этой границы концентрируются колоссальные массы протопланетного материала.

Судя по изображениям протопланетных дисков, внешние пределы зоны конденсации могут отстоять от звезды на несколько сотен астрономических единиц. Летучие в газовой фазе конденсируются на пылинках, размеры которых постепенно увеличиваются в несколько сотен или тысяч раз. Почти вся масса обращаю-

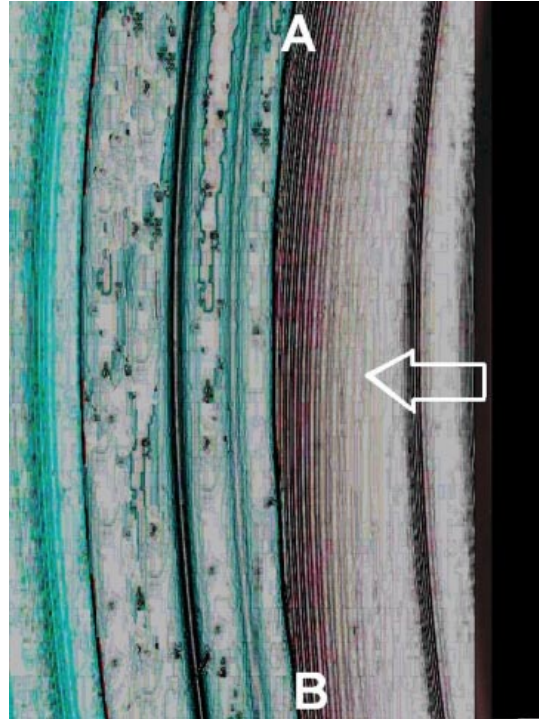


Рис. 5. Отгонка летучих от звезды (правая часть рисунка) за линию льдов АВ. Случайные уплотнения создают короткоживущие кольца, разрывы и волны в газопылевом диске.

щегося вокруг звезды молодого протопланетного облака приходится на газ, плотность которого убывает с увеличением расстояния от звезды. Выделенный объем газа находится под сложным влиянием гравитации звезды и самого облака, давления газовой среды и центробежных сил. В результате орбитальная скорость газа оказывается меньше кеплеровской. В то же время, если скорость твёрдых частиц оказывается меньше кеплеровской, их орбиты начинают понижаться. Именно это и происходит из-за торможения в газовой среде достаточно крупных, размером более 1 мм, частиц. Мигрируя во внутренние относительно линии льдов области, они нагреваются, конденсаты плавятся, частицы становятся липкими и быстро растут, достигая километровых размеров. Таким образом формируются планетезимали, заготовки материала будущих планет. На их образование уходит примерно 1 млн лет. Вначале возрастание массы планетезималей происходит вследствие случайных столкновений. Но чем больше становятся планетезимали, тем более сильной гравитацией они обладают и тем интенсивнее они начинают поглощать своих соседей с небольшой массой [19]. Так возникают тела, которые можно назвать протопланетами. Такие тела обладают сравнительно большими массами и перехватывают оставшиеся планетезимали из узкой полосы вдоль своей орбиты. Когда большая часть планетезималей поглощена, рост протопланеты прекращается.

Одновременно на самой линии льдов происходят другие важные события. Здесь возникает скачок давления испарившейся из внутренних областей газовой фазы, орбитальная скорость газа достигает кеплеровской и превышает её и газ уже не тормозит, а ускоряет частицы. В результате миграция к звезде основной массы частиц в этой области прекращается. Тем не

менее из дальней периферии диска миграция продолжается, и у линии льдов скапливается большая масса материала, ожидающего начала следующей стадии образования планетной системы.

Планетезимали очень многочисленны, счёт идёт на многие сотни миллионов или даже миллиарды; в результате множественных столкновений планетезимали образуют тела, достигающие размеров Луны и больших, захватывающие остающийся материал и подавляющие рост соседей [19]. После того, как масса протопланет достигает нескольких процентов земной массы, их рост ограничивается вследствие гравитационных взаимодействий с другими телами, а часть тел в результате таких взаимодействий вообще выбрасывается из формирующейся системы в межзвёздное пространство. Масса, составляющая до 0,1 массы Земли, на её орбите может быть накоплена за 100 тыс. лет и ограничивается этой величиной, так как в системе уже остаётся мало материала. Чем дальше от звезды, тем медленнее рост протопланет. Для того чтобы достичь четырёх масс Земли, телу на орбите Юпитера потребовалось бы несколько миллионов лет. В непосредственной близости от линии льдов процесс шёл быстрее. Так как протопланетное облако ещё не потеряло тогда основные запасы газа, начался захват газа ядром будущей планеты [20]. Захват чрезвычайно критичен к массе ядра (не менее 10 масс Земли), составу газа, наличию тяжёлых элементов и ряду других факторов. Кандидатов на роль ядра будущей планеты оказывается много, но в качестве ядра они редко выживают. Если такое выживание все-таки произошло и если газа ещё много, то его захват вызывает интенсивное выделение тепла, затрудняющее формирование планеты. Это хорошо известное ограничение при образовании звёзд. Если отвод тепла неэффективен и охлаждение слишком медленное, то газ может быть потерян и планета-гигант не возникнет. Газ медленно накапливается в течение нескольких миллионов лет, но затем другая половина всей газовой массы захватывается всего за 1000 лет.

Существуют ещё несколько факторов, ограничивающих появление планеты-гиганта. Один из них — это миграция [18, 21]. Миграция первого рода возникает при гравитационном взаимодействии формирующейся планеты с рассредоточенной массой окружающей среды. В прилегающих частях диска движение формирующейся планеты вызывает появление волн, как это показано в упрощённом виде на рис. 6, причём в однородной среде их влияние взаимно компенсируется. Но среда неоднородна, и её распределённая масса за орбитой планеты (в левой части рис. 6) значительно превышает массу внутри орбиты (в правой части рис. 6). В результате возникает некоторое торможение планеты, слегка приближающее её орбиту к звезде. За 1 млн лет орбита протопланеты может снизиться на несколько астрономических единиц, опустившись вплоть до внешней границы линии льдов, где миграция останавливается под действием ускоряющего движения газа, поскольку здесь орбитальная скорость газа превышает кеплеровскую. Запутанность всех сопутствующих процессов ещё более усложняется тем, что их временные шкалы примерно совпадают и таким же оказывается характерное время потери диском газовой составляющей.

Формирующаяся планета-гигант черпает материал из зоны своей орбиты, создавая разрыв в диске (рис. 7).

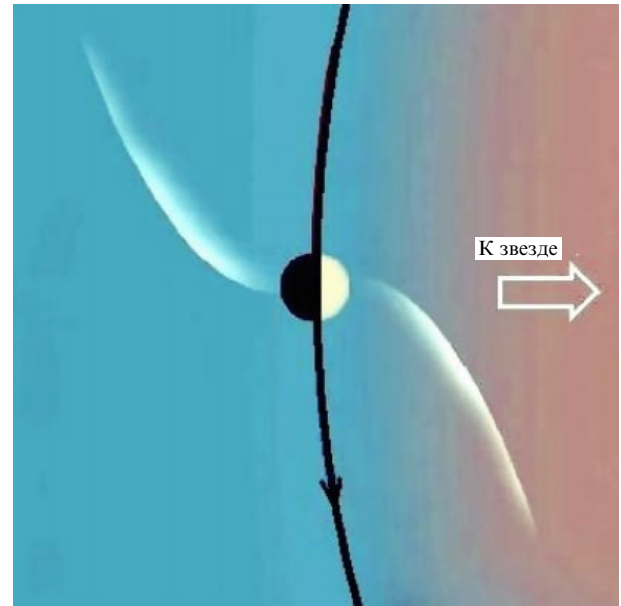


Рис. 6. Возникновение миграции при взаимодействии формирующейся планеты с волнами в окружающей среде.

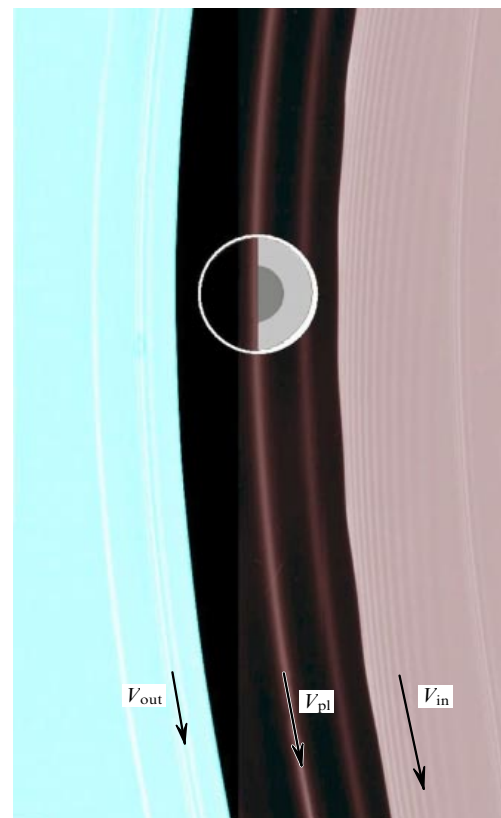


Рис. 7. Механизм ограничения роста планеты-гиганта.

Но начиная с какого-то момента рост планеты-гиганта останавливается (как это происходило и в случае планетезималей). Управляющим механизмом снова оказывается гравитационное взаимодействие планеты с газом в окружающей среде. Однако на этом этапе определяющей становится роль планеты, масса которой уже достигла массы Юпитера (0,001 массы материнской

звезды в случае звезды солнечного типа). Взаимодействие планеты с газом у разрыва внутри орбиты (см. правую часть рис. 7) замедляет обращение газовых масс, а на внешней стороне разрыва их ускоряет. Нетрудно видеть, что в обоих случаях происходит уклонение газа от встречи с планетой и её рост прекращается.

В некоторых случаях возникает более сложное явление — миграция второго рода. В прилегающих областях диска появляются турбулентные зоны, из которых турбулизированный газ всё же может попасть в зону разрыва. Его гравитационное взаимодействие с планетой вызывает очень медленную потерю орбитального момента планеты и также медленное снижение орбиты планеты. Это — предствление о миграции второго рода в самых общих чертах. Многие особенности этого процесса пока остаются не вполне понятными.

Посредством гравитационного взаимодействия сформировавшийся первый гигант очищает зону астероидов первого поколения [22] и значительно ускоряет образование последующих планет-гигантов, если не весь газ ещё потерян. По-видимому, с задержкой в несколько миллионов лет после Юпитера формировался Сатурн, когда газа уже оставалось немного, поэтому его масса в 3,3 раза меньше массы Юпитера. Но если бы отсутствовало влияние последнего, то процесс длился бы ещё дольше и масса Сатурна была бы ещё меньше. Вероятно, в таких условиях формировались Уран и Нептун, хотя не совсем ясно, где это происходило, так как эти планеты скорее всего мигрировали со своих начальных орбит. Образование их затянулось, массы ядер достигли 10–20 масс Земли, а газа оставалось мало и хватило всего на две земные массы в каждом случае. Ясно, что относить Уран и Нептун к группе планет-гигантов не приходится, это особая категория (ледяные гиганты), масса которых недостаточно велика для металлизации водорода и образования из него внешней оболочки ядра. Именно такая оболочка определяет многие свойства Юпитера и Сатурна. В целом, на формирование этих четырёх планет ушло менее 10 млн лет.

Дальнейшие события в зоне гигантов развивались медленнее. Образовавшиеся Уран и Нептун выбрасывали остающиеся планетезимали в зону пояса Эджворта–Койпера и отчасти к Солнцу, а Юпитер отправлял их в Облако Оорта.

Теория последовательной аккреции предполагает, что во внесолнечных планетных системах планеты типа Земли должны быть более распространены, чем планеты-гиганты. Но до обнаружения внесолнечных землеподобных планет теория может опираться лишь на данные о Солнечной системе. Условия формирования четырёх планет земной группы, которые расположены в пространстве внутри линии льдов, и четырёх внешних планет, находящихся за этой линией, сильно различаются. Четыре планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс — сформировались во внутренней части системы в основном из веществ с высокой температурой испарения, таких как железо и силикатные породы. Как уже отмечалось, ближе к Солнцу, где плотность солнечной радиации очень высока (рис. 8а), частицы нагревались и лёд и другие летучие (вещества с низкой температурой кипения) испарялись, образуя почти свободную от пыли прозрачную зону радиусом до 5 а.е., известную по исследованиям протопланетных дисков (рис. 8б).

