

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-ОСЕТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ К. Л. ХЕТАГУРОВА»

Д. И. ТЕБИЕВА

ПЛАНЕТОЛОГИЯ

Учебное пособие

ВЛАДИКАВКАЗ
2015

ББК 26.3

Т 29

Т 29 **Тебиева Д. И.** Планетология: учебное пособие / под ред. Н. И. Цидаевой;
Сев.-Осет. гос. ун-т. Владикавказ: Изд-во СОГУ, 2015. – 232 с.

ISBN 978-5-8336-0824-1

Научный редактор – канд. физ-мат. наук, доц. **Н. И. Цидаева**

Рецензенты: докт. геогр. наук, проф. **В. В. Братков**
 докт. физ-мат. наук **А. М. Туриев**

В учебном пособии излагаются новейшие сведения о планетах Солнечной системы, современной структуре Вселенной, теоретические основы космогонии и космологии. Приводится сравнительный анализ планет Солнечной системы, их спутников и других тел.

Пособие может способствовать более глубокому усвоению дисциплин (модулей) по направлению бакалавриата 021000 «География», 022000 «Экология и природопользование», осознанию места Земли в Солнечной системе и мире в целом, уникальности Земли как планеты.

Пособие может использоваться широким кругом читателей, так как в нем в доступной форме, без математической и физической нагрузки, излагаются достижения астрономической науки, дается географическая интерпретация процессов, происходящих на поверхностях планет Солнечной системы.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУ ВПО «Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова».

ББК 26.3

ISBN 978-5-8336-0824-1

© Издательство Северо-Осетинского
государственного университета
имени К. Л. Хетагурова, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
 Глава 1. Вселенная	
1.1. Концепция Большого взрыва.....	8
1.2. Доказательства Большого взрыва.....	17
1.2.1. Закон Хаббла.....	18
1.2.2. Космический микроволновой фон.....	21
1.2.3. Изобилие легких элементов.....	22
1.2.4. Нерешенные проблемы ранней Вселенной.....	23
1.3. Первичный нуклеосинтез.....	25
1.4. Звездные скопления – галактики.....	27
1.4.1. Млечный Путь.....	29
1.4.2. Метагалактики.....	29
1.5. Образование химических элементов в звездах.....	30
1.5.1. Первое поколение звезд.....	30
1.5.2. Второе поколение звезд.....	31
1.5.3. Образование ядер элементов и изотопов.....	32
1.5.4. Образование тяжелых элементов.....	34
1.5.4.1. S-процесс.....	34
1.5.4.2. R-процесс.....	35
1.5.5. Современные проблемы астрофизики.....	37
 Глава 2. Эволюция звезд	
2.1. Звезды.....	38

2.1.1. Рождение звезды.....	38
2.1.2. Главная последовательность.....	39
2.1.3. Красные гиганты.....	41
2.1.4. Белые карлики.....	42
2.1.5. Сверхновые, нейтронные звезды, пульсары.....	42
2.1.6. Черные дыры.....	43
2.1.7. Современные проблемы звездной астрономии.....	44
2.2. Измерение расстояний в астрономии.....	46
Глава 3. Происхождение Солнечной системы.....	52
3.1. Формирование Солнца из газопылевого из протопланетного облака.....	53
3.2. Конденсация и формирование роя планетезималей.....	56
3.3. Эволюция планетезималей и формирование планет.....	57
3.4. Образование планет-гигантов.....	58
3.5. Образование спутников планет и малых тел.....	59
3.6. Новейшие данные о происхождении Солнечной Системы...	61
Глава 4. Строение Солнечной системы.....	70
4.1. Солнце.....	72
4.1.1. Внутреннее строение Солнца.....	74
4.1.2. Физические процессы на Солнце.....	77
4.1.3. Солнечная энергия.....	78
4.1.3.1. Солнечная радиация.....	79
4.1.3.2. Корпускулярное излучение (солнечный ветер).....	82
4.2. Общая характеристика планет.....	83

4.2.1. Движение планет.....	88
4.2.2. Планетные оболочки. Дифференциация недр.....	90
4.2.2.1. Химический состав вещества планет.....	90
4.2.2.2. Внутреннее строение.....	92
4.2.2.3. Процессы в недрах планет земной группы. Рельеф поверхности	94
4.2.3. Излучение планет.....	97
4.2.4. Атмосферы планет.....	102
4.2.4.1. Химический состав.....	102
4.2.4.2. Вертикальная структура атмосфер	102
4.2.4.3. Температура атмосфер.....	104
4.2.4.4. Общая циркуляция атмосфер.....	106
4.2.4.5. Аэрозольные примеси в атмосферах	108
4.2.4.6. Происхождение и эволюция атмосфер.....	108
4.2.4.7. «Климат» на планетах.....	108
4.2.5. Характеристика планет.....	110
4.2.5.1. Планеты-гиганты.....	110
4.2.5.2. Планеты земной группы.....	113
4.3. Спутники планет.....	139
4.3.1. Спутник Земли – Луна.....	142
4.3.2. Спутники Марса.....	143
4.3.3. Спутники Юпитера.....	146
4.3.4. Поверхности спутников Сатурна	157
4.3.5. Спутники Урана.....	165
4.3.6. Спутники Нептуна.....	168

4.3.7. Кольца планет.....	170
4.4. Астероиды.....	176
4.5. Кометы.....	181
4.6. Метеорное вещество. Метеориты	185
 Глава 5. Эволюция планет и факторы формирования природ- ных условий	
5.1. Факторы и фазы эволюции.....	191
5.2. Природная обстановка на внутренних планетах.....	198
5.2.1. Климатообразующие факторы.....	200
5.2.2. Климатообразующие процессы.....	203
5.3. Формирование климата на планетах земной группы.....	206
5.3.1. Высыхание Венеры.....	207
5.3.2. Охлаждение Марса.....	210
5.3.3. Развитие климата Земли.....	212
5.4. Непрерывно обитаемая зона.....	218
5.5. Заключение. Антропный принцип	220
 Литература.....	223
 Приложение.....	224

ВВЕДЕНИЕ

В XX веке достигнут существенный прогресс в понимании процессов, которые привели к формированию Вселенной. В этом большая заслуга физиков, математиков, философов. Этому способствовали интенсивные исследования межзвездной среды, молекулярных облаков, процессов образования и эволюции звезд, изучение поведения элементарных частиц и многие другие новейшие открытия.

С глубокой древности человека интересовал вопрос происхождения сущего. Мифы и легенды о сотворении мира дают нам примеры первобытного мышления. Религиозные учения также освещают вопросы мироздания. В наше время научные представления о мире чрезвычайно расширились, но вопросов стало еще больше. «Почему возникла Вселенная?», «Почему возникла жизнь?», «Почему именно на Земле?», «Что нас ждет в будущем?»

Глава 1 ВСЕЛЕННАЯ

Современная наука рисует картину спонтанного (самопроизвольного) возникновения Вселенной из вакуума. Астрономы употребляют термин «Большой взрыв» в двух взаимосвязанных значениях. С одной стороны этим термином называют само событие, ознаменовавшее зарождение Вселенной около 15 миллиардов лет назад; с другой – весь сценарий ее развития с последующим расширением и остыванием.

1.1. Концепция Большого взрыва

Концепция Большого взрыва появилась с открытием в 1920-е годы закона Хаббла, который описывает простой формулой результаты наблюдений, согласно которым видимая Вселенная расширяется и галактики удаляются друг от друга.

Предполагается, что вещество Вселенной представляло собой кипящий «суп» из элементарных частиц и квантов излучения, которые непрерывно превращались друг в друга, согласно знаменитой формуле теории относительности А. Эйнштейна $E = mc^2$.

В начале XX столетия стало ясно, что атомы не являются элементарными «кирпичиками» материи, а сами имеют сложную структуру и состоят из еще более элементарных частиц – нейтронов и протонов, образующих атомные ядра, и электронов, которые эти ядра окружают. Вскоре ученые стали открывать все новые и новые элементарные частицы. Труднее всего было разобраться с многочисленными *адронами* – тяжелыми частицами, родственными нейтрону и протону, которые во множестве рождаются и тут же распадаются в процессе различных ядерных процессов.

Более того, в поведении различных адронов были обнаружены необъяснимые закономерности, из которых стало складываться некое подобие периодической таблицы. Физики объединили адроны в группы по восемь частиц – два типа частиц в центре и шесть в вершинах правильного шестиугольника. При этом частицы из каждой восьмеричной группы, располагающиеся на одном и том же месте, обладают рядом

общих свойств, подобно тому, как схожие свойства имеют химические элементы из одного столбца таблицы Менделеева, а частицы, расположенные по горизонтальным линиям в каждом шестиугольнике, обладают приблизительно равной массой, но отличаются электрическими зарядами (рис. 1). Такая классификация получила название *восьмеричный путь* (в честь одноименной доктрины в буддистской теологии). В 1960-е годы теоретики поняли, что такую закономерность можно объяснить лишь тем, что элементарные частицы на самом деле таковыми не являются, а сами состоят из еще более фундаментальных структурных единиц.

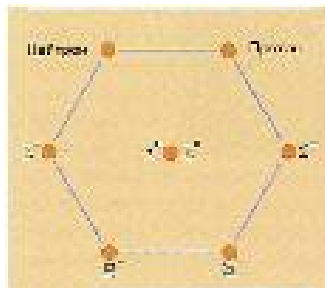


Рис. 1. Схема одной из восьмеричных групп адронов

В нижнем ряду – два кси-гиперона (отрицательно и положительно заряженные); в среднем ряду – три сигма-гиперона и парный нейтральному сигма-гиперону лямбда-гиперон; в верхнем ряду – нейтрон и протон. По своим свойствам гиперон Λ^0 ничем не отличается от гиперона Σ^0 , однако это разные частицы: они являются зеркальным отражением друг друга с точки зрения их структурного строения.

Эти структурные единицы назвали **кварками**. Они обладают дробным электрическим зарядом: $1/3$ или $2/3$ заряда электрона или протона (см. таблицу) не могут пребывать в свободном, не связанном друг с другом внутри элементарных частиц состоянии, и о самом факте их существования можно судить только по свойствам, проявляемым адронами, в состав которых они входят. Какими бы энергиями не воздействовали на элементарные частицы, пытаясь «выбить» из них кварки, ничего не удастся – частицы будут распадаться на другие частицы, сливаться, перестраиваться, но свободными не становятся.

У каждого кварка есть своя собственная античастица. В лабораториях уже открыты элементарные частицы, содержащие все шесть типов кварков. Каждый из шести кварков, помимо электрического заряда, характеризуется *изотопическим* (условно направленным) *спином*. Наконец, каждый из кварков может принимать три значения квантового числа, которое называется его *цветом* (*color*) и обладает *ароматом* (*flavor*). Конечно же, кварки не пахнут и не имеют цвета в традиционном понимании, просто такое название сложилось исторически для обозначения их определенных свойств.

**Шесть типов кварков и их заряд
(измеренный в зарядах электрона)**

Кварк	Заряд
u или p (верхний или протонный)	+2/3
d или n (нижний или нейтронный)	-1/3
c (очарованный)	+2/3
s (странный)	-1/3
b (красивый)	+2/3
t (истинный)	-1/3

Другой строительный набор состоит из кирпичиков, называемых **лептонами**. Самый распространенный из лептонов – **электрон**. Он входит в структуру атомов, но не участвует в ядерных взаимодействиях, ограничиваясь межатомными. Помимо него (и парной ему античастицы под названием **позитрон**) к лептонам относятся более тяжелые частицы – мюон и тау-лептон с их античастицами. Кроме того, каждому лептону сопоставлена своя незаряженная частица **нейтрино** с нулевой (или практически нулевой) массой покоя; такие частицы называются, соответственно, электронное, мюонное и таонное **нейтрино**.

Итак, лептоны, подобно кваркам, также образуют три «семейных пары», но такая симметрия пока убедительного объяснения не нашла.

На данном этапе развития науки **кварки и лептоны представляют собой основной строительный материал Вселенной**.

Чтобы понять **характер сил взаимодействия между кварками и лептонами**, необходимо разобраться в современной интерпретации самого понятия силы и воспользоваться аналогией. Представим двух лодочников, гребущих на встречных курсах по реке. Один гребец решил угостить коллегу газировкой и, когда они проплывали друг мимо друга, кинул ему полную бутылку воды. В результате действия закона сохранения импульса, когда первый гребец кинул бутылку, курс его лодки отклонился от прямолинейного в противоположную сторону, а когда второй гребец поймал бутылку, ее импульс передался ему, и вторая лодка также отклонилась от прямолинейного курса, но уже в противоположную сторону. Таким образом, в результате передачи газировки обе лодки изменили направление. Согласно законам механики Ньютона это означает, что

между лодками произошло силовое взаимодействие. Но лодки не вступали между собой в прямое соприкосновение – сила взаимодействия между лодками была передана носителем импульса – бутылкой воды. Физики назвали бы ее *переносчиком взаимодействия*.

Так же и силовые взаимодействия между частицами происходят посредством обмена частицами-переносчиками этих взаимодействий. Различия в фундаментальных силах взаимодействия проводятся лишь потому, что в роли переносчиков этих взаимодействий выступают разные частицы. Таких взаимодействий четыре: *сильное* (именно оно удерживает кварки внутри частиц), *электромагнитное*, *слабое* (именно оно приводит к некоторым формам радиоактивного распада) и *гравитационное*.

– Переносчиками **сильного** цветового взаимодействия являются *глюоны*, не обладающие ни массой, ни электрическим зарядом. Этот тип взаимодействия описывается квантовой хромодинамикой.

– **Электромагнитное** взаимодействие происходит посредством обмена квантами электромагнитного излучения, которые называются *фотонами* и также лишены массы.

– **Слабое** взаимодействие, напротив, передается массивными *векторными* или *калибровочными бозонами*, которые «весят» в 80–90 раз больше протона, – в лабораторных условиях их впервые удалось обнаружить лишь в начале 1980-х годов.

– **Гравитационное** взаимодействие передается посредством обмена не обладающими собственной массой *гравитонами* – этих посредников пока что экспериментально обнаружить не удалось.

В рамках стандартной модели Вселенной первые три типа фундаментальных взаимодействий удалось объединить, и они более не рассматриваются по отдельности, а считаются тремя различными проявлениями силы единой природы. Возвращаясь к аналогии, предположим, что другая пара гребцов, проплывая друг мимо друга, обменялась не бутылкой газированной воды, а всего лишь стаканчиком мороженого. От этого лодки также отклонятся от курса в противоположные стороны, но значительно слабее. Стороннему наблюдателю может показаться, что в этих двух случаях между лодками действовали разные силы: в первом случае произошел обмен жидкостью (бутылку во внимание можно не брать, поскольку нас интересует ее содержимое), а во втором – твердым телом (мороженым). Теперь представьте, что в тот день стояла летняя жара, и мороженое в полете растаяло. То есть достаточно некоторого повышения темпера-

туры, чтобы понять, что фактически взаимодействие не зависит от того, жидкое или твердое тело выступает в роли его переносчика. Единственная причина, по которой нам представлялось, что между лодками действуют различные силы, состояла во внешнем отличии переносчика-мороженого, вызванном недостаточной для его плавления температурой. Поднимите температуру – и силы взаимодействия предстанут наглядно едиными.

Силы, действующие во Вселенной, также сплавляются воедино при высоких энергиях (температурах) взаимодействия, после чего различить их невозможно. Первыми *объединяются* (именно так это принято называть) слабое ядерное и электромагнитное взаимодействия. В результате мы получаем так называемое *электрослабое взаимодействие*, наблюдаемое даже лабораторно при энергиях, развиваемых современными ускорителями элементарных частиц. В ранней Вселенной энергии были столь высоки, что в первые 10^{-10} секунды после Большого взрыва не было грани между слабыми ядерными и электромагнитными силами. Лишь после того, как средняя температура Вселенной понизилась до 10^{14} К, все четыре, наблюдаемые сегодня, силовые взаимодействия разделились и приняли современный вид. Пока температура была выше этой отметки, действовали лишь три фундаментальные силы: сильного, объединенного электрослабого и гравитационного взаимодействий.

Объединение электрослабого и сильного ядерного взаимодействия происходит при температурах порядка 10^{27} К. В лабораторных условиях такие энергии сегодня недостижимы. Самый мощный современный ускоритель в настоящее время Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider) может разгонять частицы до энергий, которые составляют всего 0,000000001% от необходимой для объединения электрослабого и сильного ядерного взаимодействий. Так что, вероятно, экспериментального подтверждения этого объединения ждать нам придется долго. Таких энергий нет и в современной Вселенной, однако в первые 10^{-35} с, ее существования температура Вселенной была выше 10^{27} К, и во Вселенной действовало всего две силы – *электросильного* и гравитационного взаимодействия. Теории, описывающие эти процессы, называют «теориями великого объединения» (ТВО). Напрямую проверить ТВО нельзя, но они дают определенные прогнозы и относительно процессов, протекающих при более низких энергиях. На сегодняшний день все предсказания ТВО для относительно низких температур и энергий подтверждаются экспериментально.