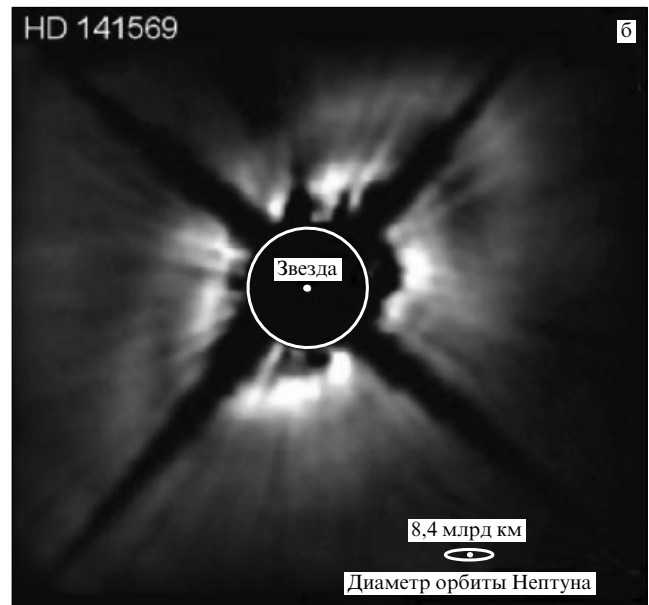
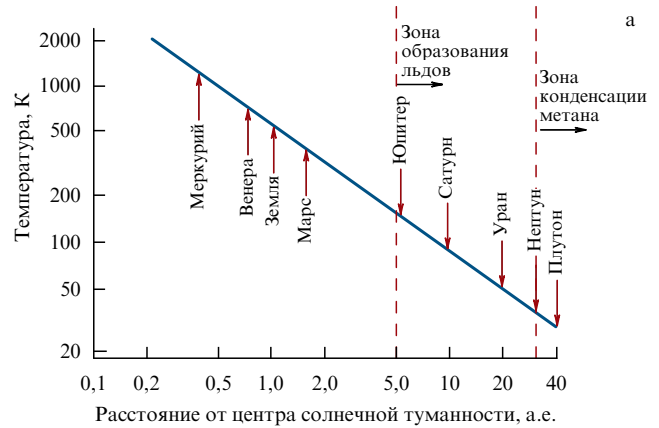


Рис. 8. (а) Зависимость физических условий (температуры) от расстояния до Солнца. Звезда окружена зоной, свободной от летучих, с радиусом 2–4 а.е. Приблизительно на уровне орбиты Юпитера (5 а.е.) находится линия льда — граница, за которой вода (лёд) и другие летучие конденсируются. Вблизи орбиты Нептуна (30 а.е.) расположена другая особая зона — граница конденсации метана. (б) Зона радиусом 2–4 а.е., практически свободная от пыли, типична для протопланетного облака. Звезда HD 141569 — наблюдатели Б. Смит и Дж. Шнайдер, 1999 г. (На снимке зона, свободная от летучих, закрыта чёрным кружком, как и сама звезда.)

В обеднённой зоне внутри линии льдов масса протопланет могла дорасти лишь до 0,1 земной массы, т.е. могла лишь ненамного превысить массу Меркурия. Протопланеты, для того чтобы их масса продолжала расти далее, должны были перейти на вытянутые (некруговые) пересекающиеся орбиты, допускающие столкновения. Такими их орбиты могли стать под возмущающим действием планеты-гиганта [22]. Следовательно, образование первой планеты-гиганта в первые 2–3 млн лет предшествовало этим процессам. Тогда, если орбиты компланарны и не связаны резонансными соотношениями, столкновение и объединение таких тел — это только вопрос времени. По некоторым оценкам теории последовательной аккреции вскоре после возникновения Юпитера образовались пояс астероидов (в первые 4 млн лет), Марс (10 млн лет), затем Земля (30–

50 млн лет). Гораздо труднее объяснить постепенную циркуляризацию орбит, произошедшую вслед за формированием планет. Орбиты планет земного типа со времени их возникновения существенно не изменялись, планеты не мигрировали. В формировании их орбит могли сыграть роль оставшиеся планетезимали и остаточный газ.

Планеты могут рассматриваться как конечная стадия процесса аккреции вещества, окружающего ядро протосолнечной туманности. Изредка случающиеся сейчас столкновения планет с малыми телами, такие как столкновение кометы Шумейкеров–Леви с Юпитером в 1994 г., можно рассматривать как затухающее эхо мощнейших столкновительных процессов, происходивших на ранней стадии формирования Солнечной системы. Наиболее тяжёлую "метеоритную бомбардировку" планеты пережили в первые эпохи существования Солнечной системы, особенно в период 3,9–3,8 млрд лет назад, когда наблюдался пик такой бомбардировки.

Космические исследования позволяют нам даже сейчас наблюдать подобные процессы. Утверждается, что американский космический телескоп "Spitzer", запущенный НАСА в 2003 г., зафиксировал возможное столкновение двух планет около звезды, занесённой в каталоги под обозначением HD 172555 и расположенной на расстоянии примерно 100 световых лет от Солнечной системы. Система HD 172555 находится на сравнительно ранней стадии формирования планет и при своём возрасте около 12 млн лет выглядит совсем юной на фоне Солнечной системы, которой уже порядка 4,5 млрд лет. Компьютерное моделирование показало, что меньшее из двух столкнувшихся космических тел, которое, видимо, было размером с нашу Луну, полностью разрушилось, а второе, напоминавшее по размерам Меркурий, — цело, хотя и сильно пострадало.

После того, как первые протопланеты в зонах планет земной группы сформировались, остатки вещества протопланетного облака постепенно удалялись из внутренних областей Солнечной системы в процессе рассеяния за счёт гравитационного взаимодействия с уже существовавшей планетой-гигантом либо под действием давления солнечного излучения, либо благодаря эффекту Пойнтинга–Робертсона, либо были поглощены протопланетами в столкновениях. В результате эффекта Пойнтинга–Робертсона (потеря орбитального углового момента частицы при движении по орбите вокруг другого тела, являющегося источником электромагнитного излучения) пылевые частицы в Солнечной системе медленно мигрируют по спирали в сторону Солнца.

Планеты-гиганты Юпитер и Сатурн кардинально отличаются от внутренних планет. Поведение вещества в недрах этих планет при условиях чрезвычайно высоких давлений и температур резко отличается от того, которое известно в умеренных условиях Земли, хотя и подчиняется тем же физическим законам. Первый спускаемый аппарат уже работал в атмосфере Юпитера и обнаружил немало противоречий с имевшимися представлениями об этой газо-жидкой планете. Юпитер и Сатурн оказались незаменимыми моделями и в другом отношении — в исследовании планет, открытых у других звёзд. Например, многополосная структура магнитного поля, которая должна наблюдаться у экзопланет-гигантов, присуща также Юпитеру и Сатурну и связана с уровнем металлизации водорода (рис. 9). Вместе с тем

массы ледяных гигантов, планет-океанов Урана и Нептуна, недостаточно велики для перехода водорода в металлическое состояние, но признаки мультипольности имеются, хотя они могут быть связаны с конечной проводимостью вещества недр планет. По оценкам именно ледяные гиганты могут составлять большинство экзопланет, но обнаружить их труднее, чем планеты типа "горячего Юпитера".

Для планеты-гиганта фазовый переход водорода в металлическое состояние происходит при давлении около 1,4 Мбар [23], что у Юпитера соответствует примерно 0,8 его радиуса R_J (см. рис. 9). Освобождающиеся электроны проводимости поддерживают электрические токи. Поэтому внесолнечные планеты подобного состава неизбежно должны иметь сильные магнитные поля с моментами высших порядков (квадрупольные, октупольные), подобные полям Юпитера и Сатурна. В принципе можно предложить несколько вариантов эксперимента, в которых это их свойство можно было бы использовать как дополнительный признак для детектирования экзопланет (например, зеемановское расщепление спектральных линий, изменение типа поляризации с плоской на круговую).

Юпитер, с массой 318 масс Земли, состоит главным образом из водорода (в атмосфере 71 % по массе) и гелия (25 % по массе). Масса небольшого и очень плотного ядра Юпитера принимается в большинстве моделей от 5 до 10 масс Земли (рис. 10). Давление в центре планеты очень велико, оно достигает 70 Мбар. Но и выше, на уровне 0,8 радиуса планеты, давление настолько велико, что является достаточным для перехода водорода в металлическую фазу.

Масса Сатурна значительно меньше — 95 масс Земли. Сатурн — это, в основном, водородный газовый шар с примесью гелия. Металлическая фаза водорода возникает на уровне примерно 0,6 радиуса планеты. Составы и строение Урана и Нептуна достаточно близки: в основном ядро из "льдов", глобальный океан и сравнительно тонкая газовая оболочка. Массы Урана и Нептуна соответственно составляют 14,5 и 17,2 масс Земли.

Все внешние планеты обладают многочисленными спутниками. Среди них выделяются размерами, массой и многочисленными особенностями галилеевы спутники Юпитера: Ио, Европа, Ганимед и Каллисто (рис. 11).

5. Солнечная система как исследовательский полигон

Наряду с экспериментальными результатами, обеспечившими прогресс в теории происхождения планет, важные результаты даёт исследование вещества тел Солнечной системы. В эволюции протопланетного облака ключевую роль играли тяжёлые элементы. Их не так много — протопланетное облако на 98 % состоит из водорода и гелия. Но оставшиеся 2 % включают в себя более тяжёлые элементы, родившиеся в термоядерных реакциях в звёздах более старых, чем Солнце, а также небольшую фракцию межзвёздной пыли, которая также содержит тяжёлые элементы. Эта пыль отчасти сохранилась до наших дней (рис. 12), и её сейчас также изучают космическими средствами. В частности, в 1999–2006 гг. был проведён специальный эксперимент "Stardust" (НАСА), в рамках которого была предпринята попытка собрать частицы межпланетной пыли и доставить их на

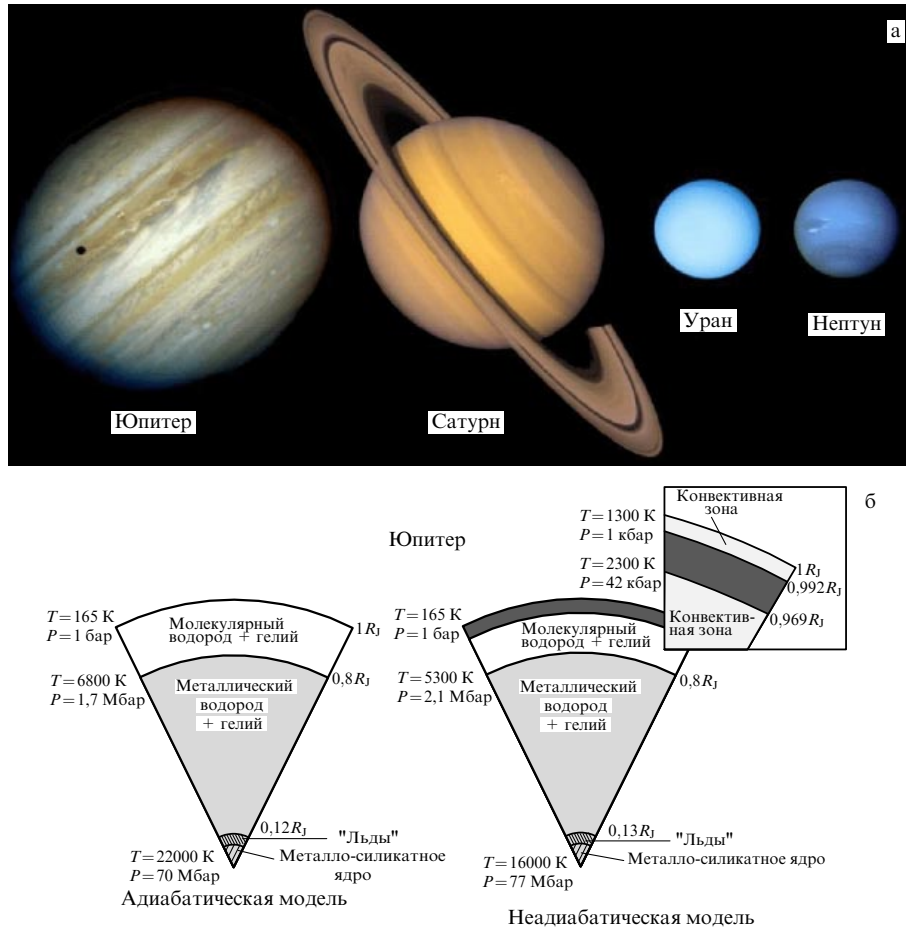


Рис. 9. (а) Планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн и ледяные гиганты Уран и Нептун. (б) Две теоретические модели строения Юпитера (Гило и др., 1995 г.).

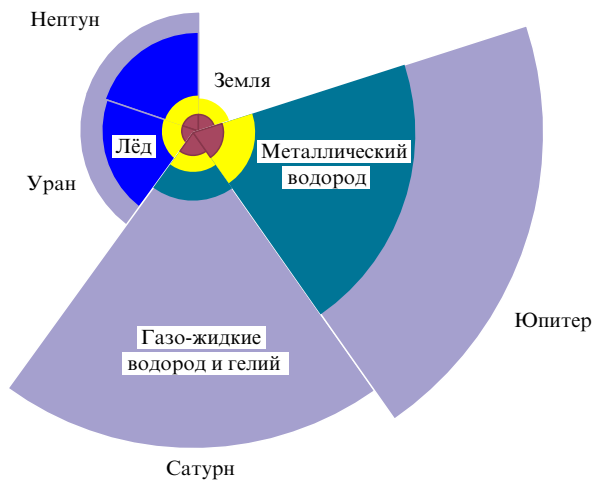


Рис. 10. Структура и относительные масштабы внутреннего устройства планет-гигантов. Для сравнения приведена схема Земли.

Землю. К сожалению, капсулы с образцами неудачно приземлились и были повреждены при ударе о Землю, поэтому эксперимент пока дал мало результатов. Есть ещё одна возможность изучать частицы первородного вещества. Часть их находится в метеоритах. Некоторые метеориты (хондриты) включают в себя так называемые

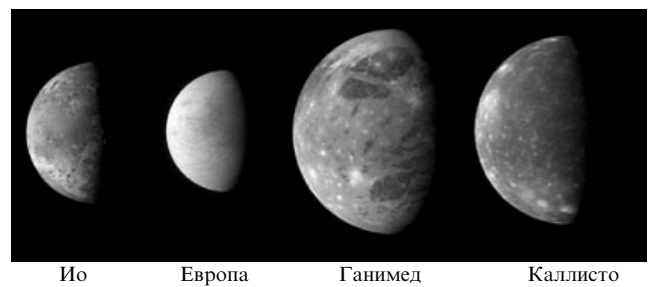


Рис. 11. Галилеевы спутники Юпитера (снимки сделаны с аппарата "New Horizon").

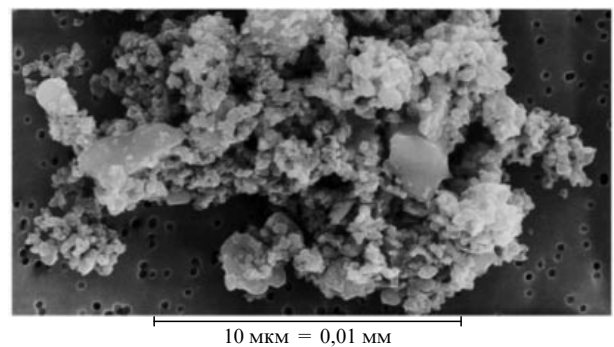


Рис. 12. Частицы межпланетной пыли, имеющие микронные размеры.

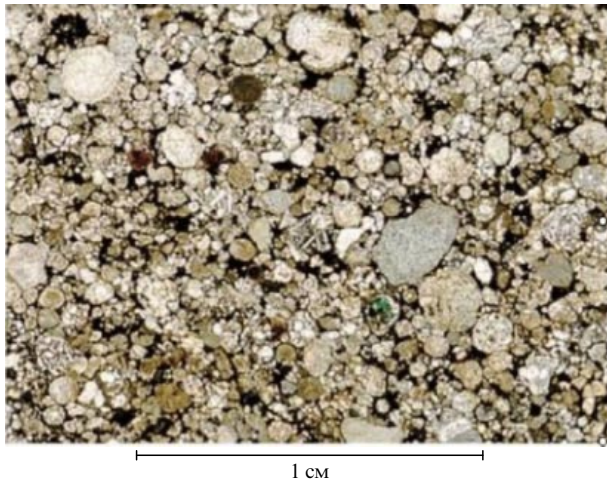


Рис. 13. Хондриты — наиболее распространённый тип метеоритов. Хондры, зёрна миллиметровых размеров, частично образованы из сплавленных частиц пыли, разогретых во внутренних областях солнечной туманности.

хондры (рис. 13) — зёрна более древние, чем сама Солнечная система или её ровесники. Хондриты никогда не подвергались плавлению, но они могут содержать зёрна, которые когда-то были расплавлены в первичном газопылевом облаке, разогретом до нескольких тысяч градусов.

Планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс — состоят из тяжёлых элементов. Их первичные атмосферы, включавшие в себя как водород и гелий, так и летучие вещества, были "выметены" солнечным ветром молодого Солнца из внутренних областей Солнечной системы. Структура и внутреннее строение планет земной группы, в общем, схожи — это металлическое ядро, которое окружает мантия, — хотя в деталях их строение сильно различается (рис. 14). Земля часто рассматривается как двойная планета, так как соотношения размеров Луны и Земли (1:4) и масс (1:81) слишком велики и не повторяются нигде на других планетах Солнечной системы.

В отличие от Земли Луна почти не имеет металлического ядра. Основной её состав напоминает земное мантийное вещество, доля тяжёлых элементов в котором гораздо ниже. Это обстоятельство служит ключом к пониманию того, как появилась Луна. Существуют две

основные модели. Согласно первой, считавшейся почти "классической", Земля и Луна формировались одновременно во внутренней части протопланетного диска. Но эта модель вызывает много вопросов. Три главных противоречия: состав этих тел существенно различается, модель не может объяснить происхождение момента системы Земля–Луна и обосновать малые размеры ядра Луны (около 150 км). Вторая модель, которая устраняет эти три противоречия и подтверждается данными о структуре этих тел, — это возникновение Луны при ударе гигантского небесного тела, примерно с массой и размерами Марса, которое сорвало с Земли верхнюю оболочку. Именно поэтому Луна обеднена более тяжёлыми элементами, а её структура напоминает структуру промежуточной оболочки Земли. Предложенная около 50 лет назад ударная гипотеза происхождения Луны прошла путь от полного неприятия до появления о ней статей в энциклопедиях.

Условия на Марсе, в отличие от условий на других планетах, наиболее похожи на земные, но его атмосфера сильно разрежена и на поверхности нет жидкой воды. В наше время средняя температура на этой планете составляет примерно -60°C . Лишь в экваториальных районах в летний полдень температура тонкого верхнего слоя грунта может стать положительной. Процесс похолодания на Марсе был длительным и растянулся на многие сотни миллионов лет. Часто отмечается, что жидкая вода на Марсе отсутствует не только из-за низких средних температур, но и по причине низкого атмосферного давления. Хорошо известно, что в горах вода кипит при более низкой температуре, чем на равнине. Можно представить себе такую высокую земную вершину, на которой вода будет кипеть при температуре 0°C . Это примерно и соответствует условиям марсианской атмосферы. На долю водяного пара приходится ничтожная доля атмосферного давления Марса, около 1/10000. Сама величина атмосферного давления в 6,1 мбар, условно принятая для "средней" поверхности планеты, соответствует той тройной точке состояния воды, в которой лёд, вода и водяной пар сходятся вместе (рис. 15). Реальные значения давления атмосферы у поверхности Марса, с его большими перепадами высот, лежат в широких пределах. Давление составляет всего 0,6 мбар на вершинах гигантских древних вулканов области Фарсида, имеющих высоту до 24 км, 9 мбар в глубоких (до 4 км) частях каньона Кондор (долины Маринера) и 10 мбар на дне глубокой впадины Эллада.

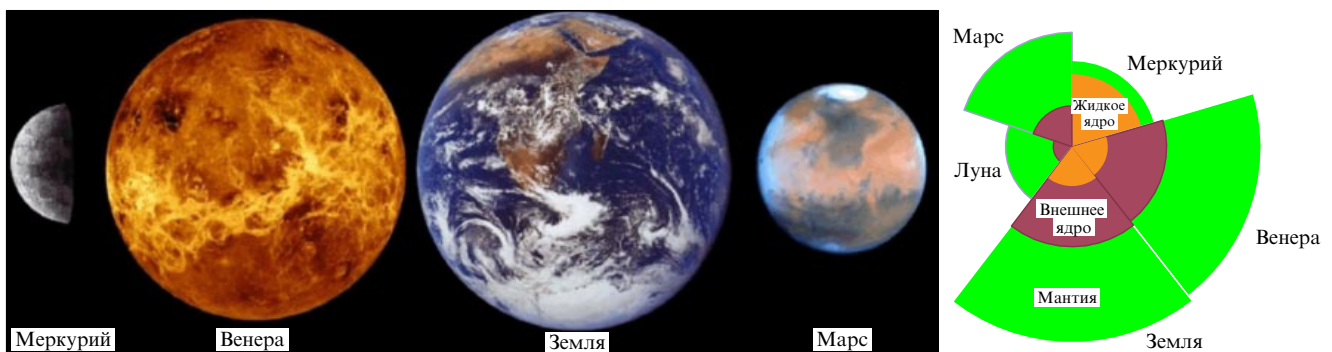


Рис. 14. (а) Планеты земной группы: Меркурий, Венера (облачный слой не показан), Земля и Марс. (б) Относительные масштабы и строение недр планет земной группы.

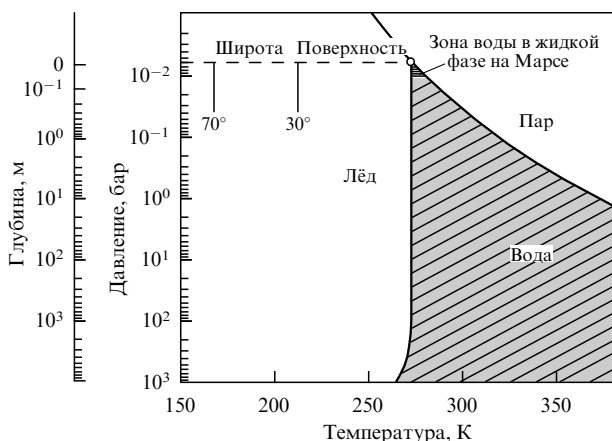


Рис. 15. Вода существует на Марсе в основном в виде льда, однако предполагается, что при определённых условиях на планете можно обнаружить и жидкую воду, по крайней мере, вблизи экватора.

Там открытая водная поверхность могла бы сохраняться до тех пор, пока вода не замёрзнет. Вода вполне может какое-то время присутствовать в жидком виде в некоторых областях на поверхности Марса. На это указывают новые снимки Марса. Другое дело, что запасы воды на Марсе весьма ограничены.

Рисунок 16 иллюстрирует перемещение по склону больших масс грунта, вероятно песка, пыли и камней, происходящее в современную эпоху. В нижней части снимка видны размывы валы осыпавшегося материала. Ширина участка на снимке около 3 км. Такие же осыпи можно видеть и в других областях Марса; они известны со времен миссии "Viking". Но на рис. 16 можно видеть не только осыпи, но и необычные образования.



Рис. 16. Овраги на склонах кратеров Марса образованы, вероятнее всего, потоками жидкой воды.

Это тонкие нитевидные километровые овраги или борозды, спускающиеся по склону. Их ширина в узкой части составляет всего несколько десятков или единиц метров. Овраги очень похожи на промоины земных горных рек или ручьёв, но в отличие от земных оврагов, они не расширяются, а сужаются вниз по склону. Среда, которая их создавала, либо каким-то образом исчезла на полпути, либо чем-то тормозилась при своём движении. Потоки в земных горных реках обычно расширяются вниз по склону.

Сужающиеся марсианские овраги не могли возникнуть под действием камнепада или крупномасштабного селя. Тем более они не могли образоваться под действием пылевых оползней, которые бесследно засыпают все овраги. Именно жидкие потоки (воды или какой-то другой жидкости) легко могли бы образовать такие странные сужающиеся книзу промоины. Для Марса можно предложить простое объяснение этого парадокса — низкие температуры. Если грунтовая вода действительно образовала ключ (источник), а поток вышел на поверхность и устремился вниз по морозному склону, то в условиях Марса размеры развивающейся промоины будут зависеть, прежде всего, от температуры поверхности и температуры самого потока. Если температура поверхностного слоя днём составляет, в зависимости от широты на Марсе, от -60°C до -10°C или ниже, то поток, спускаясь по склону, должен постепенно впитываться в сухой морозный грунт и одновременно замораживать. Поэтому в отличие от земных склоновых рек потоки на Марсе сужаются, спускаясь по склону. При переходе воды с температурой 0°C в фазу льда выделяется 80 ккал кг^{-1} . Теплоёмкость марсианского грунта невелика, поэтому промёрзшее ложе потока может получиться достаточно толстым, если ключ существует достаточно долго. Как ведёт себя грунт Марса при увлажнении и сколько при этом поглощается тепла, точно не известно, но баланс отдаваемого тепла должен включать в себя потери тепла в образующемся ледяном ложе канала, а также более медленные излучение и отдачу тепла в атмосферу.

Исследования последних лет, выполненные с помощью детектора нейтронов высоких энергий ХЕНД (от аббревиатуры HEND — High Energy Neutron Detector), созданного в Институте космических исследований РАН и установленного на борту американского космического аппарата "2001 Mars Odyssey", на орбите вокруг Марса, позволили впервые получить данные о распространённости подповерхностной (глубина менее 1 м) воды на Марсе [24, 25]. На рисунке 17 представлена карта распространённости "вечной мерзлоты" на этой планете с очень высоким содержанием водяного льда, полученная по результатам этого эксперимента.