Итак, стандартная модель в обобщенном виде представляет собой теорию строения Вселенной, в которой материя состоит из кварков и лептонов, а сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия между ними описываются теориями великого объединения. Такая модель, очевидно, не полна, поскольку не включает гравитацию.

Сегодня уже достаточно полно раскрыта хронологическая картина ранней истории Вселенной, начиная с невообразимо малых долей секунды после Большого взрыва, объясняющая происхождение элементарных частиц и химических элементов. Интересно прокрутить события в обратной хронологии, начиная с 1 миллиарда лет после Большого взрыва (все сроки условны) и вплоть до самого взрыва.

1 миллиард лет

Началось формирование галактик, и Вселенная стала отдаленно напоминать то, что мы наблюдаем сегодня. Уже следующее поколение сверхмощных телескопов позволит нам рассмотреть галактики, удаленные настолько, что они предстанут перед нами на стадии непосредственно после их рождения.

300 000 лет

Примерно через 300 000 лет после Большого взрыва Вселенная остыла достаточно для того, чтобы электроны начали прочно удерживаться ядрами и появились стабильные атомы, не распадающиеся сразу же после соударения со следующим ядром.

До образования первых атомов Вселенная состояла из непрозрачной и плотной ядерно-электронной *плазмы*, которая не могла образовывать ни малейшего сгустка, так как они находились под воздействием сил гравитационного притяжения, с одной стороны, и под воздействием энергии поглощаемого ими излучения. После формирования атомов пространство Вселенной стало прозрачным, а вещество – разреженным настолько, чтобы образовывать устойчивые сгустки материи под действием сил гравитации. Но для начала формирования галактик пространство было чересчур разреженным. Этот парадокс получил название *галактическая проблема* и явился весомым аргументом против теории Большого взрыва.

Для устранения этой проблемы в сценарий формирования Вселенной было введено понятие «**темная материя**».



Рис. 2. Темная материя в созвездии Волосы Вероники
(крупное скопление галактик)

В мощный телескоп можно рассмотреть как отдельные звезды, составляющие рукава спиральных галактик, поскольку они излучают достаточное количество света и других волн, так и темные области внутри галактик – облака межзвездной пыли и газа, поглощающие, а не испускающие свет. Однако в течение XX столетия астрофизики постепенно пришли к заключению, что в видимых и ставших привычными образах галактик содержится не более 10% от реально содержащейся во Вселенной материи. Примерно на 90% Вселенная состоит из материи, форма которой остается тайной, поскольку наблюдать ее невозможно, и по совокупности вся эта материя получила название *темной материи*. (Иногда говорят о недостающей массе, хотя в действительности речь должна идти об избыточной массе). В 1933 году швейцарский астроном Фриц Цвики озвучил, что скопление галактик в созвездии Волосы Вероники, судя по всему, удерживается гораздо более сильным гравитационным полем, чем это можно было бы предположить, исходя из видимой массы вещества галактического скопления, а значит, большая часть материи, содержащаяся в этой области Вселенной, остается незримой (рис. 2).

В 1970-е годы Вера Рубин, сотрудница Института Карнеги (Вашингтон), изучала поведение вещества на периферии быстро вращающихся галактик. По всем параметрам на периферию должны были – по принципу центрифуги – выбрасываться значительные массы водорода, само-

го легкого межзвездного газа. Его атомы теоретически должны были бы окутывать галактику паутиной микроскопических спутников и, подчиняясь третьему закону Кеплера, двигаться все медленнее по мере удаления от центра галактической массы. Например, в нашей Солнечной системе, чем дальше планета удалена от центра (Солнца), тем дольше период ее обращения вокруг него. Юпитеру, например, требуется одиннадцать земных лет, чтобы совершить полный годичный оборот вокруг Солнца, и за один годичный цикл он проделывает не только более долгий путь, но и движется по нему медленнее. Однако же на любом удалении от центра галактики водород движется с неизменной скоростью. Можно подумать, будто он «приклеен» к гигантской вращающейся сфере, состоящей из некоей невидимой материи.

Действительно, темная материя незримо присутствует не только в пределах галактик, но и во всей Вселенной, включая межгалактическое пространство, но о ее *природе* ничего не известно. Какая-то ее часть может оказаться обычными небесными телами, не испускающими собственного излучения, например, массивными планетами типа Юпитера. Их существование подтверждается результатами наблюдения за светимостью звезд ближайших галактик, где иногда отмечаются «провалы», которые можно отнести на счет их частичного затмения при прохождении крупных планет на пути лучей по дороге к нам. Практически можно считать подтвержденным и существование межзвездных затмевающих тел, не обладающих собственной энергией излучения в наблюдаемом диапазоне, — они получили название «массивных компактных гало-объектов».

Однако подавляющее большинство ученых сходится на том, что масса невидимой материи Вселенной далеко не ограничивается скрытой от нас массой обычных небесных тел и распыленного вещества, а склонны добавлять к ней и совокупную массу все еще не открытых видов элементарных частиц. Их принято называть *массивными частицами слабого взаимодействия (МЧСВ)*. Они никак не проявляют себя во взаимодействии со световым и прочим электромагнитным излучением. МЧСВ представляют собой пример *холодной темной материи*, поскольку они тяжелые и медленные. Предполагается, что они играли важную роль на стадии формирования галактик ранней Вселенной. Некоторые ученые считают также, что, по крайней мере, часть темной материи пребывает в состоянии быстрых слабовзаимодействующих частиц, таких как нейтрино, представляющих собой пример *горячей темной материи*. После того,

как Вселенная расширилась до некоторой степени прозрачности разделяющего вещество пространства, начали, наконец, формироваться легкие атомные ядра. Но к этому моменту Вселенная расширилась уже настолько, что силы гравитационного притяжения *не могли* противодействовать кинетической энергии разлета осколков Большого взрыва, и все вещество по идее должно было бы разлететься, не дав сформироваться устойчивым галактикам, которые мы наблюдаем. В этом состоял так называемый *галактический парадокс*, ставивший под сомнение саму теорию Большого взрыва.

Если изначально обычная материя была перемешана со скрытыми частицами темной материи, то после Большого взрыва темная материя как раз и могла послужить тем самым сдерживающим элементом. По причине наличия огромного числа скрытых тяжелых частиц она первой стянулась под воздействием сил гравитационного притяжения в будущие ядра галактик, оказавшиеся стабильными, так как между МЧСВ и мощным центростремительным энергетическим излучением взрыва отсутствовало взаимодействие. Таким образом, к моменту формирования ядер атомов темная материя успела оформиться в галактики и скопления галактик, а уже на них начали собираться под воздействием гравитационного поля высвобождающиеся элементы обычной материи.

Теперь принято считать, что первичные ядра галактик образовались именно из этой невидимой темной материи (ее свойства принципиально отличаются от свойств обычной материи) еще до формирования атомов, а образовавшиеся позже атомы «прилепились» к уже существующим протогалактикам, состоящим из темного вещества.

3 минуты

В первые три минуты существования Вселенной стоило двум элементарным частицам – протону и нейтрону, например, – образовать ядро, как оно тут же разбивалось при следующем столкновении. Начиная с четвертой минуты, Вселенная остыла до такой степени, что энергий столкновения стало недостаточно для разрыва внутриядерных связей, и стали образовываться стабильные ядра. На этой стадии сформировались ядра лишь самых легких химических элементов, поскольку вскоре Вселенная расширилась уже настолько, что столкновения стали огромной редкостью. Теория Большого взрыва правильно предсказывает соотношение ядер легких элементов первичного нуклеосинтеза, что является надежным подтверждением правильности самой теории.

10^{-5} секунды

В этот момент – примерно через одну стотысячную долю секунды после запуска механизма рождения Вселенной – кварки слились в элементарные частицы. До этого Вселенная представляла собой компактное море из кварков и лептонов; с этого момента она превратилась в остывающий океан элементарных частиц.

10^{-10} секунды

Эта отметка знаменует новую серию этапных превращений – началось великое объединение фундаментальных сил. Именно в это мгновение произошло объединение электромагнитного и слабого взаимодействий. До этого момента во Вселенной действовало три силы; теперь их стало четыре. Энергии, присутствующие во Вселенной в этот момент, соответствуют максимальным энергиям, которые могут быть развиты в современных земных ускорителях. Поэтому все, что было изложено выше, в принципе поддается экспериментальной проверке; все дальнейшее – чистые гипотезы.

10^{-35} секунды

При этих температурах объединились сильное и электрослабое взаимодействия. До этой доли мгновения во Вселенной действовало две силы, после него их стало три. В тот же миг началось скачкообразное расширение, которое называется *инфляционным*, продолжавшееся до отметки 10^{-32} секунды. Одновременно из Вселенной исчезли *античастицы*. Поведение материи при невероятно высоких энергиях, существовавших во Вселенной через 10^{-35} секунды после ее зарождения, проверено экспериментально, но то, что было раньше, наука пока проверить не может.

10^{-43} секунды

Теоретики предполагают, что в этот миг произошло объединение гравитации с другими силами. До этого во Вселенной действовала единая и неделимая сила. Именно механизм перехода от одной к двум фундаментальным силам взаимодействия и пытаются описать универсальные теории. Что было до этого мгновения, науке неизвестно.

1.2. Доказательства Большого взрыва

Описанная выше картина рождения и развития Вселенной на самых ранних стадиях имеет несколько подтверждений:

1.2.1. Закон Хаббла

В начале XX века была установлена закономерность: чем ярче переменная цефеида, тем дольше длится ее цикл. Вскоре Эдвин Хаббл развил этот результат, связав период цефеиды не с наблюдаемой яркостью, а с присущей звезде светимостью – суммарной энергией, излучаемой звездой в космическое пространство. Так была открыта зависимость «период–светимость». Хаббл же первым использовал открытые им на новом телескопе цефеиды в туманности Андромеды в качестве стандартных свеч и обнаружил, что это вовсе не туманность, а соседняя галактика. За этим последовали открытия целого ряда новых галактик и, наконец, открытие закона Хаббла, установившего, что галактики разбегаются.

Есть несколько классов звезд, названных *переменными*, яркость которых периодически возрастает и убывает из-за колебаний интенсивности поверхностного излучения. В результате наблюдаются циклические изменения свойства звезды, называемые *светимостью* и отражающие суммарный поток лучистой энергии, покидающей поверхность звезды. Особую историческую роль в развитии астрофизики сыграли переменные звезды класса цефеид, получившие свое название в честь созвездия Цефей, в котором находится первая открытая цефеида – δ Цефея.

Если проследить за динамикой изменения светимости цефеиды, выясняется, что ее усиление от минимума до пика происходит значительно быстрее, чем затухание, вне зависимости от разницы между максимальной и минимальной светимостью, которая может составлять от нескольких процентов до многократной. И такие колебания светимости у различных цефеид регулярно повторяются с периодичностью от нескольких суток до нескольких месяцев. При этом *период* цикла изменения светимости (время между максимумами или минимумами яркости) и *перепад* светимости (разность между максимумом и минимумом) остаются постоянными.

Благодаря этому свойству цефеиды послужили для астрономов первой *эталонной свечой* – объектом с заведомо известной светимостью. Электрическая лампочка мощностью 100 Вт, например, является прекрасной эталонной свечой в земных условиях. Именно стандартные свечи позволяют астрономам добавлять в карты звездного неба третье измерение – удаленность – к двум наблюдаемым угловым координатам небесных объектов.

давая в нем сжатия – области повышенного давления, – чередующиеся с разрежениями. Пики сжатия – «гребни» акустической волны – распространяются в среде (воздухе), пока не достигнут его ушей и не воздействуют на барабанные перепонки, от которых поступит сигнал в головной мозг. Частоту воспринимаемых звуковых колебаний по традиции называют тоном или высотой звука: например, частота колебаний 440 герц в секунду соответствует ноте «ля» первой октавы. Так вот, пока спецмашина стоит, будет слышаться неизменный тон ее сигнала.



фиолетовыйкрасный
Рис. 3. Эффект Доплера применительно к галактикам. Пунктирные линии показывают, где находилась бы спектральная линия излучения в случае стационарного источника. В верхней части спектра – синее смещение (источник излучения приближается к наблюдателю); в нижней – красное смещение (источник удаляется от наблюдателя)

Но как только спецмашина тронется с места в сторону наблюдателя, добавится новый эффект. За время с момента испускания одного пика волны до следующего машина проедет некоторое расстояние по направлению к наблюдателю. Из-за этого источник каждого следующего пика волны будет ближе. В результате волны будут достигать ушей чаще, чем это было, пока машина стояла неподвижно, и высота звука, который воспринимается, увеличится. И, наоборот, если спецмашина тронется в обратном направлении, пики акустических волн будут достигать ушей реже,

и воспринимаемая частота звука понизится. Эффект Доплера применим и к любым другим волнам. Если источник видимого света приближается к наблюдателю, длина видимой волны укорачивается, и наблюдается так называемое *фиолетовое смещение* (из всех видимых цветов гаммы светового спектра фиолетовому соответствуют самые короткие длины волн). Если же источник удаляется, происходит кажущееся смещение в сторону красной части спектра (удлинение волн).

Эффект Доплера находит широкое применение и в науке, и в быту. Во всем мире он используется в полицейских радарх, позволяющих отлавливать и штрафовать нарушителей правил дорожного движения, превышающих скорость. Пистолет-радар излучает радиоволновой сигнал (обычно в диапазоне УКВ или СВЧ), который отражается от металлического кузова вашей машины. Обратный на радар сигнал поступает уже с доплеровским смещением частоты, величина которого зависит от скорости машины. Сопоставляя частоты исходящего и входящего сигнала, прибор автоматически вычисляет скорость вашей машины и выводит ее на экран.

Самое главное, Хаббл выяснил, что чем дальше от нас находится галактика, тем с большей скоростью она удаляется. Это явление центростремительного «разбегания» видимой Вселенной с нарастающей скоростью по мере удаления от локальной точки наблюдения и получило название **закона Хаббла**. Математически он формулируется очень просто: $v = Hr$, где v – скорость удаления галактики от нас, r – расстояние до нее, а H – так называемая *постоянная Хаббла*. Последняя определяется экспериментально, и на сегодняшний день оценивается как равная примерно 70 км/с·Мпк (километров в секунду на мегапарсек; 1 Мпк приблизительно равен 3,3 миллиону световых лет). А это означает, что галактика, удаленная от нас на расстояние 10 мегапарсек, убегает со скоростью 700 км/с, галактика, удаленная на 100 Мпк, – со скоростью 7000 км/с и т. д. Действию закона Хаббла подчиняются все открытые к настоящему времени галактики.

1.2.2. Космический микроволновой фон

В 1964 году американские физики Арно Пензиас и Роберт Уилсон обнаружили, что Вселенная наполнена электромагнитным излучением в микроволновом диапазоне частот. Последовавшие измерения показали,

что это характерное классическое излучение черного тела, свойственное объектам с температурой около -270°C (3К), т. е. всего на три градуса выше абсолютного нуля.

Простая аналогия позволяет интерпретировать этот результат: пока огонь в камине горит ярко, угли кажутся желтыми. По мере затухания пламени угли тускнеют до оранжевого цвета, затем до темно-красного. Когда огонь почти затух, угли перестают испускать видимое излучение, но продолжают излучать энергию в инфракрасном невидимом диапазоне частот. Чем холоднее объект, тем ниже излучаемые им частоты и больше длина волн (Закон Стефана–Больцмана). По сути, была определена температура «космических углей» Вселенной после того, как она остывала на протяжении 15 миллиардов лет: ее фоновое излучение оказалось в диапазоне микроволновых радиочастот.

Таким образом, остаточная температура в любой точке Вселенной равна примерно 3К. Исторически это открытие и предопределило выбор в пользу космологической теории Большого взрыва.

1.2.3. Изобилие легких элементов

С момента Большого взрыва должно было пройти около трех минут, прежде чем Вселенная остыла бы настолько, чтобы энергия соударений несколько смягчилась и элементарные частицы начали образовывать устойчивые ядра. Однако первичный нуклеосинтез на ранней стадии расширения Вселенной продолжался очень недолго. Вскоре после первых трех минут частицы разлетелись так далеко друг от друга, что столкновения между ними стали крайне редкими, и это ознаменовало закрытие окна синтеза ядер. Теория Большого взрыва позволяет определить температуру ранней Вселенной и частоту соударений частиц в ней. Как следствие, можно рассчитать соотношение числа различных ядер легких элементов на первичной стадии развития Вселенной. Сравнивая эти прогнозы с реально наблюдаемым соотношением легких элементов (с поправкой на их образование в звездах), обнаруживается удивительное соответствие между теорией и наблюдениями.