Ещё философы античности в своих догадках об устройстве Вселенной пытались судить о возможности обитания живых существ на других мирах. Обитаемость планет считалась почти очевидной, а великий Исаак Ньютон допускал, что обитаемо даже Солнце. Пожалуй, нет идеи, более популярной, чем поиск жизни в других мирах. В этом отношении Марс — конечно, самая "популярная" планета Солнечной системы, а открытие водяного льда и даже жидкой воды на Марсе, разумеется, подогревает интерес к этой вечной проблеме.

В ряду планет земной группы многими особенностями выделяется Меркурий. У него непропорцио-

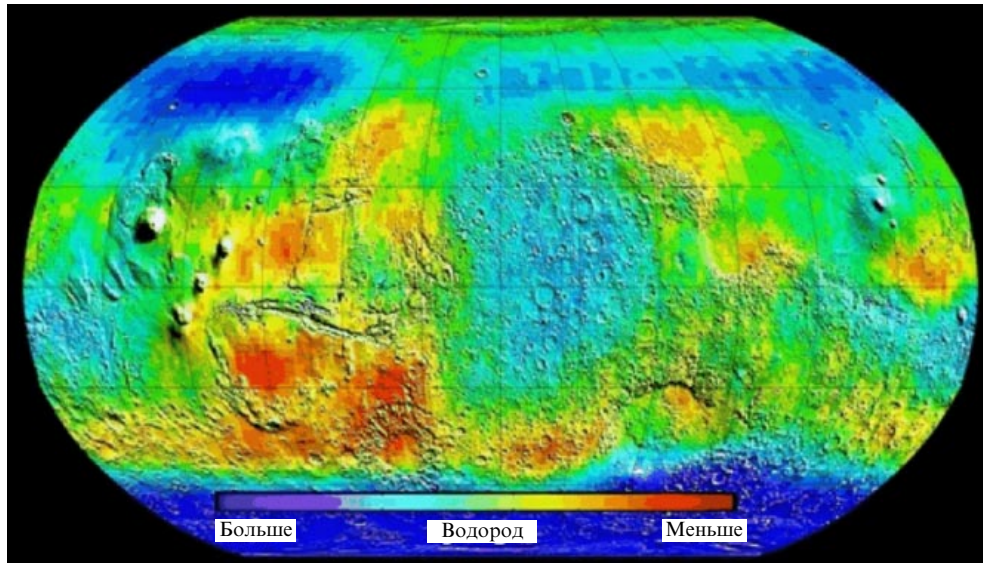


Рис. 17. Районы "вечной мерзлоты" на высоких широтах Марса с содержанием свободного водяного льда около 35 % по массе, а также области с высоким содержанием химически связанной воды — около 5–10 % по массе (см. электронную версию рисунка на www.ufn.ru). (По данным российского детектора нейтронов высоких энергий ХЕНД, созданного в Институте космических исследований РАН, установленного на американском спутнике Марса "2001 Марс-Одиссей".)

нально большое металлическое ядро, очень высокая средняя плотность и неожиданно сильное магнитное поле. На Марсе есть только следы магнитного поля; на Венере сколько-нибудь заметные магнитные поля отсутствуют. Земля, к счастью для человека, обладает достаточно сильным магнитным полем, время от времени меняющим своё направление. Отсутствие магнитного поля на Марсе не вполне понятно; отсутствие поля на Венере связано, вероятнее всего, с её медленным вращением. Но вот происхождение и наличие относительно сильного магнитного поля у медленно вращающегося Меркурия — это задача, которую ещё предстоит решить. Магнитное поле планеты обычно связывают с жидким состоянием её ядра. Но результаты всех расчётов указывают на то, что ядро Меркурия должно было застыть в то время, когда возраст планеты достиг примерно 1,5 млрд лет. Существуют интересные идеи для разрешения этого парадокса.

Для понимания эволюции Венеры — планеты, наиболее похожей по размерам и составу на Землю, важнейшую роль играет история её атмосферы и летучих веществ: как они возникли, как взаимодействовали с её твёрдым телом и как терялись. Как произошло, что две такие похожие планеты настолько разительно разошлись в своих современных свойствах? Где в их истории находилась точка бифуркации?

"Базовая" схема атмосферы Венеры была построена на основе результатов, полученных советскими космическими аппаратами в 1970–1980-е годы (рис. 18). Её основные детали: огромное атмосферное давление, примерно в сто раз превышающее давление у поверхности Земли, и очень высокая температура у поверхности — около 750 К. Главный компонент атмосферы — углекислый газ с примесью азота и следами кислорода и воды. На высоте 49–70 км находятся облака из концентрированной серной кислоты, которые полностью закрывают поверхность Венеры. Интересно, что отношение содержания дейтерия к водороду в атмосфере Венеры в 150 раз

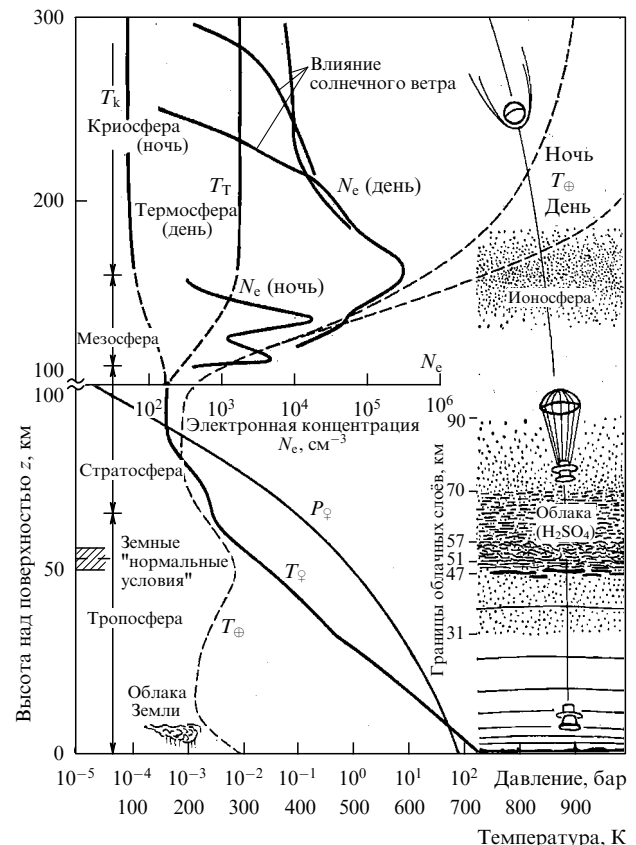


Рис. 18. Строение атмосферы Венеры. Модель атмосферы построена на основе данных ранних советских и американских миссий к планете. Для сравнения показаны свойства атмосферы Земли (кривые, соответствующие индексу "крестик в кружке" — ⊕).

выше, чем значение того же соотношения в океанах Земли. Вероятно, это свидетельствует о происходивших в прошлом процессах, при которых планета катастрофически теряла лёгкий водород, лишаясь тем самым

возможных океанов. Физические условия на планете определяются сильнейшим парниковым эффектом, который повышает температуру вблизи поверхности почти на 500°C . Парниковый эффект создаётся атмосферой планеты. Когда-то предполагалось, что на Венере вследствие её очень плотной атмосферы может царить вечная ночь. На самом деле атмосфера Венеры, состоящая из углекислого газа с примесями водяного пара, сильно поглощает фиолетовые, синие и даже голубые лучи, но в целом является достаточно прозрачной в интервале от длин волн зелёных лучей до ближнего инфракрасного диапазона (до $2,5\ \mu\text{м}$). Солнечные лучи достаточно легко проникают сквозь атмосферу, достигают тёмной поверхности и поглощаются ею и атмосферой. При этом поверхность и прилегающие к ней плотные слои атмосферы нагреваются и излучают поглощённую энергию, но уже в другом, инфракрасном, диапазоне. Однако в этом диапазоне атмосфера Венеры почти непрозрачна и действует как тёплое "одеяло". Для того чтобы равновесие восстановилось и достаточно большая доля энергии могла прорваться сквозь "одеяло" и уйти в космос, яркость инфракрасного источника должна быть очень высокой, с максимумом излучения на длине волны $4\text{--}6\ \mu\text{м}$, иными словами температура источника должна очень сильно повыситься. Это и есть парниковый эффект. Заметим, что парниковый эффект, хотя и не такой значительный, присутствует и в земной атмосфере. Отношение средней температуры поверхности Земли к её эффективной температуре составляет $1,15$. За счёт этого атмосфера совершенно "бесплатно" повышает температуру поверхности Земли на 36°C . На Венере это отношение достигает $3,22$, что соответствует различию коэффициентов поглощения для солнечной и планетарной радиации примерно в 160 раз.

Для того чтобы понять, как это различие возникло, представим простую диаграмму зависимости давления водяного пара от температуры поверхности и место на ней Венеры, Земли и Марса (рис. 19). Развитие этих трёх планет земной группы пошло по трём различным сценариям. На Венере под действием очень сильного парникового эффекта вода испарилась в атмосферу и температура начала катастрофически возрастать. Несмотря на потери

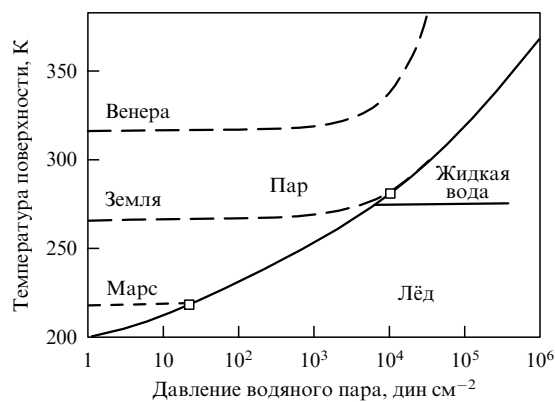


Рис. 19. Простейшая модель ранней эволюции планетных атмосфер: постепенная дегазация с накоплением воды. На Венере температура катастрофически возрастает, вода остаётся в атмосфере и постепенно теряется с потерями водорода. На Земле часть воды конденсируется и образует океаны. На Марсе температура очень низка, поэтому вода существует в основном в виде льда и вечной мерзлоты.

воды парниковый эффект усиливался за счёт выделения углекислого газа. Земля пошла по самому благоприятному пути развития: на ней образовались океаны. Тогда как на Марсе вода замёрзла: сегодня на нём вода существует в основном в виде льда и вечной мерзлоты, хотя, как мы уже говорили выше, последние данные свидетельствуют о том, что на Марсе в приэкваториальной области даже сейчас имеется вероятность найти не только водяной лёд, но и жидкую подповерхностную воду.

Как уже отмечалось в разделе 4, после формирования Юпитера, на орбите, находящейся вблизи линии льда, происходило накопление планетезималей и протопланетных тел. Из части этого материала образовался новый пояс астероидов, вместо первичного, уничтоженного в период роста Юпитера. В результате сейчас между Марсом и Юпитером находится пояс астероидов, малых тел, которые образованы из материала, оставшегося от ранней Солнечной системы, и масса которых составляет всего $0,001$ от массы Земли. Аккреция планетезималей привела к появлению сначала "планет-эмбрионов", протопланет, а затем современных нам планет и позволила создать планетную систему вокруг центральной звезды — Солнца. Но остатки вещества, послужившего основой для образования планет, в первичном виде тоже сохранились в Солнечной системе — в астероидах и кометах, где они не были переработаны в ходе эндогенных процессов. Поэтому для понимания истории Солнечной системы чрезвычайно важно исследовать химический и минералогический состав этих веществ, в том числе, проводя исследования комет, астероидов и других малых тел прямыми контактными методами в космосе.

Кометы играли очень важную роль в происхождении атмосферы Земли. На начальных этапах формирования наша планета была слишком горяча и потеряла значительную часть летучих, включая воду. И только постепенно, в результате взаимодействия с кометами и планетезималиями с высоким содержанием льда, которые попадали на Землю или входили в её состав, она вновь обрела атмосферу и океан. По некоторым оценкам общая масса летучих, попавших на Землю из зоны питания планет-гигантов, в которой воды было много, составила 2×10^{24} г (масса земных океанов примерно $1,45 \times 10^{24}$ г). Значительная часть воды, которую мы потребляем и благодаря которой развилась жизнь на Земле, была принесена с окраин Солнечной системы.

6. Исследования Солнечной системы и их основные научные задачи

Пятьдесят лет космических исследований кардинальным образом обогатили наши представления о планетах, их спутниках и малых телах Солнечной системы. В первые два-три десятилетия этого периода были осуществлены пионерские экспедиции ко многим планетам, спутникам планет, некоторым астероидам, комете Галлея. Результаты этих экспедиций дали богатый экспериментальный материал, который позволил определить разнообразие условий на планетах, их спутниках, уточнить внутреннее строение планет, модели их происхождения из газопылевого облака и лучше понять образование и эволюцию Солнечной системы. Тем не менее в космогонии (науке о происхождении и эволюции Солнечной системы) есть ещё множество белых пятен, устранение которых необ-

ходимо для понимания деталей эволюционного процесса, приведшего к уникальной и чрезвычайно гармоничной системе небесных тел, различающихся по размерам, внутреннему строению и условиям на поверхности. Среди наиболее актуальных и интересных проблем, стоящих перед современной планетной наукой, — исследование первородного вещества, из которого были созданы тела Солнечной системы. Образцы такого вещества сохранились, как указывалось выше, в малых телах: астероидах, кометах и пылевой компоненте. Другой, пожалуй наиболее интригующей, проблемой является поиск внеземной жизни либо её следов. Сейчас внимание исследователей направлено на те объекты, на которых имеются условия, необходимые для существования жизни (по крайней мере, в пределах наших сегодняшних представлений), и, прежде всего, — воду.

Для решения этих проблем космические агентства разрабатывают долгосрочные комплексные программы космических исследований. Очень печально, но за два последних десятилетия наша страна не реализовала ни одного межпланетного проекта, хотя в этот период времени российские учёные участвовали в американских и европейских программах космических исследований. В 2006 г. была принята Российская программа научных космических исследований, предложенная Советом РАН по космосу. Реализация этой программы осуществляется Федеральным космическим агентством совместно с предприятиями космической промышленности и институтами РАН. Федеральная космическая программа включает в себя комплексные исследования системы Марса — самого Марса, его спутников, околомарсианского пространства, а также исследования Луны, Венеры, Меркурия. Кроме того, впервые рассматривается возможность реализации проекта полёта космического аппарата к спутнику Юпитера — Европе. Этот проект может стать частью международного проекта полётов к спутникам Юпитера, осуществляемого Российским, Американским, Европейским и Японским космическими агентствами.

Ниже рассмотрены некоторые основные проекты, разрабатываемые Российским и зарубежными космическими агентствами на ближайшие годы и на перспективу.

Марс и его спутники. Марс, планета земной группы, всегда интересовала исследователей, прежде всего потому, что условия на Марсе, в отличие от условий на других планетах, наиболее похожи на земные. Однако атмосфера Марса сильно разрежена и на его поверхности практически нет жидкой воды. Почему условия на Марсе стали так отличаться от земных и не пойдёт ли Земля в своей эволюции по пути Марса? И наконец, принципиально важный вопрос: если жизни на Марсе нет, то почему она там не возникла? Эти и другие проблемы выдвинули Марс как объект, пожалуй, наиболее детальных исследований космическими методами. Сейчас на поверхности Марса работают три космических аппарата НАСА, а с орбиты Марс изучает европейский спутник "Mars Express" (на двух из этих аппаратов установлены российские приборы), недавно запущен ещё один спутник — американский аппарат "Mars Reconnaissance Orbiter".

Но, несмотря на интенсивные исследования, для Марса остаются нерешёнными многие принципиальные проблемы, из которых наиболее важны две, уже отмечавшиеся: обилие и роль жидкой воды на раннем Марсе и вопрос о возможной или существовавшей когда-то

жизни на этой планете. Решение второй проблемы, скорее всего, потребует доставки образцов грунта планеты на Землю.

Спутники Марса — Фобос и Деймос — два малых объекта Солнечной системы, которые находятся относительно близко к Земле, вызывают большой интерес. До сих пор остаётся загадкой их происхождение: являются ли они захваченными астероидами или представляют собой остатки протовещества Марса? Кроме этого, в материале их поверхности (реголите) могут присутствовать обломки пород Марса, выброшенные при столкновении астероидов с самой планетой.

Интерес к спутникам Марса возник ещё в начале 1970-х годов, когда американский аппарат "Mariner-9" впервые получил снимки поверхности Фобоса и Деймоса с относительно близкого расстояния. Затем в конце 1980-х годов в Советском Союзе была выполнена специальная миссия по исследованию естественного спутника Марса Фобоса, ближайшего к этой планете (проект "Фобос-2"). Не всё, что намечалось, удалось реализовать в этой экспедиции. Через два месяца после выхода на орбиту Марса аппарат был потерян. Тем не менее результаты научных исследований, проведённых с помощью космического аппарата "Фобос-2" в течение 57 дней его орбитального движения вокруг Марса, позволили получить уникальные научные результаты, в частности, по тепловым характеристикам реголита Фобоса и его отражательным характеристикам в инфракрасном и оптическом диапазонах [26]. Было подробно исследовано плазменное окружение Марса и его взаимодействие с солнечным ветром [27]. Например, по величине потока ионов кислорода, покидающих атмосферу Марса, обнаруженных с помощью спектрометра ионов, установленного на КА "Фобос-2", удалось оценить скорость эрозии атмосферы Марса вследствие взаимодействия с солнечным ветром (см. обзоры [28, 29]). Эти измерения чрезвычайно важны для исследования истории воды на Марсе и марсианской атмосферы. До полёта КА "Фобос-2" об околомарсианском пространстве было известно меньше, чем о свойствах пространства около Меркурия и около гораздо более удалённых Юпитера и Сатурна.

Сейчас в нашей стране готовится проект сложной комплексной экспедиции к Фобосу — "Фобос-Грунт", в рамках которого планируется доставить образец вещества Фобоса на Землю.

Что представляет собой Фобос и чем он интересен? Это небольшое небесное тело, типа астероида, размером около 25 км (рис. 20 [30]). Главная задача проекта — исследование вещества Фобоса, которое с большой вероятностью, представляет собой первородное вещество Солнечной системы. В результате мы надеемся понять историю Фобоса: возник ли он вместе с Марсом или является самостоятельным, захваченным когда-то малым небесным телом? Ответ на этот вопрос позволит дать подробный изотопный анализ доставленных в земные лаборатории образцов. Интересно также, что на поверхности Фобоса можно найти не только образцы первичного вещества, но и фрагменты вещества Марса, которое могло осесть на поверхности Фобоса после того, как было выброшено с Марса при ударах крупных метеоритов.

"Фобос-Грунт" — сложная экспедиция, которая предусматривает и исследование межпланетного простран-



Рис. 20. Изображение Фобоса на фоне Марса, полученное телевизионной камерой на космическом аппарате "Фобос-2".

ства, и дистанционное изучение Фобоса, и посадку на него, и контактные эксперименты по анализу его вещества с помощью комплекса бортовых приборов. Но первая и главная задача, которая будет при этом решаться, — это забор образцов грунта с поверхности Фобоса и доставка их на Землю. Такая задача ставится впервые после доставки образцов лунного грунта. Общая масса образцов вещества Фобоса, которые планируется доставить на Землю, составит примерно 100 г, и существует много оснований полагать, что в них будет содержаться не только вещество Фобоса, но и фрагменты вещества Марса. Планируемая длительность экспедиции составит около трёх лет.

Следующим логическим шагом должна стать доставка образцов грунта с самого Марса. Эта задача стоит в программе всех ведущих космических агентств. У экспедиции будет несколько целей. Это, прежде всего, поиск следов предбиологических процессов, реликтовой или, возможно, существующей жизни. Но даже если

собственно следов жизни не будет найдено, то исследование химического, минералогического и изотопного состава реголита чрезвычайно важно для понимания процессов, которые могли бы поддерживать жизнь на Марсе, прошлую или существующую. Кроме этого, изучение марсианского вещества в земной лаборатории позволит понять значение воды в истории планеты, провести абсолютное датирование основных геологических процессов, в том числе наложить ограничения на механизм и время аккреции, дифференциации и последующей эволюции коры, мантии, ядра. Наконец, на основе анализа образца реального вещества Марса можно будет попытаться создать инженерную модель Марса и выработать рекомендации для планетарной защиты будущих пилотируемых экспедиций на эту планету.

Сейчас в России выстраивается программа исследования Марса из трёх этапов (рис. 21). Первый — исследование и доставка образцов вещества Фобоса и исследование системы Марса (спутники, околомарсианское пространство и собственно сам Марс). Второй — создание сети малых станций на поверхности Марса для исследований его климата и внутреннего строения. В рамках этого проекта возможно сотрудничество с европейскими коллегами. Наконец, третий этап, который по оптимистическим оценкам может состояться в 2020–2025 гг., — доставка на Землю образцов вещества Марса.

Если пойти дальше, то неизбежно встаёт вопрос о пилотируемой экспедиции на Марс. Как она будет реализована, предсказать пока сложно. Возможно, стоит обратить внимание на сценарий, который предлагают инженеры ракетно-космической корпорации "Энергия". Согласно этому сценарию до посадки на Марс, которая является сложной технической задачей, необходимо создать станцию на орбите вокруг Марса, которая могла бы работать как координирующий центр для сети аппаратов, исследующих планету: марсоходов, атмосферных зондов, малых метео- и сейсмостанций, малых орбитальных аппаратов и т.д. Только после такого предварительного этапа следующим шагом станут собственно пилотируемая экспедиция с высадкой человека на поверхность Марса и в дальнейшем возможное освоение Марса. Конечно, при подготовке такой экспедиции предстоит решить многие технические и не только технические проблемы. В России уже начинаются первые эксперименты по моделированию подобного



Рис. 21. Программа исследований Марса космическими аппаратами, разработанными НПО им. С.А. Лавочкина: (а) "Фобос-Грунт", задачи: доставка на Землю образцов грунта Фобоса, исследование околомарсианского пространства, исследование вариаций атмосферы Марса; (б) "Марс-Net", задачи: создание сети малых станций для исследований климата Марса и его внутреннего строения; (в) "Марс-Грунт", задачи: доставка на Землю образцов вещества с Марса.

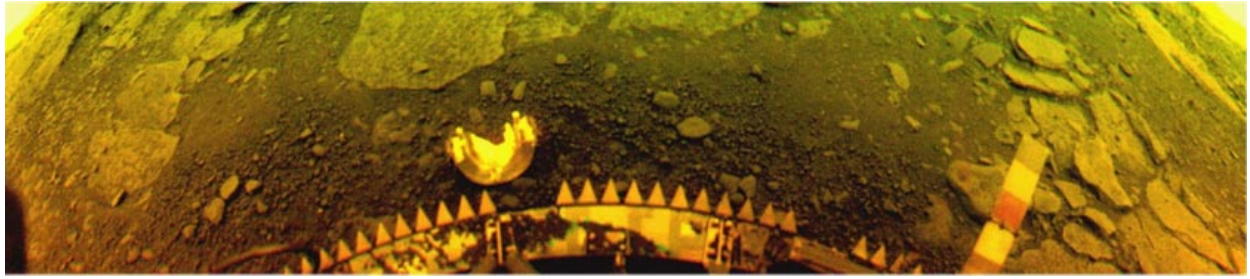


Рис. 22. Фотография поверхности Венеры, полученная посадочным аппаратом "Венера-13".

полёта. В Институте медико-биологических проблем РАН проводится эксперимент "Марс-500", при проведении которого потенциальные космонавты будут находиться в условиях, имитирующих условия многомесячного межпланетного перелёта.

Заметим, что исследование и освоение (research и exploration) — это совершенно разные задачи. Освоение Марса — конечно, уже не только академическая задача, оно требует специальной государственной программы. Но её осуществление будет иметь не только политическое, но и большое научное значение. С участием человека на Марсе можно провести множество уникальных экспериментов, хотя большая часть научных задач, конечно, может быть решена и с помощью более дешёвых космических автоматов.

Венера. Для нашей страны в "параде планет", наверное, главное место занимает Венера, с которой связаны самые важные открытия в истории советской планетной науки. Советские аппараты, посланные к Венере в 1970-х годах, впервые получили вертикальные профили основных характеристик атмосферы этой планеты и уникальные фотографии, сделанные на её поверхности (рис. 22). Изучение эволюции атмосферы Венеры продолжает быть одной из главных задач венерианских экспедиций. Сейчас на орбите Венеры работает европейский спутник "Venus Express". В исследованиях на этом спутнике, направленных в основном на изучение атмосферы Венеры, активную роль играют российские учёные.

Венера исключительно интересна и для геологов. В частности, до сих пор не понятно, существовала ли здесь в прошлом тектоника плит и имеется ли сейчас вулканическая и тектоническая активность; как обеспечивается устойчивость горного рельефа в условиях раскалённой поверхности. Существует и много других открытых вопросов.

Сейчас в России готовится проект "Венера-Д" — миссия с целью комплексного изучения Венеры, запуск которой запланирован в 2015–2016 гг. В состав миссии входят орбитальный аппарат, который будет выведен на полярную орбиту вокруг планеты, аэростатный зонд и достаточно долгоживущий (вплоть до суток) аппарат для посадки на поверхность планеты.