Помимо трех приведенных выше доказательств (микроволновой фон и соотношение легких элементов) недавние работы показали, что космология Большого взрыва и современная теория элементарных частиц совместно разрешают многие кардинальные вопросы устройства Вселен-

ной. Конечно, проблемы остаются: неизвестна сама первопричина возникновения Вселенной; не ясно, действовали ли в момент ее зарождения нынешние физические законы? Но убедительных аргументов в пользу теории Большого взрыва на сегодняшний день накоплено более чем достаточно.

1.2.4. Нерешенные проблемы ранней Вселенной

В конце 1970-х годов оставались нерешенными несколько фундаментальных проблем, связанных с ранней Вселенной, а именно:

– *Проблема антивещества*. Согласно законам физики, вещество и антивещество имеют равное право на существование во Вселенной, однако Вселенная практически полностью состоит из вещества. Почему так произошло?

– *Проблема горизонта*. По фоновому космическому излучению можно определить, что температура Вселенной везде примерно одинакова, однако отдельные ее части (скопления галактик) не могли находиться в контакте (как принято говорить, они были за пределами *горизонта* друг друга). Как же получилось, что между ними установилось тепловое равновесие?

– *Проблема распрямления пространства*. Вселенная, судя по всему, обладает именно той массой и энергией, которые необходимы для того, чтобы замедлить и остановить хаббловское расширение.

Ключом к решению этих проблем послужила идея американского физика Алана Гута (1981 г.) о том, что выделение сильных взаимодействий из единого поля, случившееся примерно через 10^{-35} секунды после рождения Вселенной (только задумайтесь – это 34 нуля и единица после запятой!), стало поворотным моментом в ее развитии. Произошел *фазовый переход* вещества из одного состояния в другое в масштабах Вселенной – явление, подобное превращению воды в лед. И как при замерзании воды, ее беспорядочно движущиеся молекулы вдруг «схватываются» и образуют строгую кристаллическую структуру, так под влиянием выделившихся сильных взаимодействий произошла мгновенная перестройка, своеобразная «кристаллизация» вещества во Вселенной.

Алану Гуту удалось показать, что при разделении сильных и слабых взаимодействий во Вселенной произошло нечто подобное – скачкообразное расширение, которое называется *инфляционным*, и которое во много

раз быстрее обычного хаббловского расширения. Примерно за 10^{-32} секунды Вселенная расширилась на 50 порядков – была меньше протона, а стала размером с грейпфрут (для сравнения: вода при замерзании расширяется всего на 10%). И это стремительное инфляционное расширение Вселенной снимает две из трех вышеназванных проблем, непосредственно объясняя их.

Решение *проблемы распрямления пространства* нагляднее всего демонстрирует следующий пример: представьте координатную сетку, нарисованную на тонкой эластичной карте, которую затем смяли как попало. Если теперь взять и сильно встряхнуть эту смятую в комок эластичную карту, она снова примет плоский вид, а координатные линии на ней восстановятся, независимо от того, насколько сильно она была деформирована. Аналогичным образом, неважно, насколько искривленным было пространство Вселенной на момент начала ее инфляционного расширения, главное – по завершении этого расширения – пространство оказалось полностью распрямленным. А поскольку из теории относительности известно, что кривизна пространства зависит от количества материи и энергии в нем, становится понятно, почему во Вселенной находится ровно столько материи, сколько необходимо, чтобы уравновесить хаббловское расширение.

Объясняет инфляционная модель и *проблему горизонта*, хотя не так прямо. Из теории *излучения черного тела* следует, что излучение, испускаемое телом, зависит от его температуры. Таким образом, по спектрам излучения удаленных участков Вселенной можно определить их температуру. Такие измерения показали, что **в любой наблюдаемой точке Вселенной температура (с погрешностью измерения до четырех знаков после запятой) одна и та же**. Если исходить из модели обычного хаббловского расширения, то вещество сразу же после Большого взрыва должно было разлететься слишком далеко, чтобы температуры могли уравниваться. Согласно же инфляционной модели, вещество до момента $t = 10^{-35}$ секунды оставалось гораздо более компактным, чем при хаббловском расширении. Этого чрезвычайно короткого периода было вполне достаточно, чтобы установилось термическое равновесие, которое не было нарушено на стадии инфляционного расширения и сохранилось до сих пор.

Инфляционная гипотеза не снимает *проблемы антивещества*, но эту проблему можно объяснить другими процессами, происходившими в то же время: при бурном образовании элементарных частиц в ранней Вселенной примерно на 100 000 001 обычных частиц пришлось 100 000 000

античастиц. В следующую долю секунды частицы и античастицы, объединившись в пары, аннигилировали друг друга с гигантским выбросом энергии – масса превратилась в излучение. После такой «прополки» во Вселенной остался лишь жалкий клочок обычной материи. Вот из этого «космического мусора» и состоит вся известная нам сегодня Вселенная.

Мир античастиц – своего рода зеркальное отражение знакомого нам мира. Масса античастицы в точности равняется массе частицы, которой она вроде бы соответствует, но все ее остальные характеристики противоположны прообразу. Например, электрон несет отрицательный электрический заряд, а парная ему античастица – «позитрон» (производное от «позитивный электрон») – положительный. У протона заряд положительный, а у антипротона – отрицательный. И так далее. При взаимодействии частицы и парной ей античастицы происходит их взаимная аннигиляция – обе частицы прекращают свое существование, а их масса преобразуется в энергию, которая рассеивается в пространстве в виде вспышки фотонов и прочих сверхлегких частиц.

1.3. Первичный нуклеосинтез

На ранних стадиях эволюции во Вселенной не было ни одного из тех химических элементов, из которых состоит наша планета и все живое. Когда температура опустилась настолько, что энергия частиц стала меньше массы протона, начался синтез протонов, электронов и нейтронов. Их содержание определялось условиями равновесия: при столкновении протонов и электронов рождаются нейтроны, которые потом самопроизвольно распадаются на протоны и электроны, столкновение нейтрона и позитрона (античастица электрона) дает протон. Также в этих реакциях испускаются нейтрино.

Затем в истории Вселенной наступает эпизод, в котором условия напоминают нынешнее состояние вещества в недрах звезд, и водород может превращаться в более тяжелые элементы. Начинается первичный нуклеосинтез (синтез ядер) – образование тяжелых элементов из более легких, но этот процесс длится всего несколько минут.

Плотность и температура вещества быстро убывали, что приводило к резкому замедлению ядерных реакций. Поэтому успевают появиться лишь гелий и незначительное количество дейтерия, лития и бериллия.

Рождение химических элементов начинается с самой простой реакции: протон объединяется с нейтроном, образуя ядро дейтерия – тяжелого водорода. Пока позволяют плотность и температура, дейтерий взаимодействует с другими частицами: если с протоном – получается гелий-3 – легкий изотоп гелия, содержащий два протона и один нейтрон, а если с нейтроном – тритий, сверхтяжелый изотоп водорода (один протон, два нейтрона). Как видим, в ядерные реакции частицы всегда вступают парами. Все дело в том, что процессы, требующие одновременного взаимодействия нескольких частиц, крайне маловероятны. На следующем этапе гелий-3 присоединяет еще один нейтрон (или тритий – протон), и образуется **ядро гелия-4**, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, – одно из самых устойчивых во Вселенной.

Это ядро испускается во многих реакциях и даже получило у физиков специальное название – **альфа-частица**. Во многих случаях ядро гелия рассматривают как частицу, забывая о его сложном внутреннем строении. Казалось бы, гелий-4 может и дальше присоединять протоны и нейтроны, но в природе нет устойчивых ядер с массой 5 и 8 единиц, то есть состоящих из пяти и восьми нуклонов (протонов и нейтронов). В любом сочетании пяти протонов и нейтронов одна из частиц оказывается лишней и выбрасывается из ядра, которое упорно хочет остаться альфа-частицей. И даже если попробовать объединить сразу шесть нуклонов по одной из схем «гелий-3 + тритий», «гелий-3 + гелий-3», «гелий-4 + дейтерий», все равно, как правило, образуется гелий-4, а лишняя пара нуклонов отторгается.

Перепрыгнуть этот барьер можно, только если гелий-4 сольется с ядром трития и гелия-3. Тогда рождаются соответственно литий-7 или бериллий-7. Но для этих реакций нужна более высокая энергия столкновения, то есть более высокая температура. Быстрое расширение Вселенной в первые минуты после Большого взрыва такой возможности не предоставляет. В итоге лития и бериллия образуется очень мало. Процесс синтеза прекращается. Вселенная приобретает химический состав, представленный водородом (75%) и гелием (25%). Еще остается очень небольшое количество дейтерия, гелия-3 и лития (ядра трития и бериллия-7 неустойчивы и вскоре распадаются).

1.4. Звездные скопления – галактики

Рассчитывая расстояние до цефеид на окраинах туманности Андромеды (теперь ее называют галактика Андромеды), Хаббл пришел к базовому выводу о структуре Вселенной: **она состоит из набора огромных звездных скоплений – галактик**. Именно они и представляются далекими туманными «облаками», поскольку отдельных звезд на столь огромном удалении рассмотреть невозможно.

Небольшие возмущения плотности в веществе Вселенной, состоящей из водорода и гелия, с течением времени увеличивались. Наблюдалась так называемая «гравитационная неустойчивость». Именно она привела к формированию крупномасштабных неоднородностей вещества, которые затем проэволюционировали в галактики.

В межзвездном облаке идет непрерывная борьба двух тенденций – сжатия и расширения. Сжатию облака способствуют его собственная гравитация и внешние силы (например, взрывы соседних звезд), а расширению – давление газа и магнитных полей внутри облака. Обычно эта борьба заканчивается победой сил сжатия. Дело в том, что звездный свет не проникает снаружи в непрозрачное облако и не нагревает его, а инфракрасное излучение молекул и пыли легко выходит из облака и уносит тепло. В результате этого «антипарникового» эффекта в наиболее плотной части облака температура опускается почти до -270°C , и давление газа падает настолько, что равновесие сил неминуемо нарушается, и эта область начинает безудержно сжиматься. Если масса сжимающегося газа невелика, то образуется одна звезда, а если газа много, то в ходе его сжатия и фрагментации рождается группа тел – звездное скопление.

Первая правильная мысль о происхождении звезд принадлежит еще Ньютону. Поняв всеобъемлющий характер гравитации, он стал размышлять о ее роли в развитии небесных тел. В письме преподобному Ричарду Бентли от 10 декабря 1692 года Ньютон пишет: «...если бы все вещество нашего Солнца и планет и все вещество Вселенной было бы равномерно рассеяно в небесных глубинах, и если бы каждая частица имела врожденное тяготение ко всем остальным, и если бы, наконец, пространство, в котором была бы рассеяна эта материя, было бы конечным, вещество снаружи этого пространства, благодаря указанному тяготению, влеклось бы ко всему веществу внутри и вследствие этого упало бы в середину всего пространства и образовало бы там одну огромную сферическую мас-

су. Однако если бы это вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, оно никогда не могло бы объединиться в одну массу, но часть его сгущалась бы тут, а другая там, образуя бесконечное число огромных масс, разбросанных на огромных расстояниях друг от друга по всему этому бесконечному пространству. Именно так могли образоваться и Солнце, и неподвижные звезды».

В действительности даже в ограниченном пространстве межзвездного облака гравитация не может собрать все вещество в одном месте. Космос неспокоен: сквозь облако в разных направлениях движутся звуковые и ударные волны, сжимая и разрежая отдельные участки газа. Гравитация лишь подхватывает и доводит до конца сжатие отдельных фрагментов облака. Это понял и довел идею Ньютона до уровня строгой математической теории другой английский физик Джеймс Джинс двести лет спустя.

По всей наблюдаемой Вселенной разбросаны миллиарды галактик – звездных скоплений. Многолетние исследования показали, что структура их в принципе не сложна. Они подразделяются на три основных типа: эллиптические, спиральные и неправильные. Эллиптические и спиральные галактики связаны между собой генетически, галактики неправильной формы – шаровидные, крабовидные, возможно, представляют собой более ранние этапы развития галактик, когда еще не приобретена форма эллипса. Наиболее распространенными являются спиралевидные галактики, к которым относится Млечный Путь.

Развитие радиоастрономии, рентгеновской и инфракрасной астрономии позволило выявить галактики, испускающие мощные потоки этих видов излучения. Различают два типа активных галактик.

1. «Взрывающиеся» спиральные или неправильные галактики, в которых большая часть межзвездного вещества сразу переходит в звезды. Свет от этих молодых звезд сразу же поглощается плотными облаками пыли вокруг них, но энергия излучается в виде инфракрасных, тепловых лучей. Начиная с 1983 года, выявлены тысячи взрывающихся галактик.

2. К этому типу относят еще более активные галактики, в центре которых имеется мощный источник энергии – активное ядро. Эта небольшая область, по-видимому, не больше Солнечной системы, выделяет столько же энергии, сколько 10^{12} Солнц, причем этот источник способен выбрасывать в окружающее пространство узкие пучки энергии. Впоследствии обнаружили еще некоторые противоречивые свойства таких галактик,

после чего их стали называть квазарами или квазизвездными объектами. Сейчас известно более 1500 таких источников радиоизлучения.

1.4.1. Млечный Путь

Солнечная система входит в состав бесчисленного скопления звезд, туманностей и других образований еще более крупной системы – Галактики. На темном фоне ночного неба мы наблюдаем Галактику как бы в разрезе, и, поскольку в целом ее форма напоминает диск, она представляется нам как светлая полоса, образованная далекими звездами. Эта звездная полоса на небосводе еще в давние времена получила название Млечный Путь – Галактика, который сохранился до настоящего времени. Но понимание его сущности крайне изменилось – от произвольного мифологического суждения до современного физического осмысливания.

При взгляде сбоку галактики представляют собой диск или двояковыпуклую линзу. Диаметр Галактики составляет 68 тыс. световых лет. Толщина диска Галактики в 8 раз меньше его диаметра. Крупными структурными элементами Галактики являются: ее ядро – сфероидальная область повышенной звездной плотности и спиральные ветви или рукава – плоская составляющая. Общее число звезд, входящих в нашу Галактику, достигает 100–200 миллиардов, их общая масса превышает массу Солнца в триллион (10^{11}) раз, (масса Солнца равна $1,98 \cdot 10^{21}$ т, то есть – число с 19-ю нулями). В одной из ветвей Галактики находится Солнечная система, которая делает полный оборот вокруг центра Галактики приблизительно за период от 200 до 275 млн лет (галактический год), двигаясь по орбите со скоростью 250 км/сек. Эта скорость в 8 раз больше скорости движения Земли вокруг Солнца (29,8 км/сек). Солнце удалено от оси вращения Галактики на расстояние 30 тыс. св. лет и лежит почти в экваториальной плоскости на расстоянии 30 св. лет от экватора Галактики.

1.4.2. Метагалактики

Галактики объединяются в еще более крупные космические системы. Млечный Путь входит в группу из 17 галактик, называемую Метагалактикой. В нее, помимо Млечного Пути, входят: туманность Андромеды – гигантская спиралевидная галактика, Малое Магелланово Облако – неправильная галактика, Большое Магелланово Облако – нечто промежу-

точное между спиральной и неправильной галактиками и еще ряд малых неправильных и эллиптических галактик. Раньше полагали, что между галактиками простирается вакуум – «пустота». В настоящее время считается установленным, что между галактиками, как и между звездами, пространство заполнено потоками энергии и межзвездным газом. Этот газ ионизирован, т. е. представляет собой плазму – смесь ядер водорода, гелия и других элементов, а также электронов и других частиц.

1.5. Образование химических элементов в звездах

1.5.1. Первое поколение звезд

Звезды первого поколения образовались путем конденсации первичного газа. Как раз в них на спокойной стадии эволюции в результате термоядерных реакций синтеза образовались химические элементы от углерода до железа. В их недрах при температуре около 10 миллионов градусов и плотности в несколько раз выше, чем у самого плотного металла на Земле, снова возникают условия для звездного нуклеосинтеза.

В звездном веществе вначале почти нет свободных нейтронов (в свободном состоянии они живут всего лишь около 15 минут), и поэтому дейтерий образуется при столкновении двух протонов. Один из них в процессе слияния превращается в нейтрон, испуская позитрон – положительно заряженную античастицу электрона, – чтобы избавиться от лишнего заряда. В отсутствие нейтронов из дейтерия не образуется тритий. Дейтерий соединяется с еще одним протоном и превращается в гелий-3. Прямой переход от него к гелию-4 путем захвата нейтрона, как в ранней Вселенной, невозможен, но тут имеется ряд обходных путей.

Два ядра гелия-3 могут, столкнувшись, образовать крайне неустойчивое ядро бериллия-6 (4 протона + 2 нейтрона), которое мгновенно разваливается на гелий-4 и пару протонов. Другой вариант сложнее: в реакции гелия-3 и гелия-4 рождаются ядра бериллия и лития с атомным весом 7. Однако, присоединяя еще один протон, они становятся неустойчивыми и сразу разваливаются на два ядра гелия-4.