Меркурий. От времени запуска американского аппарата "Mariner-10", который в 1974 г. сближался с Меркурием в пролётном режиме, до начала новой миссии к планете аппарата НАСА "Messenger" прошло 35 лет. После уже выполненных в 2008 г. кратковременных сближений "Messenger" в 2011 г. должен впервые выйти на орбиту спутника Меркурия. Задача чрезвычайно сложна в баллистическом отношении, но вскоре

на орбите спутника планеты появится ещё один аппарат. Эту миссию, "Veni Colombo", запуск которой планируется на 2014 г., готовит Европейское космическое агентство (ЕКА), во время миссии должны быть выполнены, в том числе, несколько экспериментов, подготовленных российскими учёными.

Европа (спутник Юпитера). Внешняя часть Солнечной системы, планеты-гиганты Юпитер и Сатурн, активно исследовались и исследуются космическими средствами — с помощью американских аппаратов "Pioneer", "Voyager", "Galileo" и американо-европейских аппаратов "Cassini-Huygens".

Сейчас начинается подготовка комплексной международной экспедиции к системе Юпитера, в которой собирается также принять участие и Россия. Старт экспедиции намечен приблизительно на начало 2020-х годов. В состав экспедиции должно войти четыре космических аппарата. Первый, "Jupiter Europa Orbiter" (НАСА), — аппарат, вращающийся вокруг Европы, также будет изучать спутник Юпитера Ио. Исследования на втором космическом аппарате — "Jupiter Ganymede Orbiter" (ЕКА) — будут сосредоточены на двух других галилеевых спутниках, Ганимеди и Каллисто. Кроме этого, Японское аэрокосмическое агентство (JAXA) планирует участвовать в проекте с магнитосферным орбитальным аппаратом "Jupiter Magnetospheric Orbiter". Возможная роль России — продолжить линию, которая началась посадкой на Луну и получит дальнейшее развитие при осуществлении мягкой посадки на Фобос в проекте "Фобос-Грунт". Планируется, что российский аппарат выполнит посадку на спутник Европа и проведёт серию научных экспериментов на его поверхности.

Особый интерес к спутнику Европа (рис. 23) вызван тем, что по данным магнитных наблюдений, пролетавшего мимо него космического аппарата "Galileo", было установлено, что под толстым, примерно 10-километровым, слоем льда, покрывающим Европу, существует океан жидкой воды. И как следствие, на этом спутнике могла бы сейчас или когда-то ранее существовать жизнь.

Проект экспедиции к Европе обещает много интересного. Сама система Юпитера — уникальная природная плазменная лаборатория, которая предоставляет богатейшие возможности для исследования космической плазмы в естественных условиях. Впрочем, это же обстоятельство представляет собой одну из самых главных угроз миссии, так как сильный радиационный фон очень опасен для электроники как самого аппарата, так и комплекса научных приборов. Кроме этого, весьма интересно изучить динамику, внутреннее строение и химический состав поверхности Европы. Важнейшей

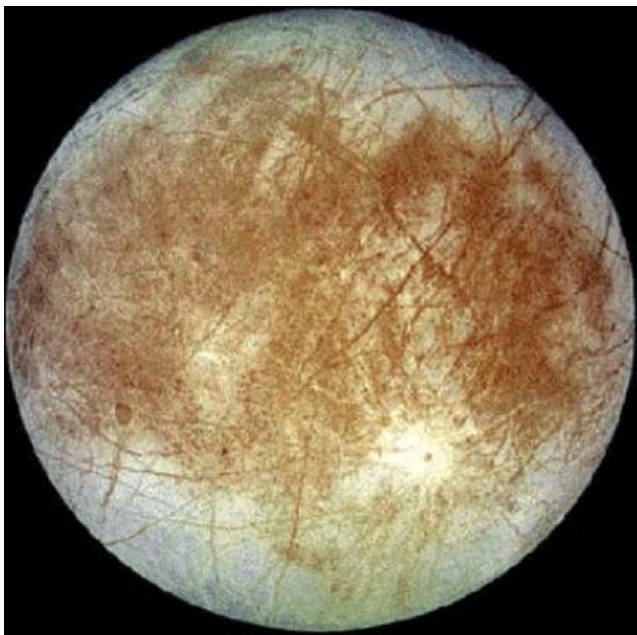


Рис. 23. Спутник Юпитера Европа.

целью экспедиции станет поиск возможных мест выхода жидкой воды на поверхность.

В Научно-производственном объединении (НПО) им. С.А. Лавочкина разработан проект КА для такой экспедиции (рис. 24). По-видимому, для неё потребуется самая мощная на сегодня ракета-носитель "Протон", которая даст возможность доставить к спутнику научную аппаратуру весом примерно 50 кг и провести ряд дистанционных и контактных экспериментов.

Европа — первый столь удалённый объект для исследования в Российской космической программе, так как до сих пор советские, а потом и российские планетные исследования были сосредоточены в основном на ближайших к Земле планетах.

Кометы. Впервые исследования комет прямыми методами начались в середине 1980-х годов. В 1986 г. был проведён, пожалуй, один из самых успешных советских космических проектов "Вега" — эксперимент по исследованию короткопериодической кометы Галлея (рис. 25), которая в своём перигелии один раз в 76 лет достигает орбит внутренних планет. Два космических аппарата, "Вега-1" и "Вега-2", пролетевших вблизи ядра кометы, стали частью международной флотилии по изучению кометы Галлея, куда входили также европейский КА "Giotto" и малые японские КА "Sakigake" ("Пионер") и "Suisei" ("Комета").

В 2014 г. должен начаться очень сложный эксперимент по исследованию кометы Чурюмова – Герасименко с помощью космического аппарата "Rosetta", подготовленного ЕКА, в котором принимают участие и российские учёные. Эксперимент обещает стать исключительно интересным, так как будет предпринята попытка совершить мягкую посадку на ядро кометы и провести анализ его вещества. Возможности выбора кометы для таких исследований кажутся достаточно богатыми, например, на первый взгляд, в качестве объекта таких исследований может быть взята недавно наблюдавшаяся комета Хейла – Боппа (рис. 26). Но это

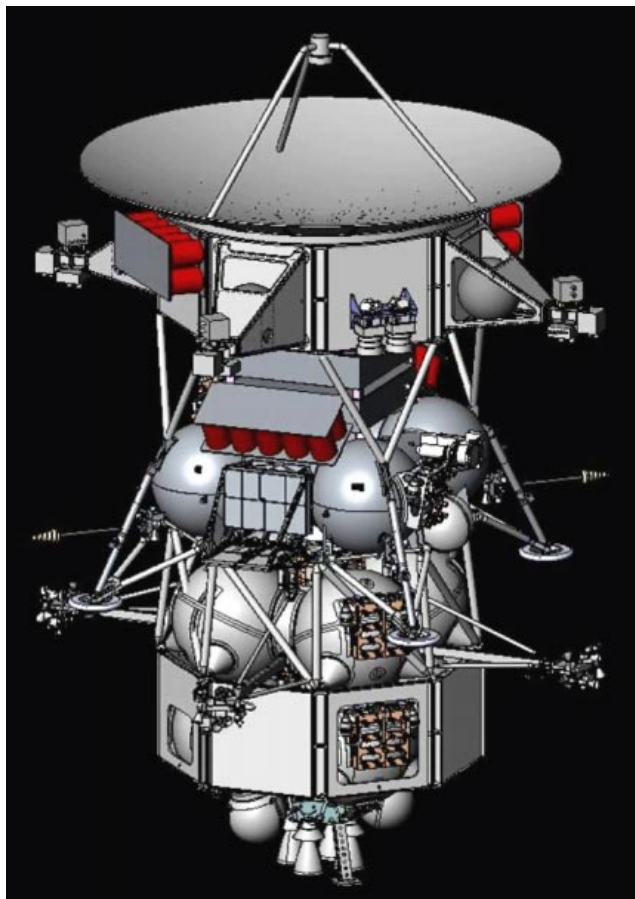


Рис. 24. Один из вариантов космического аппарата для полёта к Европе. (Разработка НПО им. С.А. Лавочкина.)

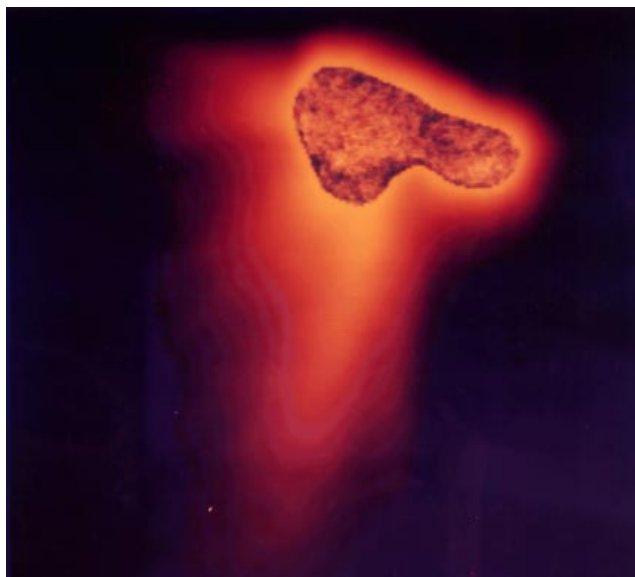


Рис. 25. Изображение ядра кометы Галлея с истекающими потоками газа и пыли. (Получено космическим аппаратом "Вега-2".)

не так. Сблизиться с ядром кометы аппарат может только в том случае, если это позволяет положение орбиты кометы и если скорость кометы относительно аппарата лежит в технически достижимых пределах.

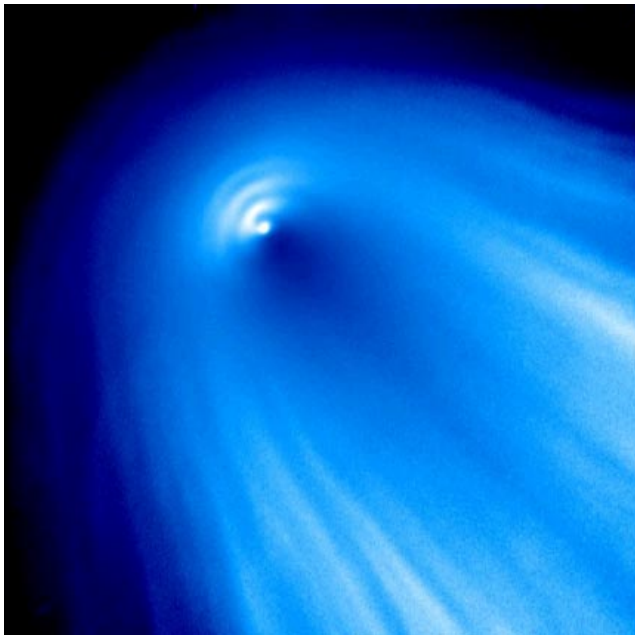


Рис. 26. Комета Хейла – Боппа. Снимок Обсерватории Пик Терскол.

Следующим этапом развития этой программы может стать проект нового поколения, который активно обсуждается в последние годы, — "Triple F" ("Fresh From the Fridge"). Его основная цель — доставка вещества кометы на Землю. Схема проекта выглядит следующим образом: КА должен зависнуть над ядром кометы и специальным щупом взять образец вещества, который будет доставлен на Землю. Задача исключительно сложная, и не только из-за баллистической схемы экспедиции. Исследуемое вещество летучи, и их надо суметь сохранить в первоначальном виде до анализа в земной лаборатории. Проект "Triple F" обсуждался ЕКА совместно с Российским космическим агентством, но пока его судьба остаётся неопределённой.

Изучение первичного вещества проводится не только при исследованиях комет. Недавно были проведены эксперименты по изучению пылевой компоненты первичного вещества Солнечной системы: проект "Stardust" (НАСА), а также эксперимент "Deep Impact" (НАСА), связанный с полётом к комете 9P/Tempel 1, который предусматривал столкновение со специальным, выброшенным из космического аппарата объектом. Продукты столкновения были захвачены аппаратом, чтобы исследовать структуру вещества кометы.

Метеоритная опасность. Есть ещё один аспект изучения малых тел, который имеет практическое значение. Не так часто, как на начальных этапах формирования Солнечной системы, но и в настоящее время большие метеоритные тела все-таки иногда падают на Землю. О том, что эта опасность существует, говорят и наличие крупных кратеров на Земле, и такие события, как падение Тунгусского метеорита, произошедшее всего 100 лет назад, и недавние столкновения крупной кометы Шумейкеров–Леви с Юпитером. Важно попытаться предсказать, что произойдёт, если подобное тело столкнётся с Землёй. Расчётами последствий удара в основном занимались специалисты по ядерным взрывам, и их опыт даёт интересные выводы (рис. 27).