Итогом любого из этих процессов становится превращение четырех протонов в одно ядро гелия-4. Важно, что масса ядра гелия-4 немного (примерно на 0,7%) меньше массы четырех протонов. Куда исчезает из-

лишек массы? В соответствии все с той же формулой $E = mc^2$ он превращается в энергию. Именно за счет этого дефекта массы и светят звезды. И, что немаловажно, звездный термоядерный реактор может сам себя регулировать: если выделяется слишком много энергии, звезда немного расширяется, вещество охлаждается и скорость реакции, которая очень сильно зависит от температуры, снижается. Если же энергии мало, то происходит обратный процесс. В итоге звезда стабильно поддерживает температуру на уровне, соответствующем достаточно низкому темпу реакций. Поэтому звезды (по крайней мере, некоторые из них) живут достаточно долго, чтобы хватило времени для биологической эволюции и возникновения жизни от самой примитивной до самой высокоорганизованной.

В конце концов, запасы водорода в звезде исчерпываются, и начинается ядерное горение гелия. В начале две альфа-частицы (гелий-4), сливаясь, образуют неустойчивое ядро бериллия-8. Жизнь его чрезвычайно коротка, $3 \cdot 10^{-16}$ с (это меньше одной миллиардной доли секунды), но при достаточно высокой плотности и температуре даже этого крошечного интервала хватает, чтобы иногда в реакцию с бериллием успела вступить еще одна альфа-частица, и тогда образуется углерод-12.

Затем уже углерод может захватывать альфа-частицы, давая кислород. Таким образом, два основных элемента, необходимых для появления жизни, рождаются в звездах. Превращение углерода в кислород идет настолько эффективно, что последнего во Вселенной оказывается даже несколько больше углерода. Если бы параметры ядерных частиц были чуть иными, то почти весь углерод «перегорал» бы в кислород, что делало бы жизнь в той форме, которую мы знаем, крайне редкой или даже невозможной.

1.5.2. Второе поколение звезд

Более тяжелые элементы появлялись благодаря процессам вспышек новых и сверхновых звезд. Вспышки сверхновых выбрасывали в межзвездную среду тяжелые элементы. Поэтому звезды следующих поколений формировались из газа, уже обогащенного тяжелыми элементами. Именно из такого вещества сформировались наше Солнце и планетная система.

Относительно небольшие звезды, вроде нашего Солнца, останавливаются на этапе синтеза гелия. Те, что в несколько раз массивнее, произ-

водят углерод и кислород, и только самые большие, превосходящие 10 солнечных масс, могут в конце жизни продолжить синтез более тяжелых элементов. После истощения запасов гелия их внутренние области сжимаются, разогреваются, и в них начинается «горение» углерода. Два ядра углерода, соединяясь, дают неон и альфа-частицу или натрий и протон, или магний и нейтрон. Появившиеся протоны и нейтроны тоже не пропадают зря. Они превращают углерод в азот, кислород и далее, за счет захвата альфа-частиц, – в неон, кремний, магний и алюминий – то есть щелочно-земельные металлы, из которых состоит твердая поверхность Земли.

После углерода вне очереди начинает «гореть» неон, причем делает он это «неправильным» образом: вместо того, чтобы сразу слиться с каким-нибудь другим ядром и увеличить свою массу, ядра неона под действием особо энергичных гамма-квантов распадаются на кислород и альфа-частицу. А затем получаемые альфа-частицы, взаимодействуя с другими ядрами неона, дают магний. Так что в итоге два ядра неона позволяют возникнуть одному кислородному и одному магниевому ядрам.

После истощения запасов неона ядро звезды становится кислородно-магниевым, оно снова сжимается, температура растет, и синтез продолжается. Теперь ядра кислорода, попарно сливаясь, превращаются в кремний или серу. Кроме того, появляется немного аргона, кальция, хлора и других элементов.

Следующий на очереди – кремний. Напрямую два ядра кремния слиться не могут – из-за большого заряда слишком велико электрическое отталкивание между ними. Поэтому начинает идти множество реакций с участием альфа-частиц. На этой стадии возникают разные элементы вплоть до железа.

1.5.3. Образование ядер элементов и изотопов

Протоны и нейтроны (собирательно их называют *нуклонами*) не являются в строгом смысле слова элементарными частицами. Они состоят из трех кварков, крепко связанных *сильным ядерным взаимодействием*. Разбить нуклон на отдельные кварки невозможно: требуемой для этого энергии достаточно для рождения новых кварков, которые, объединившись с осколками исходного нуклона, вновь образуют составные частицы.

Сильное взаимодействие не полностью замкнуто внутри нуклонов, а действует еще и на небольшом расстоянии от них. Если два нуклона,

скажем, протон и нейтрон, сблизятся почти вплотную, ядерные силы свяжут их вместе и появится составное *атомное ядро* – в данном случае дейтерий (тяжелый водород). Соединяя вместе разное число протонов и нейтронов, можно получить все многообразие ядер, но далеко не каждое из них будет устойчивым. Ядро, в котором слишком много протонов или нейтронов, разваливается на части, даже не успев толком образоваться. Физикам известно более трех тысяч сочетаний протонов и нейтронов, способных хотя бы некоторое время продержаться вместе. Есть ядра, которые живут лишь краткую долю секунды, другие – десятки лет, а есть и такие, что способны ждать своего часа миллиарды лет. И лишь несколько сотен ядер считаются стабильными – их распад никогда не наблюдался.

Химики обычно различают не любые два ядра, а только разные *элементы*, то есть ядра с разным числом протонов. Собственно, химики вообще в ядро не заглядывают, а изучают лишь поведение электронов, окружающих его в спокойной обстановке. Их число как раз равно числу протонов, что делает атомы электрически нейтральными. Всего на сегодня известно 118 элементов, но только 92 из них обнаружены в природной среде, остальные получены искусственно на ядерных реакторах и ускорителях. **Большинство элементов представлено ядрами с разным числом нейтронов. Такие вариации называют изотопами.** У некоторых элементов известно до сорока изотопов, их различают, указывая число нуклонов в ядре. Например, уран-235 и уран-238 – два изотопа 92-го элемента урана со 143 и 146 нейтронами соответственно. Большинство изотопов каждого элемента (а у некоторых и все) неустойчивы и подвержены *радиоактивному распаду*. Это делает изотопный состав важным источником информации об истории вещества. Например, по соотношению радиоактивных изотопов и продуктов их распада определяют возраст органических остатков, горных пород, метеоритов и даже некоторых звезд. Впрочем, и соотношение стабильных изотопов тоже может о многом рассказать. Например, климат Земли в далеком прошлом определяют по изотопам кислорода-16 и -18 в отложениях антарктических льдов: молекулы воды с тяжелым изотопом кислорода менее охотно испаряются с поверхности океана, и их становится больше при теплом климате. Для любых таких изотопных исследований принципиально, чтобы изучаемый образец с момента возникновения не обменивался веществом с окружающей средой.

1.5.4. Образование тяжелых элементов

Железо (и близкий к нему никель) выделяется из всех элементов тем, что у него максимальная энергия связи. Нуклоны нельзя упаковать эффективнее: чтобы разбить ядро железа на части или чтобы создать из него более тяжелые ядра, требуется затратить энергию. Поэтому первое время было непонятно, как может образование элементов в звездах идти дальше железа, и существование во Вселенной тяжелых ядер, как, например, у золота или урана, оставалось совершенно необъяснимым. Подход к объяснению был найден в середине 1950 годов, когда были предложены сразу два механизма образования в звездах элементов тяжелее железа. Оба они основываются на способности ядер захватывать нейтроны.

1.5.4.1. s-процесс

Первый из этих механизмов получил название медленного захвата нейтронов, или s-процесса (от англ. *slo*y – «медленный»). Он протекает в конце жизни звезд с массой от 1 до 3 солнечных, когда они достигают стадии красного гиганта. Причем идет этот процесс не в плотном горячем ядре звезды, а в слоях, лежащих выше. У таких относительно легких звезд стадия гиганта имеет большую продолжительность, измеряемую десятками миллионов лет, и этого хватает для существенного преобразования вещества.

S-процесс протекает при низкой концентрации нейтронов, которые могут выделяться в течение нескольких видов реакций. Например, углерод-13, захватив альфа-частицу, превращается в кислород-16, и при этом испускается нейтрон. Свободные нейтроны легко проникают в ядра атомов и увеличивают их массу. Правда, если нейтронов станет слишком много, ядро потеряет устойчивость и развалится на части. Но, поскольку свободных нейтронов в красных гигантах немного, у ядра есть время, чтобы относительно безболезненно ассимилировать пришельца, испустив при необходимости электрон. При этом один из нейтронов в ядре становится протоном, и заряд ядра на единицу увеличивается, что соответствует превращению одного элемента в другой – следующий по порядку в таблице Менделеева. Таким путем можно получить очень тяжелые элементы, например, свинец и барий или технеций. В свое время открытие этого тяжелого и достаточно быстро распадающегося элемента в атмосферах красных гигантов было даже истолковано некоторыми учеными как свидетельство в пользу существования внеземных цивилиза-

ций! На самом же деле он просто выносится из недр на поверхность за счет перемешивания вещества.

Когда жизнь такого красного гиганта подходит к концу, его оболочка рассеивается в окружающем пространстве за счет звездного ветра или образования планетарной туманности. Тем самым межзвездная среда пополняется наработанными за время жизни звезды тяжелыми элементами, и постепенно химический состав Галактики эволюционирует за счет звездного нуклеосинтеза и выброса звездами тяжелых элементов. К тому моменту, когда образовалась Солнечная система, этот процесс шел уже 8 миллиардов лет, и около 1% межзвездного вещества успело превратиться в тяжелые элементы, из которых, в частности, сложена наша планета.

Практически все атомы человеческого тела в свое время побывали в недрах звезд. Многие из них пережили катастрофические взрывы сверхновых, и, более того, некоторые образовались именно в моменты таких взрывов. Взрывы сверхновых очень важны уже потому, что это эффективный способ выбросить в космос наработанные в звезде элементы. Если итогом взрыва, как это чаще всего бывает, становится нейтронная звезда, в нее превращается только относительно небольшое ядро красного гиганта, состоящее в основном из железа и никеля. Например, при начальной массе звезды в 20 солнечных в нейтронную звезду превратится не более 7% вещества, все остальное выметается взрывом в космос и доступно для формирования новых светил.

1.5.4.2. r-процесс

Поддержанием космического круговорота вещества роль сверхновых не исчерпывается. Прямо во время взрыва в них могут образовываться новые элементы. Примерно 10 секунд новорожденная нейтронная звезда успевает побыть «алхимиком». Перед самым взрывом структура массивной звезды подобна луковице. Ядро окружено несколькими оболочками, состоящими из все более легких элементов. В тот самый момент, когда ядро начинает катастрофически сжиматься, превращаясь в нейтронную звезду или черную дыру, по лежащим выше слоям от центра наружу пробегает волна взрывного ядерного горения. В результате химический состав вещества сильно сдвигается в сторону тяжелых элементов.

Считается, что наиболее эффективно обогащают Вселенную тяжелыми элементами звезды с массами от 12 до 25 солнечных. Их железное ядро окружает мощная кремниво-кислородная оболочка, которая после

сброса дает элементы от натрия до германия (включая железо). В более массивных звездах тяжелые элементы проваливаются внутрь черной дыры, и наружу ускользают только достаточно легкие. Звезды поменьше, с массами в 8–12 солнечных, не обладают такой оболочкой, и поэтому элементов группы железа в них образуется мало. Зато... появляются более тяжелые элементы.

Когда силы гравитации сжимают ядро звезды, ядра атомов буквально спрессовываются друг с другом. Носящиеся между ними электроны, оказавшись в ловушке, вдавливаются в ядра и сливаются с протонами, превращая их в нейтроны. При этом выделяются нейтрино – трудноуловимые частицы, которые обычно легко пронизывают всю толщу звезды и уходят в космос. Но в момент образования нейтронной звезды нейтрино становится так много, что пренебрегать ими уже нельзя. Возникает так называемый нейтринный ветер. Подобно тому, как давление света в массивных звездах приводит к истеканию вещества в виде звездного ветра, нейтрино увлекают протоны и нейтроны. Даже если вначале нейтронов было не слишком много, они появляются в результате реакций между протонами и нейтрино. В веществе образуется избыток нейтронов, которые могут проникать в ядра, формируя все более и более тяжелые изотопы. Из-за огромного потока нейтронов ядра ими буквально переполняются, отчего становятся крайне нестабильными и начинают очень быстро избавляться от избыточной нейтронизации – нейтроны в них превращаются в протоны. Но едва только это происходит, как новые волны нейтронов опять доводят ядра «до предела».

Этот процесс, длящийся лишь несколько секунд, получил название г-процесса (от англ. rapid – «быстрый»). Его итогом становятся ядра всех масс элементов вплоть до самых тяжелых. Например, для выявления последствий г-процесса часто ищут следы такого редкого элемента, как европий, поскольку он, вероятнее всего, рождается только с помощью этого механизма. В г-процессе образуются, например, платина и актиноиды – тяжелые радиоактивные элементы, к которым относится, в частности, уран. Относительное содержание изотопов последнего, равно как и тория, часто используют для оценки возраста звезд.

Также в ветре новой нейтронной звезды могут идти реакции с участием заряженных частиц – протонов и ядер гелия, – увлеченных потоком нейтрино. Так образуются цирконий, серебро, йод, молибден, палладий и многие другие элементы.

1.5.5. Современные проблемы астрофизики

Теория всех этих процессов очень сложна, поскольку одновременно требуется учитывать множество эффектов, среди которых не все еще полностью ясны. Исследования в этой области идут очень интенсивно, и возможны интересные открытия. Например, обсуждаются сценарии, в которых вещество, захваченное в сверхсильных магнитных полях новорожденных магнитаров (намагниченных нейтронных звезд), позволяет производить тяжелые элементы в r-процессе. Для проверки подобных идей требуются сложные трехмерные расчеты на суперкомпьютерах, которые еще только предстоит произвести.

Жизнь не могла возникнуть в течение первых миллиардов лет после Большого взрыва – тогда просто не было в достаточном количестве многих необходимых элементов.

Состав вещества во Вселенной продолжает медленно изменяться и в наши дни: усилиями триллионов звезд доля элементов тяжелее гелия постепенно растет. Наблюдения показывают, что у звезд с содержанием элементов тяжелее гелия выше вероятность возникновения планетных систем. А значит, химическая эволюция Вселенной пока благоприятствует появлению разумных существ.

Вопросы к 1 главе

1. Что представляла собой Вселенная в момент Большого взрыва, и какие процессы происходили в ней?
2. Какие частицы являются основным структурным элементом Вселенной на данном этапе развития науки?
3. Назовите фундаментальные силы взаимодействия между частицами.
4. Какие факты приводятся в подтверждение Большого взрыва?
5. Чему равна остаточная температура в любой точке Вселенной?
6. Что такое эффект Доплера или красное смещение?
7. Закон Хаббла. Чему равна постоянная Хаббла?
8. Что такое α -частица?
9. Благодаря каким процессам образуются химические элементы?
10. Что такое космический круговорот вещества?
11. Почему жизнь не могла возникнуть в первые миллиарды лет после Большого взрыва?
12. Галактики, их типы и эволюция.
13. Роль «темной» материи в формировании галактик.
14. Галактика – Млечный Путь: структура, размеры и движение.

Глава 2

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

2.1. Звезды

Звезды, наблюдаемые на ночном небе, очень разнообразны, но в основе этого разнообразия лежит очень простая схема, зависящая от массы и возраста звезды. Можно сказать, что процесс смерти одних звезд является причиной рождения других звезд.

2.1.1. Рождение звезды

Звезды рождаются из межзвездного газа – разреженной смеси водорода, гелия и небольшого количества других элементов, – заполняющего пространство между уже существующими звездами Галактики. В своем естественном состоянии эта смесь слишком разрежена для того, чтобы образовать плотные газовые шары звезд. Но межзвездная среда подвергается воздействию различных видов ударных волн, что приводит к сжатию газа в более плотные облака, в которых и происходит зарождение звезд.

Известно два вида ударных волн. Спиральная форма Галактики, такая, как у нашего Млечного Пути, обусловлена гравитацией, то есть притяжением, и эта структура вращается со скоростью, отличной от скорости вращения галактического газа. Таким образом, по мере вращения спирали происходит постоянный процесс скопления газа на новых участках. Кроме того, быстро движущиеся газы взорвавшейся звезды (сверхновой) могут «захватить» разреженный газ и сжать его в плотные облака. Эти облака называют «молекулярными», так как в них имеется значительное количество молекул окиси углерода и спирта.

В центре молекулярного облака плотность газа настолько высока, что собственные гравитационные силы увлекают его к центру, но турбулентность не позволяет всему газу устремляться к центру, и облако распадается на отдельные фрагменты, каждый из которых может начать сжиматься до образования звезды.

Таким образом:

1. Жизнь каждой звезды начинается с конденсации (сжатия) газа и пыли, рассеянных в пространстве.

2. Как только начинают действовать гравитационные силы, зародыш звезды начинает сжиматься.

3. По мере сжатия температура вблизи центра будущей звезды растет, пока не станет достаточной для запуска ядерных реакций.

4. Объект превращается в настоящую звезду, излучающую огромные количества энергии.

В недрах звезд действуют природные термоядерные реакторы, синтезирующие химические элементы. Протекание этих реакций в недрах Солнца сегодня прямо регистрируется на Земле (а точнее – под землей) нейтринными детекторами. Установлено также, сколько времени живут звезды и как заканчивается их жизнь: чем массивнее звезда, тем ярче она светит и быстрее сжигает свое ядерное горючее. Если звезды типа Солнца живут около 10 миллиардов лет, то гиганты, которые в 10 раз массивнее, полностью сгорают всего за 25 миллионов лет. А вот карлики с массой в половину солнечной должны жить почти 100 миллиардов лет – много больше нынешнего возраста Вселенной.

В конце жизни звезда обычно сбрасывает с себя верхний слой вещества. Массивные светила делают это взрывным образом, становясь сверхновыми, а маломассивные – спокойно, окутывая себя медленно расширяющейся планетарной туманностью. Но в любом случае в конце эволюции от звезды остаются разлетающееся газовое облако и плотный компактный объект – белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра.

2.1.2. Главная последовательность

Ядерные реакции в недрах звезд начинаются при температуре примерно 10 000 000°C, при этом происходит превращение водорода в гелий. Высвобождающаяся энергия «просачивается» наружу и излучается поверхностью звезды.

Между выделением энергии и гравитацией устанавливается настолько устойчивое равновесие, что на протяжении миллионов лет и более звезда практически не меняется. Этот период «выгорания водорода» называется «главной последовательностью» и фактически представляет собой самую продолжительную стадию в жизни звезды, ~90 % времени ее эволюции. Главную последовательность проходят все звезды независимо от массы.

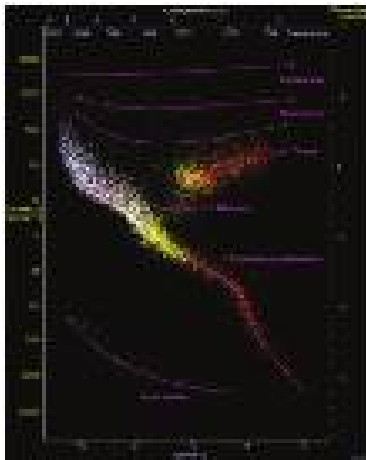


Рис. 4. Диаграмма Герцшпрунга–Рассела

На диаграмме Герцшпрунга–Рассела главная последовательность – область, содержащая звезды, источником энергии которых является термоядерная реакция синтеза гелия из водорода. Она расположена в окрестностях диагонали и проходит из верхнего левого угла (высокие светимости, ранние спектральные классы) в правый нижний угол (низкие светимости, поздние спектральные классы) диаграммы. Звезды главной последовательности имеют одинаковый источник энергии, в связи с чем их светимость и температура (спектральный класс) определяются их массами. Поэтому начало

левой части главной последовательности представлено голубыми звездами с массами ~ 50 солнечных, конец правой – красными карликами с массами $\sim 0,08$ солнечных.

Выгорание водорода в центральных областях звезды приводит к образованию изотермического гелиевого ядра, переходу к стадии красного гиганта и уходу звезды с главной последовательности. Относительно краткая эволюция красных гигантов приводит, в зависимости от их массы, к образованию белых карликов, нейтронных звезд или черных дыр.

Участок главной последовательности звездных скоплений является индикатором их возраста. Так как темпы эволюции звезд пропорциональны их массе, то для скоплений существует «левая» точка обрыва главной последовательности в области высоких светимостей и ранних спектральных классов, зависящая от возраста скопления, поскольку звезды с массой, превышающий некий предел, заданный возрастом скопления, ушли с главной последовательности на ветвь красных гигантов.

Более яркие массивные звезды намного быстрее исчерпывают свои топливные запасы, то есть водород, и достигают окончания фазы главной последовательности всего за несколько миллионов лет. В менее массивных звездах, типа Солнца, этот процесс может продолжаться более 10 млрд лет. Возраст Солнца около 5 млрд лет.

Все звезды главной последовательности, имеющие одинаковую массу, характеризуются примерно одинаковой светимостью, температурой поверхности и видимым цветом, все эти показатели взаимосвязаны. Чем массивнее звезда главной последовательности, тем она горячее и ярче, а чем ее масса меньше, тем звезда холоднее и тусклее. Типичными звездами главной последовательности являются Солнце и Сириус, но Сириус в два раза тяжелее Солнца, поэтому он в 20 раз ярче, а температура его поверхности составляет 10 000°С, тогда как на поверхности Солнца – лишь 5500°С.

Современная (гарвардская) спектральная классификация звезд, разработанная в Гарвардской обсерватории в 1890–1924 гг., является температурной классификацией, основанной на виде и относительной интенсивности линий поглощения и испускания спектров звезд (табл. 2).

Таблица 2

Основная (гарвардская) спектральная классификация звезд

Спектральный класс	Температура (К)	Цвет звезды
W	80000	голубой
O	60000–30000	голубой
B	30000–10000	бело-голубой
A	10000–7500	белый
F	7500–6000	желтовато-белый
G	6000–5000	желтый
K	4500	оранжевый
M	3000	красный
L	2000	темно-красный
T	1500	коричневый

*Внутри класса звезды делятся на подклассы от 0 (самые горячие) до 9 (самые холодные). Солнце имеет спектральный класс G2 и эквивалентную температуру фотосферы 5780 К.

2.1.3. Красные гиганты

После выгорания водорода в недрах звезды остается образовавшийся в результате ядерных реакций гелий. Падение внутреннего давления приводит к сжатию ядра под действием притяжения. Ядро **коллапсирует**

(коллапс – гравитационное сжатие), а наружные слои звезды расширяются до размера, в сотни раз превышающего первоначальный. Внутреннее излучение уже не может нагревать внешние слои, как прежде, и поэтому температура падает примерно до 3000°C , а цвет вместо белого, как у Сириуса, или желтого, как у Солнца, становится тускло-красным. Раздувшаяся красноватая звезда превратилась в красного гиганта.

Наружные газовые слои красного гиганта удерживаются очень слабо и начинают пульсировать, а это приводит к изменению блеска звезды с периодичностью около одного года. Более массивные звезды расширяются до еще больших размеров – это сверхгиганты. В некоторых из таких звезд наружные слои пульсируют с очень стабильным периодом, длительность которого зависит от массы звезды, а значит, и от ее яркости. Такие переменные звезды – цефеиды – крайне важны для определения расстояний во Вселенной.

2.1.4. Белые карлики

После завершения фазы красного гиганта окончательная судьба звезды зависит от ее массы. Если звезда похожа на Солнце, то через некоторое время она теряет наружные слои, доставшиеся ей после фазы красного гиганта, которые уходят в пространство в виде светящегося кольца. От звезды остается ядро в виде очень компактного малого объекта – белого карлика. Он имеет массу, примерно равную массе Солнца, но размеры его не больше Земли. Вещество белого карлика состоит из атомных ядер и электронов – это «обломки» атомов, разрушенных в горячих недрах звезды. Но, в отличие от других газообразных звезд, вещество белого карлика сверхтвердое, электроны и ядра «упакованы» настолько плотно, насколько это возможно – это так называемая «вырожденная материя».

Белый карлик не имеет источников энергии, в нем не протекают ядерные реакции, но он еще сохраняет тепло, доставшееся ему от звезды. Со временем тепло уходит в пространство, и белый карлик заканчивает эволюцию холодным, темным «черным карликом».

2.1.5. Сверхновые, нейтронные звезды, пульсары

Массивные звезды иначе заканчивают свой путь. В конце фазы красного гиганта ядерные реакции, происходящие вблизи центра звезды, выходят

из-под контроля. Звезда взрывается, образуя сверхновую. Во время этого грандиозного взрыва звезда короткое время светится подобно миллиарду Солнц, в то время как наружные слои газа уносятся взрывом, создавая мощную ударную волну при встрече с космическими объектами. Одновременно происходит коллапс ядра звезды, оно сжимается до тех пор, пока не достигает примерно 20 км в диаметре. Во время коллапса электроны, соединяясь с протонами, образуют нейтроны. Когда все нейтроны оказываются «упакованными», сжатие прекращается – это еще один вид вырожденной материи, но главную роль здесь играют нейтроны, а не электроны, как в белых карликах. Типичная нейтронная звезда по массе немного больше Солнца, а ее малые размеры говорят о необычной плотности: булавочная головка из вещества нейтронной звезды весила бы миллион тонн.

При вращении нейтронные звезды испускают излучения, которые наблюдаются – в виде «вспышек» рентгеновских лучей, или гамма-лучей, и в редких случаях в виде вспышек света. Впервые импульсы нейтронных звезд были зафиксированы в 1967 году (радиоастрономы Кембриджа), а их источники названы «пульсарами». Вспышки пульсаров, или нейтронных звезд, говорят об их быстром вращении. Так, пульсар в Крабовидной туманности – остатки сверхновой, взорвавшейся 900 лет назад, делает 30 оборотов в секунду, но встречаются пульсары, скорость вращения которых составляет 642 оборота в секунду.

2.1.6. Черные дыры

Очень массивные звезды эволюционируют по-другому. Дело в том, что массы белого карлика и нейтронной звезды имеют свой предел веса – соответственно 1,4 и 3 солнечных масс. При взрыве коллапсирующее ядро очень массивной звезды может превысить эти пределы, и тогда сжатие звезды невозможно ограничить никакими размерами. По мере сжатия на поверхности звезды растет сила гравитации, и когда звезда сожмется до нескольких километров в поперечнике, сила тяжести достигает такой величины, при которой ничто, даже свет, не может покинуть ее поверхности. Звезда превращается в черную дыру. Таким образом, черная дыра – это область непреодолимого гравитационного притяжения, размерами в несколько километров. Выяснить что-либо еще о черных дырах невозможно, так как они безвозвратно поглощают любые сигналы, попадающие в пределы их тяготения.

2.1.7. Современные проблемы звездной астрономии

Изучать рождение звезд в нашу эпоху трудно, хотя бы из-за того, что запасы межзвездного вещества в Галактике заметно истощились. Ведь они лишь частично восполняются тем, что выбрасывают в пространство умирающие звезды. За год в Галактике появляется в среднем лишь несколько звезд. Большинство областей звездообразования находятся на значительном удалении и с трудом поддаются изучению. К тому же формирование звезд происходит в глубине холодных и совершенно непрозрачных для света газопылевых облаков. На 98% эти облака состоят из водорода (в виде отдельных атомов и молекул H_2) и гелия. Эти газы практически не мешают прохождению света. Но остальные 2% массы, приходящиеся на более тяжелые элементы, образуют крохотные твердые частицы размером в сотые доли микрона – пылинки, которые активно поглощают и рассеивают излучение.

Многие положения теории звездообразования подтверждены наблюдениями, но не на все вопросы найдены ответы. Например, как звезды избавляются от «лишнего вращения»? В силу случайного, турбулентного характера движения газа любая часть межзвездного облака медленно вращается. Когда облако сжимается, стремясь стать звездой, то, по закону сохранения момента импульса, вращение ускоряется – так фигуристы ускоряют свое вращение, прижимая руки к телу. Если бы не было механизмов торможения, центробежная сила вообще не позволила бы звезде родиться.

Один из таких механизмов обеспечивает газовое трение: внутренние, быстро вращающиеся области протозвезды трутся о внешние, передавая им энергию своего движения. Сами они при этом тормозятся, получая возможность сжиматься дальше и стать звездой, а внешние области, наоборот, раскручиваются и остаются вращаться в виде тонкого диска, из которого позже могут образоваться планеты.

Наблюдения показывают, что протопланетные диски часто встречаются у формирующихся звезд. В окрестностях Солнца уже открыто более двух сотен «готовых» планетных систем, которые подтверждают идею о перераспределении углового момента между звездой и веществом будущих планет.

Однако вместо рождения протопланетного вещества быстро вращающаяся протозвезда может разделиться пополам, превратив момент им-

пульса одного тела во взаимное орбитальное движение двух тел, и это означает, что вместо одной звезды родится две. Астрономы заметили, что почти половина всех звезд предпочитает жить парами. Наше Солнце – одиночная звезда, но это, скорее, исключение из правил. Помимо большого количества двойных звезд, обнаруживаются тройные, а также группы, состоящие из четырех и даже из шести звезд (такова, например, звезда Кастор, альфа Близнецов). Возможно, что последовательное деление протозвезд при сжатии помогает им эффективно бороться с центробежными силами и приводит к рождению нескольких звезд.

Планетные системы формируют в основном звезды умеренной массы, тогда как массивные звезды за счет своего мощного излучения и звездного ветра активно избавляются от окружающего их вещества. Сейчас уже нет сомнений, что рождение большинства звезд сопровождается рождением планет.

Выяснилось, что среди миллиардов звезд почти невозможно найти светило, похожее на Солнце и имеющее столь же спокойный характер. Наша Галактика среди подобных ей крупных звездных систем также оказалась на редкость «мирной», практически не проявляющей активности: даже расположенная в ее ядре массивная черная дыра ведет себя спокойно. Солнце со своими планетами движется в Галактике, как бы избегая мест скопления новорожденных звезд, среди которых немало активных, а значит, опасных для нашей биосферы. Последнее, что долго не удавалось выяснить астрономам, – насколько типична наша планетная система, и часто ли у других звезд встречаются планеты, подобные Земле. В конце XX века астрономы обнаружили первые планетные системы у звезд разного типа, включая даже нейтронные звезды-радиопульсары. Но в большинстве своем экзопланетные системы не похожи на Солнечную. В них планеты-гиганты типа Юпитера оккупируют «зону жизни» – область вокруг звезды, где температурные условия на планете позволяют существовать жидкой воде – главному условию развития жизни земного типа. На самих газовых гигантах-«юпитерах» жизнь развиваться не может, так как они не имеют твердой поверхности.

Сегодня известно около 200 планет вне Солнечной системы. Значительная их часть найдена с помощью наземных телескопов по небольшим колебаниям звезды, вызванным гравитационным воздействием обращающейся вокруг нее планеты. Пока такие наблюдения дают только размер и эллиптичность орбиты планеты, а также нижний предел ее мас-

сы. Наблюдение «Хабблом» планеты звезды HD 209458 показало, что она на 30% легче Юпитера, но при этом настолько же больше его в диаметре, возможно, потому, что излучение близкой звезды заставило ее раздуться. «Хаббл» впервые определил химический состав планеты вблизи другой звезды. В ее атмосфере содержатся натрий, углерод и кислород, а водород испаряется в пространство, создавая кометообразный хвост. Эти наблюдения – предтеча поисков химических признаков жизни в далеких уголках Галактики.



Рис. 5. Планета HD 209458b

Впервые зарегистрирован свет от планеты, находящейся вне Солнечной системы. Астрономы получили температуру и радиус планеты, когда она находилась позади звезды.

2.2. Измерение расстояний в астрономии

Современная физика говорит о трехмерности, шестимерности или даже одиннадцатимерности пространства, но для астронома наблюдаемая Вселенная всегда двумерна. Происходящее в Космосе видится нам в проекции на небесную сферу, подобно тому, как в кино на плоский экран проецируется вся сложность жизни. На экране мы легко отличаем далекие

объекты от близких благодаря знакомству с объемным оригиналом, но в двухмерной небесной сфере звезд нет наглядной подсказки, позволяющей обратить ее в трехмерную карту, пригодную для прокладки курса межзвездного корабля. Между тем расстояния – это ключ едва ли не к половине всей астрофизики. Без знания расстояний невозможно отличить близкую тусклую звезду от далекого, но яркого квазара. Только зная расстояние до объекта, можно оценить его энергетику, а отсюда прямая дорога к пониманию его физической природы.

Для того чтобы хотя бы приблизительно можно было представить себе размеры Солнечной системы и других более крупных образований, в том числе самой Вселенной, необходимо познакомиться с единицами измерения расстояний, принятыми в астрономии.

Солнечная система имеет в поперечнике более 12 млрд км, что определяется диаметром почти круговой орбиты самой удаленной от светила планеты Плутон (в настоящее время Плутон планетой не считается). Это примерно в 1 млн раз больше диаметра Земли (более 12000 км), но составляет всего лишь 1/1000 расстояния до ближайшей к нам звезды Проксима-Центавра (или α Центавра): до нее $9,463 \cdot 10^{12}$ км! Это расстояние настолько велико, что если его выражать в километрах, то придется оперировать колоссальными числами, которые реально не воспринимаются. Поэтому в астрономии, где масштабы расстояний совершенно иные, чем в пределах нашей планеты, применяются другие единицы измерения.