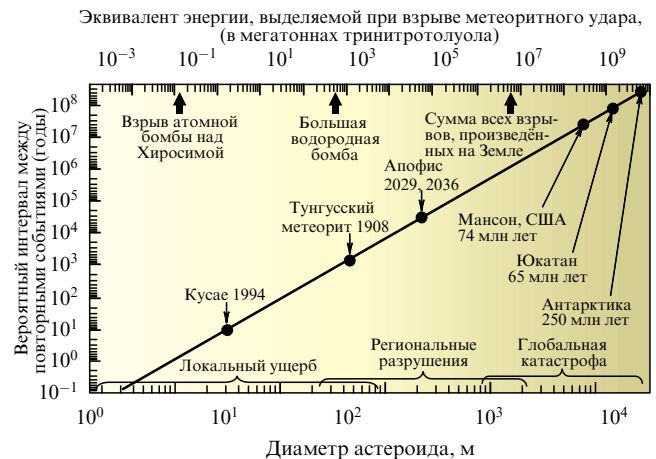


Рис. 27. Диаграмма, отображающая зависимость частоты столкновений от размеров астероида и масштаба вызванных им разрушений.

По расчётам самые большие повреждения могут вызвать столкновения с кометами, имеющими большие периоды, высокие скорости движения (несколько десятков километров в 1 с) и, как следствие, наиболее высокую кинетическую энергию, выделяющуюся при ударе. Повреждения от метеоритных ударов меньше. К сожалению, точную траекторию комет предсказать сложно, поскольку их подавляющее большинство резидентно находится исключительно далеко, в Облаке Оорта (~20000 а.е. от Солнца). По этой причине новые небесные объекты такого типа часто появляются совершенно неожиданно для наблюдателей, и заблаговременное предсказание их движения оказывается нелёгкой задачей.

Апофис. Большее значение сейчас имеют составление реестра околоземных астероидов и их оценка с точки зрения опасности, которую они представляют для Земли. В 2008 г. в РАН создана специальная комиссия, возглавляемая Б.М. Шустовым, которая занимается этой задачей в связи с возможной опасностью столкновения астероидов с Землёй. Проблема довольно серьёзна, хотя к ней иногда и относятся иронически. Не так давно был открыт новый объект, который вызывает значительный интерес как в российском, так и в международном научных сообществах, — астероид Апофис. Это небесное тело имеет диаметр примерно 350 м. В 2029 г. траектория астероида пройдёт довольно близко от Земли (рис. 28), и в следующем цикле движения, в 2036 г., имеется ненулевая вероятность столкновения астероида с нашей планетой. Повреждения, которые могли бы произойти в результате такого удара, в несколько раз больше тех разрушений, которые были вызваны падением Тунгусского метеорита.

Естественно, первый вопрос, который возникает в этом случае: что можно сделать, какие возможности человечества надо использовать, чтобы предотвратить столкновение? Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимо дальнейшее изучение астероида. В рамках такой задачи в НПО им. С.А. Лавочкина разрабатывается космический аппарат для изучения Апофиса. У этого аппарата две задачи. Первая — уточнить орбиту астероида, так как только после этого можно будет сказать более определённо, произойдёт ли столкновение или астероид пролетит хотя и вблизи Земли, но мимо неё.

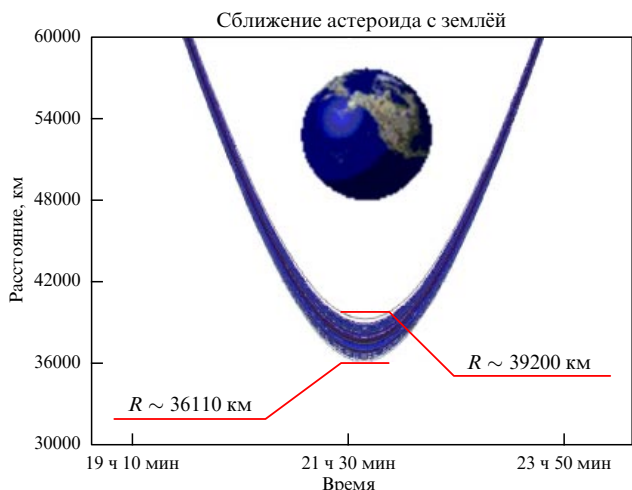


Рис. 28. Условия сближения астероида Аporhis 99942 с Землёй в 2029 г.

Вторая, не менее важная, задача — определить структуру этого небесного тела. От этого зависит выбор тех методов, которыми можно воздействовать на астероид, чтобы отклонить его от номинальной орбиты, ведущей к столкновению, или разрушить его. Некоторые астероиды представляют собой слабо связанный конгломерат отдельных частей. Если, напротив, это прочно связанная, консолидированная структура, то задача становится сложнее и может решаться только посредством медленного воздействия на астероид, например, с помощью электрореактивных двигателей.

7. За пределами Солнечной системы: экзопланеты

Рассмотренные проекты показывают, как быстро прогрессируют знания о телах Солнечной системы. Очень интересно сравнить нашу планетную систему с другими, обнаруженными совсем недавно у других звёзд. Исследования экзопланет — бурно развивающееся направ-

ление; к настоящему моменту открыто уже около 350 планет у других звёзд (рис. 29). С точки зрения теорий формирования планетных систем, которые ранее опирались только на сведения о нашей Солнечной системе, результаты этих исследований можно назвать обескураживающими. Все открытые до сих пор планетные системы совершенно не похожи на нашу, и тот сценарий их возникновения, который предлагала аккреционная теория в своём раннем представлении, не подтверждается этими наблюдениями, о чём говорилось выше.

Большинство открытых планет имеют массу порядка или более массы Юпитера. Само по себе это не удивительно, потому что существующий метод позволяет найти в основном только планеты-гиганты — именно они дают наблюдаемые эффекты в поведении материнской звезды. Около 30 % этих планет находится на круговых орбитах, на расстояниях менее 0,16–0,20 а.е. от центральной звезды [31–37].

Такие орбиты расположены гораздо ближе к звезде, чем орбита Меркурия в Солнечной системе (0,327 а.е.), хотя сами звёзды не очень отличаются от нашего Солнца. И главная проблема, о которой мы уже говорили выше, состоит в поисках ответа на вопрос о том, как планеты-гиганты попали на столь низкие орбиты (рис. 30). Вероятно, ответ заключается в том, что универсальным механизмом формирования планетных систем является миграция планет из внешних областей во внутренние. Такой механизм отсутствует в Солнечной системе, но, возможно, существовал в пору её формирования.

Миграция гигантов к звезде может представлять серьёзную угрозу существованию таких планет, как Земля: в ходе миграции на низкие околозвёздные орбиты планета масштаба Юпитера оставляет мало шансов на выживание планетам типа Земли из-за неизбежных катастрофических столкновений с формирующимися телами (рис. 31). В ходе своей эволюции такой гигант фактически может поглотить весь материал формирующихся планет земного типа. Другая угроза — возникновение резонансных орбит, не допускающих объединения протопланетных тел, подобно тому, как



Рис. 29. Число экзопланет, открытых с 1989 г. по 2008 г.

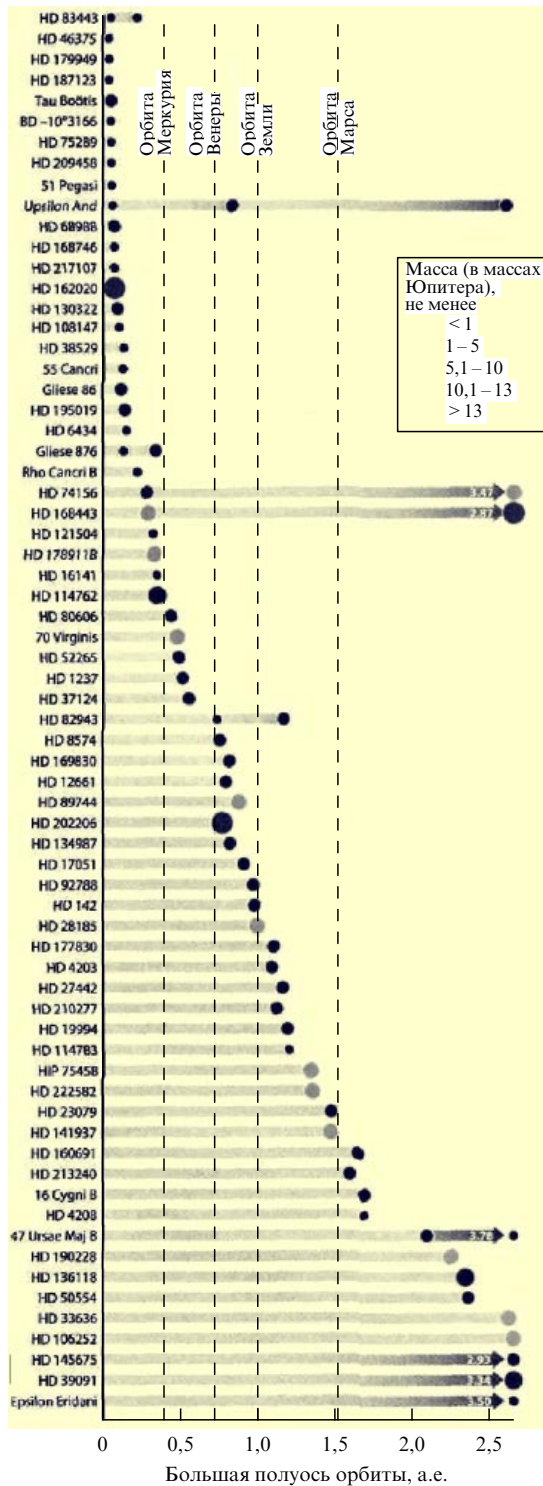


Рис. 30. Около 30 % экзопланет-гигантов находятся на крайне низких орбитах.

Юпитер в нашей Солнечной системе не позволил появиться планете в поясе астероидов между орбитами Марса и Юпитера.

Эта проблема связана и с нашим пониманием того, где во Вселенной могла бы зародиться жизнь. Так называемые "зоны обитаемости" звёздных систем довольно узки. В Солнечной системе, если говорить о жизни аминокислотного типа (а существование других типов проблематично) и тем более о цивилизациях

Планеты-гиганты, медленно мигрирующие к звезде по спиральным орбитам с высоким эксцентриситетом



Зона крупных планетезималей и формирующихся небольших планет земного типа, испытывающих катастрофические соударения с мигрирующими гигантами

Рис. 31. Схема миграции экзопланеты-гиганта на низкую орбиту. По-видимому, миграция является универсальным механизмом формирования планетных систем.

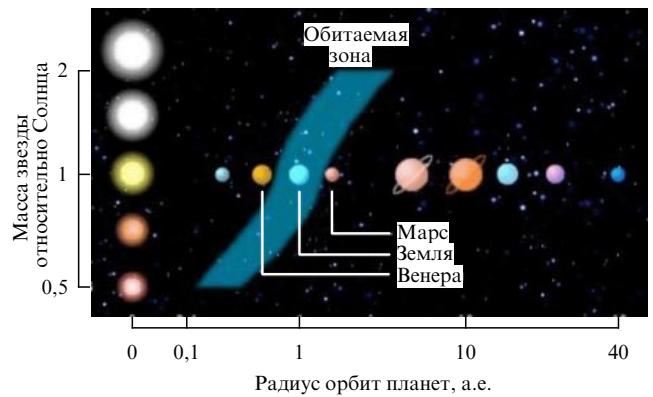


Рис. 32. Положение "зоны обитаемости" в планетных системах в зависимости от типа звезды и орбитального расстояния.

антропного типа, такая зона фактически включает в себя только Землю и лишь слегка задевает Марс (рис. 32).

Какие факторы являются критическими для жизни в том её виде, который мы знаем сейчас? Во-первых, уровень гравитации планеты должен быть умеренным, а период вращения не слишком длительным. Кроме этого, атмосфера должна обладать способностью поглощать внешнюю жёсткую радиацию. Плотность лучистой энергии, исходящей от звезды, должна быть достаточно высокой для поддержания фотосинтеза, планета должна обладать внутренними источниками энергии — вулканизмом и/или тектоникой плит. Наконец, исключительно важный фактор — достаточно сильное магнитное поле. Жёсткое космическое излучение разрушает большие молекулы, являющиеся основой жизни, от чего на Земле нас спасает магнитное поле, которое препятствует проникновению такого излучения на поверхность планеты (рис. 33).

Магнитные поля также могут дать в руки учёных ещё один метод исследования потенциально обитаемых экзопланет. Планеты с сильным магнитным полем являются мощнейшими источниками радиоизлучения. Удивительный факт: примерно 5% энергии потоков частиц, падающих на Землю, перерабатывается в магнитосфере Земли в энергию радиоизлучения. Это очень высокий коэффициент полезного действия. Теоретически подобное радиоизлучение должно возникать на экзопланетах с достаточно сильным собственным магнитным полем. К сожалению, с Земли его наблюдать нельзя, так как волны с частотами, превышающими ~ 10 МГц, отражаются ионосферой. Одним из интересных способов

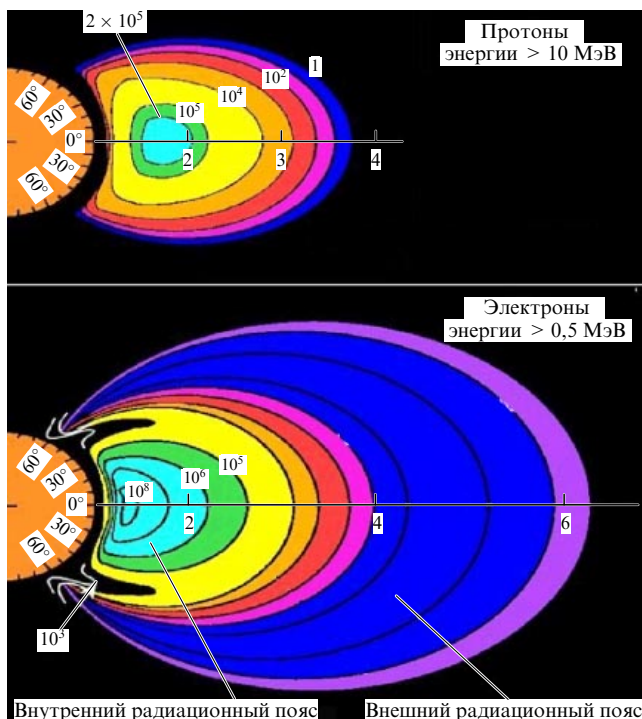


Рис. 33. Большая часть энергичных частиц отражается магнитным полем Земли. Проникающая часть задерживается в радиационных поясах. В верхней части рисунка изображено распределение протонов, в нижней — электронов.

исследования экзопланет могли бы стать наблюдения с помощью антенной решётки, установленной на Луне. Такой проект может стать одной из целей создания обитаемой лунной базы, о которой сейчас много говорят в космических агентствах разных стран (США, ЕКА, Индия, Китай). Лунная база была бы очень полезна ещё и в том отношении, что для радиоастрономических исследований (в том числе, для исследования радиоизлучения планет) измерения на обратной стороне Луны предоставляют уникальные возможности по точности и чувствительности благодаря отсутствию мощного фона электромагнитных антропогенных помех от Земли. Луна имеет много преимуществ и для размещения наблюдательной астрономической обсерватории: нет помех от атмосферы; возможны измерения с очень длительной экспозицией, Земля находится далеко, поэтому паразитная засветка от неё является слабой, а отсутствие атмосферы позволит наблюдать наиболее слабые небесные объекты. Наконец, низкая гравитация (0,16 земной) значительно облегчает установку инструментов и детекторов с большими размерами.

На наш взгляд, создание такой международной научной обсерватории, в которой экспериментально исследовались бы, помимо собственно Луны, самые сложные проблемы астрофизики и физики планет, является сейчас единственной разумной мотивацией чрезвычайно затратного строительства подобной лунной базы.

8. Заключение

В заключение можно сказать, что, несмотря на сильное отставание, возникшее в 1990-е годы, Россия пытается сейчас найти свою нишу в научных космических про-

граммах и постепенно вернуть кредит доверия в международном сотрудничестве, сильно пострадавший из-за многочисленных срывов и переносов сроков наших космических проектов. Сейчас мы можем смотреть в будущее с умеренным оптимизмом. В России сформировалась хотя и скромная (по советским и международным меркам), но вполне достойная программа исследований Солнечной системы.

За рамками данной статьи осталась ещё одна сфера исследования Солнечной системы — изучение самого Солнца. Последнее десятилетие называют "золотым веком" солнечной физики в космосе, так как целая флотилия космических аппаратов с самыми современными инструментами наблюдает за Солнцем, исследуя ближайшую к нам звезду и как астрофизический объект, и как источник формирования космической погоды. Последний аспект приобретает особое значение в связи со всё более заметным расширением деятельности человека в околоземном космосе: прогнозирование вредоносных факторов космического пространства (потоки высокоэнергичных частиц, рентгеновское и гамма-излучение) и предупреждение о возникновении опасных ситуаций для космических аппаратов, космонавтов, а также для различных сфер человеческой деятельности. Подобные службы в космосе и на Земле становятся всё более насыщенно необходимыми.

Это отдельная и очень обширная тема. У России здесь есть серьёзные успехи. Относительно недавно закончил работу на орбите космический аппарат КОРОНАС-Ф (2001–2005 гг.), который получил очень интересные результаты [38]. В начале 2009 г. был запущен третий аппарат из серии КОРОНАС (Комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности Солнца) — КОРОНАС-Фотон, который уже начал регистрировать жёсткое излучение солнечных вспышек, исследовать процессы накопления и трансформации энергии в солнечной атмосфере, механизмы ускорения, распространения и взаимодействия энергичных частиц. Кроме этого, измерения на космическом аппарате КОРОНАС-Фотон дадут возможность исследовать корреляцию физико-химических процессов в верхней атмосфере Земли с солнечной активностью. Неожиданно затянувшееся начало наступающего солнечного цикла позволило пока зарегистрировать всего несколько крупных вспышечных событий на Солнце, но уже видно, что новый цикл начинает входить в активную фазу.

В Совете РАН по космосу обсуждаются ещё два перспективных солнечных проекта — "Интергелиозонд", предусматривающий пролёт КА мимо Солнца на расстоянии примерно 0,2 а.е. Это сложная задача, но изучение Солнца с близкого расстояния может значительно повысить разрешение измерений и, кроме того, позволит детально исследовать солнечную корону и механизмы ускорения солнечного ветра. Ещё один оригинальный проект Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, который называется "Полярно-эклиптический патруль", предусматривает запуск двух спутников на взаимосогласованные орбиты, лежащие вне плоскости эклиптики и проходящие на расстоянии примерно 0,5 а.е. от Солнца. Такие измерения позволят получать стереоизображения выбросов плазмы из Солнечной короны, причём дадут возможность увидеть эти явления как бы сверху, из положения над плоскостью эклиптики, в отличие от

измерений в начавшихся недавно экспериментах с использованием двух американских спутников-близнецов Солнца STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory).

Солнечная система — наш дом, в котором, как мы надеемся, человечеству суждено провести оставшиеся миллиарды лет своего существования (это, конечно, оптимистическая оценка, не учитывающая возможности технических, природных, и главное — социальных, катастроф), поэтому новые знания о происходивших ранее и происходящих в ней сейчас физико-химических процессах приобретают особое практическое значение. Понимание того, типичной или уникальной является наша планета, да и сама Солнечная система среди других планетных систем, может иметь и важнейшее мировоззренческое значение в объяснении фундаментальных вопросов организации и развития материи во Вселенной.

Авторы благодарят А.Т. Базилевского, О.В. Закутную, О.И. Кораблёва, В.С. Корниленко, В.Д. Кузнецова, М.Б. Мартынова, М.М. Могилевского, И.Н. Толстихина, А.М. Финкельштейна, Б.М. Шустова за помощь в подготовке материалов.

Список литературы

1. Сафронов В С *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет* (М.: Наука, 1969)
2. Hayashi C, Nakazawa K, Nakagawa Y "Formation of the solar system", in *Protostars & Planets II* (Eds D C Black, M S Matthews) (Tucson, Ariz.: Univ. of Arizona Press, 1985) p. 1100
3. Alfvén H, Arrhenius G *Evolution of the Solar System* (Washington: Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration, 1976) [Альвен Х, Аррениус Г *Эволюция солнечной системы* (М.: Мир, 1979)]
4. Safronov V S, Ruskol E L *Icarus* **49** 284 (1982)
5. Zuckerman B, Forveille T, Kastner J H *Nature* **373** 494 (1995)
6. Pollack J B et al. *Icarus* **124** 62 (1996)
7. Wuchterl G *Icarus* **106** 323 (1993)
8. Wuchterl G "Giant planet formation — a theoretical timeline", in *Planetary Systems in the Universe: Proc. of the 202nd IAU Symp., Manchester, United Kingdom, 7–10 August 2000* (Eds A Penny et al.) (San Francisco, Calif.: IAU, 2004) p. 167
9. Рускол Е Л, Сафронов В С *Астрон. вестн.* **32** 291 (1998) [Ruskol E L, Safronov V S *Solar Syst. Res.* **32** 255 (1998)]
10. Boss A P *Astrophys. J.* **563** 367 (2001)
11. Boss A P *Astrophys. J.* **599** 577 (2003)
12. Kuiper G P "On the origin of the solar system" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **37** 1 (1951)
13. Ida S, Lin D N C *Astrophys. J.* **604** 388 (2004)
14. Klahr H, Brandner W (Eds) *Planet Formation: Theory, Observations and Experiments* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006)
15. Burrows A *Nature* **433** 261 (2005)
16. Burrows A "The emerging theory of brown dwarfs and giant planets", in *Planetary Systems: the Long View. 9th Rencontres de Blois, June 22–28, 1997, France* (Eds L M Celnikier, J Tràn Thanh Van) (Paris: Editions Frontières, 1998) p. 373
17. Santos N C, Benz W, Mayor M *Science* **310** 252 (2005)
18. Lin D N C, Bodenheimer P, Richardson D *Nature* **380** 606 (1996)
19. Kokubo E, Ida S *Icarus* **143** 15 (2000)
20. Bodenheimer P, Hubickyj O, Lissauer J J *Icarus* **143** 2 (2000)
21. Lin D N C "Formation of planets and planetary systems", in *Planetary Systems: the Long View. 9th Rencontres de Blois, June 22–28, 1997, France* (Eds L M Celnikier, J Tràn Thanh Van) (Paris: Editions Frontières, 1998) p. 391
22. Kortenkamp S J, Wetherill G W *Icarus* **143** 60 (2000)
23. Guillot T et al. *Astrophys. J.* **450** 463 (1995)
24. Mitrofanov I et al. *Science* **297** 78 (2002)
25. Boynton W V et al. *Science* **297** 81 (2002)
26. Ksanfomaliti L V, Moroz V I *Icarus* **117** 383 (1995)
27. Lundin R et al. *Nature* **341** 609 (1989)
28. Zakharov A V "The plasma environment of Mars: Phobos mission result", in *Venus and Mars: Atmospheres, Ionospheres, and Solar Wind Interactions: Proc. of the Chapman Conf., Hungary, 1990* (Geophys. Monograph, No. 66, Eds J G Luhmann, M Tatrallyay, R O Pepin) (Washington, DC: American Geophysical Union, 1992) p. 327
29. Nagy A F et al. *Space Sci. Rev.* **111** 33 (2004)
30. Avanesov G A et al. *Nature* **341** 585 (1989)
31. Макалкин А Б "Проблемы эволюции протопланетных дисков", в сб. *Современные проблемы механики и физики космоса* (Под ред. В С Авдеевского, А В Колесниченко) (М.: Физматлит, 2003) с. 357
32. Рускол Е Л "Образование планет и спутников", в сб. *Современные проблемы механики и физики космоса* (Под ред. В С Авдеевского, А В Колесниченко) (М.: Физматлит, 2003) с. 353
33. Ксанфомалити Л В *Астрон. вестн.* **34** 529 (2000) [Ksanfomaliti L V *Solar Syst. Res.* **34** 481 (2000)]
34. Ксанфомалити Л В *Астрон. вестн.* **38** 344 (2004) [Ksanfomaliti L V *Solar Syst. Res.* **38** 300 (2004)]
35. Ксанфомалити Л В *Астрон. вестн.* **38** 428 (2004) [Ksanfomaliti L V *Solar Syst. Res.* **38** 372 (2004)]
36. Ксанфомалити Л В *Астрон. вестн.* **41** 500 (2007) [Ksanfomaliti L V *Solar Syst. Res.* **41** 463 (2007)]
37. Ксанфомалити Л В *Письма в Астрон. журн.* **33** 550 (2007) [Ksanfomaliti L V *Astron. Lett.* **33** 488 (2007)]
38. Кузнецов В Д "Космические исследования Солнца", в сб. *Пятьдесят лет космических исследований* (Под ред. А В Захарова) (М.: Физматлит, 2009) с. 60

The Solar system, current understanding and future prospects

L.M. Zelenyi, A.V. Zakharov, L.V. Ksanfomaliti

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences
ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-495) 333-20 45, (7-495) 333-23 22
E-mail: zakharov@iki.rssi.ru

The present understanding of the origin and properties of the Solar system is discussed and what is known about extrasolar planets is reviewed. The current status of and future prospects for space exploration in Russia and elsewhere are examined. (This paper is an extended version of "Prospects for the Russian research program on Solar system physical processes" by L.M. Zelenyi, presented at the scientific session "Prospects for the development of fundamental physics and astronomy" at the RAS Physical Sciences Division general meeting held 15 December 2008.)

PACS numbers: **96.10. + i**, **96.30. – t**, **97.82. – j**

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200910g.1118

Bibliography — 38 references

Received 24 August 2009

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **179** (10) 1118–1140 (2009)

Physics – Uspekhi **52** (10) (2009)