1. Астрономическая единица (а. е.) – применяется в астрономии для измерения расстояний в Солнечной системе. **1 а. е. – равна среднему расстоянию между Землей и Солнцем – 149,6 млн км.** Расстояния между Солнцем и другими планетами берутся относительно астрономической единицы, таким образом, планеты, расположенные внутри орбиты Земли, имеют расстояние до Солнца менее 1 а. е., а планеты или другие объекты, расположенные за орбитой Земли, имеют расстояния, превышающие 1 а. е. Расстояние между Плутоном и Солнцем равно 40 а. е.

2. Световой год – это путь, который луч света, распространяясь со скоростью 300 000 км/сек, преодолевает за год; он равен $9,46 \cdot 10^{12}$ км. Напомним, что расстояние от Земли до Солнца, составляющее 149,6 млн км, луч света преодолевает всего за 8 мин., а чтобы пересечь всю Солнечную систему, ему потребуется около полусуток. До ближайшей к нам звезды α Центавра свет доходит за **4,238 световых года**. Среднее расстояние между звездами Галактики составляет приблизительно 4–6 световых лет.

Быстрое развитие радиотехники дало астрономам возможность определять расстояния до тел Солнечной системы радиолокационными методами. В 1946 г. была произведена радиолокация Луны, а в 1957–1963 гг. – радиолокация Солнца, Меркурия, Венеры, Марса и Юпитера. По скорости распространения радиоволн $c=3 \cdot 10^5$ км/с и по промежутку времени прохождения радиосигнала с Земли до небесного тела и обратно легко вычислить расстояние до небесного тела.

3. Парсек (пк) – расстояние, соответствующее годичному параллаксу в 1». **Параллакс – это видимое (кажущееся) смещение светила, которое обусловлено перемещением наблюдателя (вместе с Землей) по земной орбите.** Именно с такой дистанции радиус земной орбиты (1 астрономическая единица – 149,6 миллиона километров) виден под углом в 1 секунду. Чтобы определить расстояние до звезды в парсеках, нужно разделить единицу на ее параллакс в секундах. Например, до самой близкой к нам звездной системы альфа Центавра расстояние равно $1/0,76 = 1,3$ пк, или 270 тыс. а. е. Представить параллактическое смещение можно очень просто: если смотреть на указательный палец вытянутой перед собой руки поочередно одним и другим глазом, то будет казаться, что палец смещается то вправо, то влево – это и будет своеобразным параллаксом.

1 пк = 206265 а.е. = $3,086 \cdot 10^{13}$ км. Это расстояние световой луч проходит за 3,26 года. Тысяча парсек называется килопарсеком (кпк), миллион парсек – мегапарсеком (Мпк), миллиард – гигапарсеком (Гпк).

Для измерения расстояний во Вселенной используют метод триангуляции, широко применяемый в обычной земной геодезии. Выбирается отрезок известной длины – база, с его концов измеряют углы, под которыми видна недоступная по тем или иным причинам точка, а затем простые тригонометрические формулы дают искомое расстояние. При переходе с одного конца базы на другой видимое направление на точку меняется, она сдвигается на фоне далеких объектов. Это называется параллактическим смещением, или параллаксом. Величина его тем меньше, чем дальше объект, и тем больше, чем длиннее база. Для измерения расстояний до звезд приходится брать максимально доступную астрономам базу, равную диаметру земной орбиты. Соответствующее параллактическое смещение звезд на небе (строго говоря, его половину) стали называть годичным параллаксом. Измерить его пытался еще Тихо Браге, который не поверил идее Коперника о вращении Земли вокруг Солнца и решил ее проверить – ведь параллаксы еще доказывают и орбитальное движение

Земли. Проведенные измерения имели впечатляющую для XVI века точность – около одной минуты дуги, но для измерения параллаксов этого было совершенно недостаточно, о чем сам Браге не догадывался и заключил, что система Коперника неверна.

Следующее наступление на параллакс предпринял в 1726 году англичанин Джеймс Брэдли, будущий директор Гринвичской обсерватории. Поначалу казалось, что ему улыбнулась удача: выбранная для наблюдений звезда гамма Дракона действительно в течение года колебалась вокруг своего среднего положения с размахом 20 секунд дуги. Однако направление этого смещения отличалось от ожидаемого для параллаксов, и Брэдли вскоре нашел правильное объяснение: скорость движения Земли по орбите складывается со скоростью света, идущего от звезды, и меняет его видимое направление. Точно так же капли дождя оставляют наклонные дорожки на стеклах автобуса. Это явление, получившее название годичной аберрации, стало первым прямым доказательством движения Земли вокруг Солнца, но не имело никакого отношения к параллаксам.

Лишь спустя столетие точность угломерных инструментов достигла необходимого уровня. В конце 30-х годов XIX века, по выражению Джона Гершеля, «стена, мешавшая проникновению в звездную Вселенную, была пробита почти одновременно в трех местах». В 1837 году Василий Яковлевич Струве (в то время директор Дерптской обсерватории, а позднее – Пулковской) опубликовал измеренный им параллакс Веги – 0,12 угловой секунды. На следующий год Фридрих Вильгельм Бессель сообщил, что параллакс звезды 61-й Лебеда составляет 0,3». А еще через год шотландский астроном Томас Гендерсон, работавший в Южном полушарии на мысе Доброй Надежды, измерил параллакс в системе альфа Центавра – 1,16». Правда, позднее выяснилось, что это значение завышено в 1,5 раза и на всем небе нет ни одной звезды с параллаксом больше 1 секунды дуги.

Измерение чрезвычайно малых углов требовало технической изощренности и огромного усердия (Бессель, например, обработал более 400 отдельных наблюдений 61-й Лебеда), однако после первого прорыва дело пошло легче. К 1890 году были измерены параллаксы уже трех десятков звезд, а когда в астрономии стала широко применяться фотография, точное измерение параллаксов и вовсе было поставлено на поток.

Измерение параллаксов – единственный метод прямого определения расстояний до отдельных звезд. Но при наземных наблюдениях атмос-

ферные помехи не позволяют параллактическим методом измерять расстояния свыше 100 пк (это не очень большая величина для Вселенной) и используют фотометрические методы.

В начале XX века Обсерватория Гарвардского колледжа вела масштабную работу по определению блеска звезд по фотопластинкам. Особое внимание уделялось переменным звездам, блеск которых испытывает колебания. Изучая переменные звезды особого класса – цефеиды – в Малом Магеллановом Облаке, Генриетта Левитт заметила, что чем они ярче, тем больше период колебания их блеска: звезды с периодом в несколько десятков дней оказались примерно в 40 раз ярче звезд с периодом порядка суток.

Поскольку все цефеиды находились в одной и той же звездной системе – Малом Магеллановом Облаке, – можно было считать, что они удалены от нас на одно и то же расстояние. Значит, разница в их видимом блеске связана с реальными различиями в светимости. Оставалось определить геометрическим методом расстояние до одной цефеиды, чтобы прокалибровать всю зависимость и получить возможность по периоду колебания блеска определять истинную светимость любой цефеиды, а по ней – расстояние до звезды и ее звездной системы.

Но, к сожалению, в окрестностях Земли нет цефеид. Ближайшая из них – Полярная звезда – удалена от Солнца на 130 пк и находится вне пределов досягаемости для наземных параллактических измерений. Это не позволяло перекинуть мостик напрямую от параллаксов к цефеидам, и астрономам пришлось возводить конструкцию, которую теперь образно называют **лестницей расстояний**.

Промежуточной ступенью на ней стали рассеянные звездные скопления, включающие от нескольких десятков до сотен звезд, связанных общим временем и местом рождения. Если нанести на график температуру и светимость всех звезд скопления, большая часть точек ляжет на одну наклонную линию (точнее, полосу), которая называется главной последовательностью. Температуру с высокой точностью определяют по спектру звезды, а светимость – по видимому блеску и расстоянию. Если расстояние неизвестно, то можно использовать видимый блеск звездного скопления, так как все звезды скопления удалены от нас практически одинаково. Поскольку звезды везде одинаковые, главные последовательности у всех скоплений должны совпадать. Различия связаны лишь с тем, что они находятся на разных расстояниях. Если определить геометрическим

методом расстояние до одного из скоплений, которое станет эталоном, то сравнивая с ним другие скопления можно определить и их удаленность.

Геометрические методы измерения расстояний не исчерпываются годичным параллаксом, в котором видимые угловые смещения звезд сравниваются с перемещениями Земли по орбите. Еще один подход опирается на движение Солнца и звезд друг относительно друга. Представим себе звездное скопление, пролетающее мимо Солнца. По законам перспективы видимые траектории его звезд, как рельсы на горизонте, сходятся в одну точку – радиант. Его положение говорит о том, под каким углом к лучу зрения летит скопление. Зная этот угол, можно разложить движение звезд данного скопления на две компоненты – вдоль луча зрения и перпендикулярно ему по небесной сфере – и определить пропорцию между ними. Лучевую скорость звезд в километрах в секунду измеряют по эффекту Доплера и с учетом найденной пропорции вычисляют проекцию скорости на небосвод – тоже в километрах в секунду. Остается сравнить эти линейные скорости звезд с угловыми, определенными по результатам многолетних наблюдений, – и расстояние будет известно! Этот способ работает до нескольких сотен парсек, но применим только к звездным скоплениям и потому называется методом групповых параллаксов. Именно так были впервые измерены расстояния до Гиад и Плеяд.

Вопросы ко 2 главе

1. Что такое звезда?
2. Пути образования звезд.
3. При какой температуре в звездах начинаются ядерные реакции?
4. Что показывает диаграмма Герцшпрунга–Рассела?
5. Характеристика звезд главной последовательности.
6. Чем характеризуется стадия красного гиганта?
7. Что такое белый карлик?
8. Сверхновые, нейтронные звезды, пульсары.
9. Как обнаруживают черные дыры?
10. Какие виды вырожденной материи известны науке?
11. От какого параметра зависят температура и светимость звезд?
12. Какие единицы измерения расстояний применяются в Солнечной системе?
13. Что такое световой год?
14. Что такое парсек, где применяется эти единица измерения?

Глава 3

ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Планеты, особенно земной группы, состоят в основном из тяжелых элементов, синтезированных в звездах. Человеческое тело также состоит из тяжелых элементов: если исключить водород, то 65% составляет кислород, 18% – углерод, есть также азот, натрий, магний, фосфор и многие другие элементы.

Как сказал У. А. Фаулер, «...каждый из нас и все мы воистину в действительности являемся малой частью звездной пыли!». Если бы не было звезд, не было бы ни растений, ни животных, ни человека.

Вопросами рождения и эволюции Вселенной занимается **космология**, а возникновением звезд – звездная **космогония**.

Любая космогоническая модель происхождения Солнечной системы и ее современной структуры должна объяснить основные закономерности движения и строения планет, астероидов, комет, метеорных частиц. Важнейшие из этих закономерностей общеизвестны.

1. Движение всех планет происходит в одном направлении. Солнце вращается вокруг своей оси в том же направлении, причем ось его вращения почти перпендикулярна центральной плоскости планетной системы. Вращение большинства планет и их спутников (за исключением Венеры и Урана) происходит в том же направлении;

2. Всегда соблюдается правило Тициуса–Боде: возрастание расстояний планет от Солнца подчиняется определенной закономерности;

Правило Тициуса – Боде (известно также как закон Боде) представляет собой эмпирическую формулу, приблизительно описывающую расстояния в а.е. между планетами Солнечной системы и Солнцем (средние радиусы орбит). Правило было предложено И. Д. Тициусом в 1766 г. и получило известность благодаря работам И. Э. Боде в 1772 г. Встречается также другая формулировка: Для любой планеты расстояние от нее до самой внутренней планеты (Меркурия) в два раза больше, чем расстояние от предыдущей планеты до внутренней планеты:

$$R_i - R_{i-1} = 2 \cdot (R_{i-1} - R_{i-2})$$

3. Все планеты делятся на две группы: внутренние планеты – сравнительно небольшие небесные тела с высокой плотностью, содержащие

в основном тяжелые химические элементы и медленно вращающиеся, и внешние планеты-гиганты – тела больших размеров, быстро вращающиеся, но имеющие малую плотность и состоящие в основном из легких химических элементов;

4. Между орбитами Марса и Юпитера существует пояс малых планет;

5. Наличие или отсутствие у планет спутников, спутниковых систем и колец;

6. Момент количества движения в Солнечной системе распределен таким образом, что Солнце, содержащее 99% всей массы системы, обладает менее 2% момента количества движения, остальные 98% момента принадлежат планетам;

7. Наблюдаются большие вариации химического состава планет и их спутников, разные типы метеоритов, астероидов, комет.

3.1. Формирование Солнца из газопылевого протопланетного облака

Не останавливаясь на истории развития космогонии, рассмотрим современные представления по данному вопросу.

Закономерности, о которых говорилось выше, указывают на совместное формирование центральной звезды (Солнца) и планет в едином процессе, представления о котором положены в основу современного космогонического сценария.

Наблюдения межзвездных и молекулярных облаков дают обширную информацию об областях интенсивного звездообразования. Звезды солнечного типа образуются вследствие конденсации, возникающей в результате действия сил гравитационного притяжения холодных и плотных фрагментов молекулярных облаков (рис. 6). Условие гравитационной конденсации для изначально однородного газа (без вращения) было получено английским астрофизиком Дж. Джинсом еще в 1902 году. Сравнивая два противоборствующих фактора: тяготение, стремящееся собрать вещество, и давление, стремящееся выровнять неоднородности, он определил условие начала конденсации. Она начинается, когда масса газа превышает некоторое критическое значение, называемое теперь **массой Джинса**.

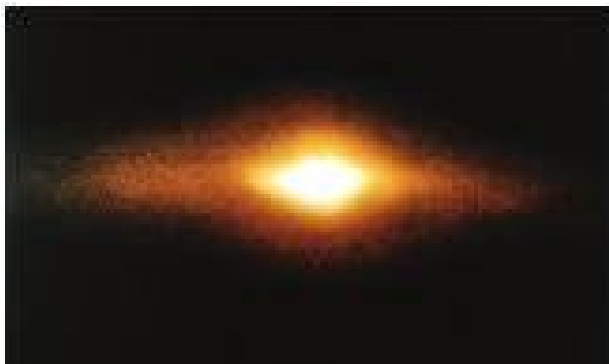


Рис. 6. Первичная газопылевая туманность

Начавшее сжиматься массивное облако участвует в общем вращении Галактики и не может сжаться до высокой плотности из-за значительного момента вращения, приводящего к большим центробежным силам. Расчеты показывают, что в результате развивающейся неустойчивости возможен распад таких гигантских облаков на отдельные фрагменты. При этом большая часть момента вращения переходит в момент относительного движения фрагментов. Удалось вычислить, что при сжатии облаков с моментами 10^{51} – 10^{52} г·см²/с у сжимающейся протозвезды формируется дискообразная оболочка. Однако создание детальной картины образования околозвездных дисков еще не закончено. По имеющимся оценкам, диск начинает формироваться из внешнего экваториального слоя протозвездного ядра благодаря переносу момента вращения магнитным полем и разрастается под действием турбулентной вязкости (рис. 7).

Турбулентность в основном поддерживается за счет выпадения вещества из оболочки на диск. Большая часть вещества, выпадающая на внешний край диска, захватывается им, способствуя более быстрому разрастанию диска. За 10^5 – 10^6 лет диск в такой модели вырастает до размера порядка радиуса современной Солнечной системы (40–50 а. е.) и имеет массу 0,05–0,1 $M_{\odot}$ (масса Солнца). Ядро, от которого передавался вращательный момент, сжимаясь, превращается в центральную звезду приблизительно за 10^6 – 10^7 лет.

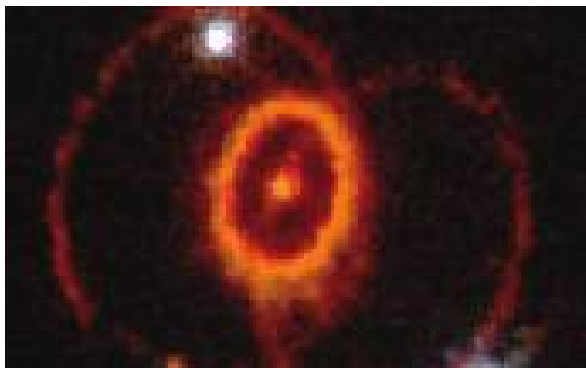


Рис. 7. Околозвездный диск

Узкие струи ионизированного вещества протопланетных дисков — проплидов свидетельствуют о рождении звезды. Формируясь, она может извергнуть потоки газа длиной в несколько световых лет. Крупномасштабное магнитное поле, пронизывающее газопылевой диск, вынуждает вещество течь вдоль магнитных силовых линий. Половина изученных молодых звезд обладает такими дисками, свидетельствующими о том, что сырья для формирования планет достаточно.

Важную роль в ранней эволюции диска играет активность молодой звезды — ее излучение в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, общая светимость и интенсивность звездного ветра. Имеются свидетельства, что коротковолновое излучение молодых звезд солнечной массы может на порядки превышать интенсивность излучения современного Солнца в соответствующих диапазонах. В построенных моделях околосолнечного диска температура в центральной плоскости падает с удалением от Солнца и на расстоянии 1 а. е. составляет 300–400 К, и лишь десятки градусов Кельвина — на расстоянии 10–20 а. е. Внешние, разреженные слои диска могли нагреваться коротковолновым излучением Солнца до очень высоких температур, что вело к рассеянию в межзвездное пространство его газовой составляющей. Этому процессу способствовал также интенсивный солнечный ветер.

3.2. Конденсация и формирование роя планетезималей

Сходство распространенности химических элементов (за исключением летучих) и сходство изотопного состава большинства тел Солнечной системы позволяет сделать вывод об их общем происхождении. Однако 4,6 млрд лет тому назад протосолнечная туманность разделилась на молодое Солнце и околосолнечный газопылевой диск (рис. 8). На внутреннем краю диска, вблизи Солнца, происходил процесс постепенного охлаждения. При этом имела место конденсация химических соединений. Вначале конденсировались наиболее тугоплавкие, а затем все более летучие элементы. Общая масса конденсированного вещества в диске не превышала 1–2%. В отличие от газа, зерна пыли оседали ближе к центральной плоскости диска. Расчеты показали, что пыль – ферромагнетические силикаты – оседала к центральной плоскости, преимущественно в зоне планет земной группы, а силикаты с ледяными мантиями – в зоне внешних планет. Происходило это в течение порядка 10^4 – 10^5 лет. В образующемся пылевом субдиске плотность достигала критического значения, и наступала гравитационная неустойчивость.

Субдиск разбивался на пылевые сгущения, которые в результате гравитационного взаимодействия сталкивались, объединялись и уплотнялись, набирая массу за счет присоединения мелких компонент.

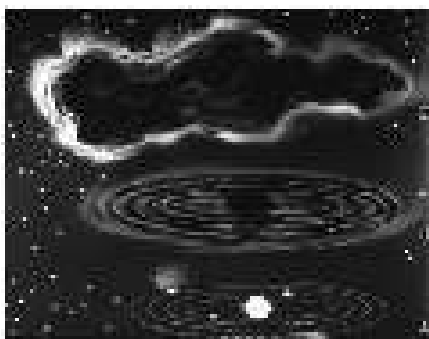


Рис. 8. Рождение Солнечной системы

За 10^5 – 10^6 лет масса этих планетезималей становилась сравнимой с массой современных крупнейших астероидов. Плотность их вещества

приближалась к 1 г/см^3 . Вблизи Солнца (орбита современного Меркурия) температура, по-видимому, не опускалась ниже 600 К , что подтверждается наличием металлического железа в этой области, так как при температуре выше 600 К железо и вода практически не взаимодействуют. Лишь ниже 400 К начинается образование окислов.

В зоне пояса астероидов температура, вероятно, была достаточно низкой и обеспечивала эффективное взаимодействие ферромагнетизмальных силикатов с парами воды, приводя к формированию гидратированных силикатов.

В еще более отдаленных частях диска основную часть первичного конденсированного вещества составляли межзвездные пылинки. Возможно, они вошли практически неизменными в ледяную компоненту планетезималей, образовавшихся во внешних частях диска и считающихся предшественниками ядер современных комет.

3.3. Эволюция планетезималей и формирование планет

Следующий этап аккумуляции планет из роя планетезималей занял гораздо больше времени. Кеплеровское вращение в первичном газопылевом диске привело к тому, что орбиты первичных планетезималей на начальной стадии были практически круговыми и лежали в средней плоскости. В дальнейшем, по мере роста планетезималей, происходило усиление взаимного гравитационного влияния увеличивающихся объектов и заметное изменение их орбит, выражавшееся в росте эксцентриситетов и наклонений.

Относительные скорости тел определялись их гравитационными возмущениями при сближениях и первоначально были весьма невелики — порядка $10\text{--}100 \text{ м/с}$. Сталкиваясь, тела астероидных размеров преимущественно объединялись. Когда тела достигали размеров Луны, их скорости возрастали до 1 км/с , и, вследствие этого, тела начинали дробиться при соударениях.



Рис. 9. Планеты Солнечной системы движутся по орбитам почти в одной плоскости

Самые крупные тела росли быстрее других и стали зародышами будущих планет. Они эффективно поглощали вещество, оказавшееся на их пути. По мере роста протопланет, «вычерпывающих» меньшие тела в своих зонах «питания», их орбиты снова становились почти круговыми, а благодаря статистическому усреднению орбитальных характеристик поглощаемых тел, орбиты оставались лежащими в средней плоскости (рис. 9). Результаты моделирования для зоны планет земной группы подтвердили общее время аккумуляции Земли ($\approx 10^8$ лет), которое оценено аналитически в работах российского астронома В.С. Сафронова.

3.4. Образование планет-гигантов

Процесс образования планет-гигантов осложнялся длительным присутствием газовой компоненты и эффективным выбросом вещества во внешние зоны и даже за пределы Солнечной системы. Согласно современным моделям, образование Юпитера и Сатурна протекало в два этапа. На первом, длившемся десятки миллионов лет в области Юпитера и около ста миллионов лет в области Сатурна, происходила аккумуляция твердых тел, подобная той, что была в зоне планет земной группы.

Когда крупнейшие тела достигали некоторой критической массы – порядка $3\text{--}5 M_3$ (массы Земли), начался второй этап эволюции – аккреция

газа на эти тела, длившаяся не менее 10^5 – 10^6 лет. Дело в том, что под действием мощного корпускулярного излучения (солнечного ветра) и коротковолнового излучения молодого Солнца, газ из зоны планет земной группы рассеялся за время порядка 10^7 лет. Однако в зонах Юпитера и Сатурна часть газа не успела диссипировать в межзвездное пространство, поэтому и Юпитер, и (в меньшей степени) Сатурн смогли «захватить» этот газ, составивший значительную часть их массы. Образование твердых ядер Урана и Нептуна, находящихся на больших расстояниях, заняло сотни миллионов лет. К тому времени газ из их зон был уже практически потерян. Температуры в этой внешней части Солнечной системы были менее 100 К, и значит, кроме силикатной компоненты в составе этих планет и их спутников много конденсатов воды, метана и аммиака.

3.5. Происхождение спутников планет и малых тел

Формирование спутников планет – закономерный результат процесса аккумуляции планет. В настоящее время значительно возрос интерес к планетам-гигантам, имеющим большое количество регулярных спутников (то есть спутников с прямым обращением, орбиты которых имеют малые эксцентриситеты и незначительные наклонения к экваториальной плоскости планеты). Особый интерес вызывают кольца, находящиеся в пределах зон Роша и состоящие из множества мелких льдистых обломков.

Зона Роша – область вокруг планеты, составляющая 2,446 ее радиуса, при вхождении в которую спутнику грозит опасность развалиться под действием сил тяготения (приливных сил).

Согласно существующим моделям, в ходе формирования планеты часть падающего вещества может быть захвачена на околопланетную орбиту, образуя околопланетный доспутниковый диск. В общих чертах процессы переноса вещества и момента в этих дисках схожи с таковыми в аккреционных околозвездных дисках, однако имеются и значительные отличия. Оценки показывают, что характерные времена аккумуляции и разрушения небольших спутников при дроблении намного меньше характерного времени образования самой планеты. Вещество в доспутниковых дисках неоднократно обновлялось, прежде чем смогла образоваться относительно устойчивая спутниковая система. Пока не вполне ясно,

являются ли кольца остатками разрушившихся спутников, попавших в зону приливного разрушения, или это прерванный процесс объединения ледяных осколков?

Происхождение нерегулярных спутников планет-гигантов, вероятно, можно объяснить действием столкновительного механизма захвата. Такое же происхождение, скорее всего, имеют спутники Марса. Орбита ближайшего спутника (Фобоса) быстро эволюционирует, и примерно через 50 млн лет он должен столкнуться с Марсом. По-видимому, Фобос и Деймос последние из некогда многочисленных, но затем утраченных спутников Марса.

У Меркурия и Венеры в настоящее время нет спутников. Однако расчеты показали, что если даже эти планеты их имели, то вследствие приливной эволюции они должны были упасть на планеты. Поэтому отсутствие многочисленных спутников не может рассматриваться как некое обязательное условие при построении теории происхождения спутников планет земной группы.

Загадкой остается образование спутника Земли – Луны. В процессе роста нашей планеты какая-то часть частиц, сталкиваясь, могла образовывать Луну, но путем неупругих столкновений захватывается не больше, чем 10^{-4} – 10^{-5} от массы планеты. Такое могло произойти при формировании спутников планет-гигантов, но не Луны, так как Земля не имеет для этого достаточную массу. Другая модель предполагает, что большая часть вещества в околоземный рой поступила в результате столкновения Протоземли с крупным телом, размеры его могли быть близки к размерам Меркурия или даже Марса.

Образование малых тел Солнечной системы составляет важную часть сценария происхождения Солнца и планет. Сейчас нет сомнений в том, что астероиды и кометы представляют собой остатки роя «промежуточных тел». Простые оценки показывают: массы планет-гигантов еще до завершения их роста стали настолько большими, что своим гравитационным воздействием могли очень сильно менять параметры орбит малых тел. В результате ледяные тела из зоны планет-гигантов «выметались» во внешние зоны Солнечной системы. Вследствие такого процесса, по-видимому, и образовалось кометное облако Оорта.

Астероиды сохранились до нашего времени благодаря тому, что они движутся в широком промежутке между орбитами Марса и Юпитера. Ответственность за то, что здесь не сформировалась крупная планета, несет

Юпитер. Оставшиеся тела в поясе астероидов приобрели слишком большие относительные скорости, и их столкновения вели и ведут в настоящее время к катастрофическим разрушениям. Крупнейшие из современных астероидов образовались одновременно с формированием планет.

3.6. Новейшие данные о происхождении Солнечной системы

Дальнейшее понимание процесса происхождения планет может вести к радикальному переосмыслению данных о раннем состоянии и вероятных путях эволюции планет. В начале 50-х годов представления о первично огненно-жидкой Земле сменила концепция изначально холодной Земли. Новейшие данные космогонии ставят эту концепцию под сомнение.

В настоящее время можно считать твердо установленным, что планеты Солнечной системы образовались из газопылевого облака, расположенного вокруг Солнца (протопланетного диска), имевшего сплюснутую форму.

Диск образовался вместе с Солнцем в результате коллапса протосолнечной туманности. Исходным веществом внутренних планет и спутников планет-гигантов стал твердый (пылевой) компонент протопланетного диска, а сами планеты-гиганты образовались из газа и пыли. По современным оценкам, планеты выросли за время порядка 100 млн лет, а диск существовал лишь около 10 млн лет. Взаимодействие между твердой и газовой составляющими на ранней стадии определило химический состав допланетных тел, а в итоге – планет и других тел Солнечной системы. Чтобы воссоздать химическую эволюцию допланетного вещества и понять причины особенностей химического состава планет и разнообразия типов метеоритов, необходимо знать, какими были физические условия: температура, давление, фазовые состояния вещества в разных областях диска.

Основной особенностью Солнечной системы, требующей объяснения, является существование двух резко различающихся групп планет: небольшие плотные внутренние и большие, но с низкой плотностью внешние. Предполагают, что такое разделение связано с испарением льдов в ближней к Солнцу области и замерзанием летучих веществ – в удаленной.

Наблюдения астероидов свидетельствуют о том, что на их поверхности отсутствуют льды, а метеориты содержат лишь очень небольшое количество воды, причем только в химически связанном состоянии. В то же время водяной лед обнаружен на Галилеевых спутниках Юпитера. Граница между зонами образования Юпитера и астероидов связана с фронтом испарения-конденсации льда при температуре около 150 К. Но протопланетный диск, содержащий мелкую пыль, непрозрачен для солнечного излучения и поэтому должен быть холодным, что подтверждено расчетами. Если источником нагрева являлось только Солнце, то фронта испарения-конденсации воды вообще не должно было быть, так как уже на расстоянии Меркурия температура опускается до 150 К, а в поясе астероидов она составляет менее 50 К.

То, что фронт испарения льда оказался отодвинутым за пояс астероидов, объясняют повышением температуры в зоне их образования. Ближняя к Солнцу часть диска перешла от непрозрачного состояния к прозрачному через 10 млн лет после начала эволюции, что связано с ростом будущих планет. В поясе астероидов основная масса твердого вещества уже содержалась в крупных телах размерами до 10–100 км.

Современные данные астрофизики и космохимии, а также модели протопланетного диска свидетельствуют о более высоких температурах на ранней стадии его эволюции.

Прямые и косвенные наблюдения дисков вокруг молодых звезд показали, что диски имеют внутренний источник нагрева, причем поток излучения, идущий изнутри диска, в среднем оказался больше внешнего потока, поглощаемого диском. Поскольку диски непрозрачны в инфракрасном и оптическом диапазонах волн, то оценка температуры относится к их излучающей поверхности, а в глубине, при нагреве изнутри, она может быть гораздо выше. Это особенно важно для космохимических приложений.

Космохимия дает информацию о процессах в протопланетном околосолнечном диске, основанную на данных химического и изотопного состава наиболее примитивных метеоритов – углистых хондритов, образовавшихся около 4,5 млрд лет назад при температурах выше 1600 К. При термической обработке зерен графита, содержащихся в хондрите, был выделен неон, имеющий досолнечное происхождение. Максимальная температура, при которой неон может удерживаться частицей, около 900 К, что и ограничивает сверху температуру в диске.

О максимальных температурах в области образования Земли (~1000–1200 К) можно судить по относительному обеднению ее умеренно летучими элементами Na, K и Rb (в 4, 5 и 8 раз соответственно). А на расстоянии 4–5 а. е. в зоне Юпитера температура составляла около 150 К, что согласуется с фронтом конденсации водяного пара.

Температурный режим на ранней стадии формирования планет позволял им расти до 100–1000-километровых размеров в присутствии газа, конвективные и турбулентные движения которого не препятствовали пыли скапливаться в экваториальной плоскости. Значительная доля мелкой пыли долго, в течение 1–10 млн лет, могла оставаться взвешенной в газе по всей толщине диска, что обеспечивало его высокую непрозрачность и способствовало поддержанию в глубине его более высокой температуры, чем на поверхности. Таким образом, рост допланетных тел в области образования внутренних планет мог проходить в нагретом, медленно остывающем газопылевом диске.

Допланетные тела, нагреваемые изнутри, начиная уже с 10–100-километровых размеров, не успевают охлаждаться в процессе роста. Так, 10-километровые тела остывают лишь на 10 К за 0,1 млн лет, но за несколько десятых миллиона лет они успевают вырасти до 100-километровых размеров, когда скорость охлаждения становится около 1 К/млн лет. Поэтому температура внутри тел не меньше температуры окружающего газа в протопланетном диске на стадии существования 10-километровых тел. Повышенные температуры на этой стадии в области образования внутренних планет обеспечивали нагрев недр допланетных тел до 800–1200 К в области Земли и Венеры. Этот и дополнительный нагрев (одним из источников которого могли быть короткоживущие изотопы и прежде всего ^{26}Al) способствовали расплавлению и дифференциации допланетных тел, начиная уже со 100–1000-километровых размеров. Недра в них могли быть расслоены на железное ядро и силикатную мантию. Столь ранняя дифференциация вещества могла существенно повлиять на образование ядра планеты, ее начальное состояние, а также химический состав ее оболочек.

Температуры протопланетного диска в области Земли составляли более 800 К – это выше температуры конденсации сульфида железа, поэтому можно ожидать, что сульфид железа не является основным легким компонентом земного ядра. В протопланетной области Венеры температуры были еще выше. Вопрос о том, какой элемент, помимо железа, пре-

обладает в ядре Земли и Венеры, важен для понимания эволюции глубоких недр планет.

Происхождение естественных спутников планет

В настоящее время открыто более 90 спутников планет. В эпоху О. Ю. Шмидта их было известно в три раза меньше. В 3-м издании его «Четырех лекций о теории происхождения Земли» (1957 г.) высказана общая идея о происхождении спутников:

«При образовании планет, в процессе сближения частиц с крупными зародышами планет, некоторые из частиц, сталкиваясь, настолько теряли скорость, что выпадали из общего роя и начинали обращаться вокруг планеты. Таким образом, около планетного зародыша образуется сгущение – рой частиц, обращающихся около него по эллиптическим орбитам. Эти частицы также сталкиваются, изменяют свои орбиты. В уменьшенном масштабе в этих роях будут происходить те же процессы, что и при образовании планет. Большинство частиц упадет на планету (присоединится к ней), часть же их будет образовывать околопланетный рой и объединяться в самостоятельные зародыши – будущие спутники планет... При осреднении орбит частиц, образующих спутник, последний приобретает симметричную, т. е. близкую к круговой, орбиту, лежащую в плоскости экватора планеты».

Модель образования Луны, разработанную на основании этой идеи, стали позднее называть моделью коаккреции (на Западе *accretion* обозначает и аккумуляция, и аккрецию, тогда как в русскоязычных работах аккреция обычно обозначает присоединение газовой среды, а аккумуляция – объединение твердых тел). Эта модель может быть применима к планетам земного типа, но она не исчерпывает всех разновидностей образования спутников. Так, у планет-гигантов на стадии аккреции газа должны образовываться не околопланетные рои, а аккреционные газопылевые диски. В поясе астероидов, где процессы аккумуляции давно сменились разрушительными столкновениями, образование спутников возможно лишь путем фрагментации более крупных родительских тел. Наконец, для системы Земля – Луна в последние два десятилетия рассматривается катастрофическое происхождение как альтернатива коаккреции. Эти разновидности можно рассмотреть на примере Луны, галилеевых спутников Юпитера и астероидной пары Ида – Дактил.

Освоение Луны во второй половине XX в. позволило изучить ее внутреннее строение, состав, возраст многих участков поверхности, их гео-

логию, а также приливную историю лунной орбиты. К сожалению, не удалось выработать единого мнения о происхождении Луны. Была отвергнута гипотеза об отрыве Луны от быстро вращающейся Земли, отпала гипотеза о захвате готовой Луны. Есть общее представление, что Луна образовалась в околоземном диске, но вопрос возникновения самого диска также вызывает разногласия.

В одной из версий, согласно идее О. Ю. Шмидта, предполагается постепенное пополнение диска (роя) допланетным веществом, сопутствующее росту Земли, т. е. коаккреция. Модель разработана в ОИФЗ и позднее развита группой американских ученых из Аризонского университета и Института планетных наук в г. Тусоне, США. Показано, что в околоземной рои могло быть захвачено достаточно вещества для аккумуляции Луны, если во время роста Земли плотность частиц в ее непосредственной близости в несколько раз превышала плотность «фона» допланетных частиц. Массивный спутник с прямым направлением обращения вокруг Земли мог образоваться на расстоянии в 3–4 раза меньшем, чем современное расстояние до Луны, что вполне согласуется с ее последующим приливным отодвиганием. Главное отличие химического состава Луны от Земли – низкое содержание железа в Луне (6–10% по сравнению с 35% в Земле) – объясняется преимущественным захватом в околоземный рои наиболее мелкой фракции допланетных частиц, которые чаще сталкиваются друг с другом. При столкновениях сильнее дробятся каменные породы, и мелкая пыль обогащается силикатами по отношению к железу. Одновременно теряются за счет испарения летучие и полуметаллические компоненты, которыми, как известно, Луна обеднена. По определению Тусоновской группы, околоземный рои работает как «композиционный фильтр», и таким образом решается проблема различий химического состава Луны и Земли.

Сторонники катастрофического происхождения околоземного диска предполагают, что этот диск образовался при столкновении Земли с крупным допланетным телом, в 1,5–2 раза более массивным, чем Марс, – мегаимпактом. При надлежаще направленном касательном соударении выброшенный диск обладает и большой массой, и достаточным угловым моментом для формирования в нем Луны. Решение проблемы химического состава Луны авторы гипотезы мегаимпакта видят в том, что и Земля, и ударившее тело уже успели расслоиться на ядро и мантию. Их железные ядра остались в Земле, затем объединились в одно ядро, а диск

образовался из силикатных мантий. Необходимо сказать, что, как бы решая проблемы Луны в один прием, мегаимпакт сам создает проблемы. Так, энергия мегаимпакта при столкновении ударника с Землей со скоростью 14–15 км/с составляет более 1039 эрг. Этого достаточно, чтобы расплавить большую часть Земли, а также испарить какую-то ее часть. Образуется горячая силикатно-магниевая атмосфера, и Земля в течение 10–100 лет светит как коричневый карлик – звезда с температурой фотосферы 2000 К. Необходим критический анализ возможности такого этапа в ранней истории Земли. Гипотеза мегаимпакта не объясняет почти круговой характер орбиты Земли. Ее эксцентриситет в настоящее время равен 0,017, что согласуется с участием в аккумуляции Земли крупных тел вплоть до лунной массы, но не марсианской. Подсчет В. С. Сафронова и А. М. Фридмана показал, что при мегаимпакте эксцентриситет орбиты Земли был бы в 5–10 раз больше. Наконец, гипотеза мегаимпакта придумана специально для Луны, хотя, по мнению Д. Стивенсона, наилучшим «кандидатом» на такое происхождение служит система Урана с его спутниками. Не исключено, что сильный наклон оси Урана к оси эклиптики вызван ударом тела с массой, сравнимой с массой Земли, и следствием такого удара могло быть образование диска в одной плоскости с экватором Урана. Идентичность химического состава Урана и его спутников могла бы стать подтверждением этой идеи, но достоверных данных об этом пока нет.

Гипотеза коаккреции носит более универсальный характер. Спутники должны были появиться у всех четырех планет земной группы. Исчезновение спутников Венеры и Меркурия объясняется тем, что вращение этих планет сильно замедлено солнечными приливами, и их спутники, испытывая приливное воздействие своих планет, должны были приблизиться к ним и выпасть на поверхность. Особое место, которое занимает Луна среди спутников по величине ее орбитального углового момента, – также результат приливной эволюции. В прошлом Луна находилась в несколько раз ближе к Земле, а Земля вращалась быстрее, чем сейчас, так что соотношение моментов в системе Земля – Луна было иным. Луна на много порядков массивнее, чем спутники Марса. Масса Марса равна всего 0,1 М_Е, но модель коаккреции как раз предсказывает сильную нелинейную зависимость массы спутников от массы планеты. Наконец, газопылевые аккреционные диски вокруг растущих планет-гигантов можно считать аналогами околопланетных роев, состоящих из двух компонентов.

Систему спутников Юпитера часто сравнивают с миниатюрной Солнечной системой. Регулярный характер орбит галилеевых спутников и четырех малых спутников, обращающихся вблизи Юпитера, говорит об их образовании из газопылевого диска, хотя спутники не содержат легких газов. Их состав варьирует от безводного каменистого у Ио и малых спутников к каменистой Европе с ее ледяным покрытием в десятую долю массы и к смешанному составу Ганимеда и Каллисто, у которых примерно поровну льда и силикатов. Еще по наземным наблюдениям было известно закономерное убывание плотности спутников с расстоянием от Юпитера, и это правильно понималось как результат прогревания зоны спутников его излучением. Ранний Юпитер уподоблялся маленькому Солнцу. Космические исследования укрепили эту точку зрения, дав точные определения плотностей и химического состава спутников. В сочетании с моментами инерции эти данные позволяют сегодня уже строить вполне реальные многослойные модели внутреннего строения галилеевых спутников! Прототип газопылевого диска Юпитера приходится создавать теоретически, на основании данных о массах спутников и в предположении о единстве состава диска и Юпитера, опираясь при этом на существующие модели аккреционных дисков у молодых звезд и Солнца. Масса диска могла достигать 10 М_Е, с учетом водорода и гелия; значительная часть этой массы выпала на Юпитер и рассеялась в пространство. Прямое вращение диска обуславливалось угловым моментом, которым обладал объем газа, забираемый из допланетного облака. Эта величина невелика, поскольку радиус диска в несколько десятков раз меньше размера гравитационной сферы Юпитера. Вещество спутников – это последние порции вещества, захваченного в диск, на заключительной стадии аккреции Юпитера, когда его фотосфера была еще горячей, до 1000 К. Одновременно с аккумуляцией спутников шла термическая диссипация газов из диска, для чего также было необходимо тепло от Юпитера. Происхождение маленьких нерегулярных спутников Юпитера, обращающихся далеко за пределами галилеевой системы, никак не связано с газопылевым диском. По предположению, это захваченные при взаимных столкновениях небольшие астероиды или их фрагменты.

В главном поясе астероидов давно уже известны семейства, т.е. группы астероидов, хотя и разбросанные в пространстве пояса, но имеющие одинаковые элементы орбит: большую полуось, эксцентриситет, наклонение. Есть все основания предполагать, что члены семейства образова-

лись при фрагментации одного родительского тела при его столкновении с другим астероидом. Удивительно, что у некоторых астероидов обнаружили спутники. Первой зафиксированной парой оказались астероид 243 Ида и его спутник, названный впоследствии Дактил. Их снимки получены с помощью космического аппарата «Галилео» в 1993 г. на пути к Юпитеру. Ида имеет неправильную форму с наибольшим диаметром 56 км, она быстро вращается (период 4,65 ч). Астероид сильно кратерирован, что говорит о большом возрасте. Диаметр спутника – около 1,5 км. Оба принадлежат семейству Коронид, насчитывающему более 50 членов. Размер родительского тела оценивается в 90 км. Если разрушительное столкновение происходит со скоростью 0,5–1,0 км/с, то образующиеся фрагменты могут быть крупными и разлетаться со скоростями в десятки м/с. Лабораторные эксперименты показали, что фрагменты, как правило, вращаются. Астероидная пара – это двойной фрагмент. Для удержания спутника необходимо, чтобы его относительная скорость была мала. Подсчет показал, что орбитальная скорость спутника Иды должна быть около 6 м/с, а уже при 10 м/с пара должна была бы разорваться. В поясе астероидов так мала пространственная плотность тел и низка вероятность возмущений, что долговременное существование пар вполне возможно. Тела оказывают приливное воздействие друг на друга, но из-за малости масс астероидов эти приливы чрезвычайно малы. Время приливной эволюции астероидных пар измеряется миллиардами лет.

Вопросы к 3 главе

1. Что такое космология и космогония?
2. Какие закономерности доказывают единство происхождения Солнца и его окружения?
3. Что такое масса Джинса?
4. Чем отличалось конденсированное вещество протопланетного диска вблизи и в отдалении от Солнца?
5. Сколько времени потребовалось для аккумуляции Земли из планетезимали?
6. Какие спутники планет относятся к регулярным?
7. Что такое Зона Роша и чем она опасна?
8. Как объясняется происхождение нерегулярных спутников, например, у Марса?
9. Почему Меркурий и Венера не имеют спутников?

10. В чем загадка происхождения Луны?
11. Какова причина возникновения пояса астероидов?
12. Что по новейшим данным могло способствовать ранней дифференциации вещества планет на ядро и мантию?
13. Что такое ME?

Глава 4

СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Солнце и находящиеся в поле его притяжения небесные тела образуют одну из бесчисленных вращающихся систем Вселенной. Солнечная система состоит из центральной звезды – Солнца, восьми планет и их спутников, множества астероидов, комет, метеорных тел, межпланетной пыли и газа.

Пространство, занимаемое Солнечной системой, пронизано различного рода потоками энергии, исходящими из Вселенной, из межпланетной среды, но главным образом – от Солнца, а также различными физическими полями, свойственными космическим телам, – гравитационным, магнитным, тепловым, электрическим и другими. Единство Солнечной системы основано на взаимодействии этих потоков и взаимосвязанных движений космических тел.

Движение тел вокруг Солнца обеспечивается двумя силами: центробежной, возникающей при вращении тела, и центростремительной силой или тяготением. Солнце своим притяжением и центробежная сила удерживают планеты и другие космические объекты на их приблизительно круговых орбитах. В свою очередь, каждая планета и всякое другое космическое тело притягивают Солнце и все другие тела с силой, зависящей от их массы и удаленности от светила. Сила притяжения прямо пропорциональна массам тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между взаимодействующими телами.

На рис. 10 изображены планеты Солнечной системы в их последовательном удалении от светила.

Планеты – холодные шарообразные небесные тела, обращающиеся вокруг звезды и светящиеся отраженным от их поверхности светом этой звезды.

Спутники – планеты меньших размеров, обращающиеся вокруг крупных планет.

Орбита – замкнутая кривая, описываемая планетой или другим телом при движении вокруг Солнца, или спутником при его движении вокруг планеты.

Эксцентриситет орбиты – мера отклонения формы орбиты от окружности, выражающаяся отношением разности наибольшего и наименьшего расстояний планеты или другого тела от Солнца к сумме этих расстояний.

яний. Например, наибольшее расстояние Земли от Солнца равно 152 млн км, наименьшее – 147 млн км, при этом эксцентриситет орбиты Земли составляет:

$$(152-147) : (152+147) = 0,017;$$

это очень незначительное отклонение формы орбиты Земли от правильного круга.

Эклиптика – это плоскость, совпадающая с плоскостью орбиты Земли, или видимый (кажущийся нам с Земли) путь Солнца по небосклону.

Наиболее характерными чертами Солнечной системы являются:

1. Почти все крупные тела Солнечной системы – планеты и астероиды, а также кометы – вращаются вокруг Солнца в одном направлении – против часовой стрелки, если смотреть со стороны Северного полюса мира, находящегося в бесконечности на северном продолжении оси вращения Земли.

2. Все планеты (кроме Венеры и Урана) и большинство спутников (кроме некоторых спутников Юпитера и Сатурна) вращаются вокруг своих осей в том же направлении.

3. Плоскости орбит планет близки к плоскости видимого с Земли годового движения Солнца – эклиптике, отклоняясь от нее всего на несколько градусов. Орбитальная плоскость Земли совпадает с эклиптикой. Только Меркурий имеет наклоненную орбиту 7° по отношению к орбите Земли. В свою очередь эклиптика расположена по отношению к солнечному экватору под углом $7^\circ 15'$.

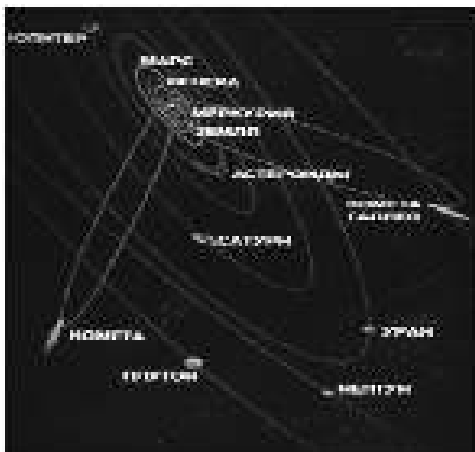


Рис. 10. Планеты Солнечной системы

Планеты обладают различной скоростью движения по своим орбитам, в чем наблюдается определенная закономерность: чем ближе планета находится к Солнцу, тем орбитальная скорость у нее больше. Меркурий, ближайшая к Солнцу планета, движется по орбите со скоростью 47,9 км/сек.; Сатурн со скоростью – 9,6 км/сек., а бывшая планета Плутон, самое удаленное от Солнца тела, – со скоростью 4,7 км/сек. Время облета планетой светила, т. е. продолжительность ее года, зависит от длины пути (орбиты) и скорости движения. Меркурий совершает свой полный облет вокруг Солнца за 88 земных суток, а Плутон – за 247 земных лет.

4.1. Солнце

Солнце – ближайшая к нам звезда Вселенной, относится к разряду желтых карликов. Солнце представляется кругом с резко очерченным краем – лимбом. Видимый диаметр Солнца в течение года изменяется из-за эллиптичности орбиты. В начале января, когда Земля находится в перигелии (ближайшее расстояние между Землей и Солнцем), видимый диаметр равен – 32'35», а в начале июля, когда Земля в афелии (наибольшее расстояние между Землей и Солнцем), видимый диаметр равен 31'31». На среднем расстоянии от Земли (1 а. е.) видимый радиус Солнца соответствует линейному расстоянию – 696000 км. Солнце – это раскаленный светящийся с поверхности газовый шар, состоящий на 70% из водорода и на 27% из гелия. Масса Солнца составляет $2,25 \cdot 10^{27}$ т, что в 329400 раз больше массы Земли ($5,98 \cdot 10^{21}$ т), а его объем приблизительно в 1300 тыс. раз больше объема Земли. Средняя плотность вещества Солнца составляет $1,41 \text{ г/см}^3$, тогда как средняя плотность Земли в 4 раза больше – $5,52 \text{ г/см}^3$, давление в его центре достигает 300 млрд атмосфер, а температура – 10–15 млн градусов. Под действием гравитации Солнце, как и любая другая звезда, стремится к сжатию, но этому препятствуют силы, возникающие из-за сверхвысоких давлений и температур в центральной области. В этих условиях ядра атомов водорода – протоны – движутся с огромными скоростями – сотни км/сек, а так как плотность вещества в центре Солнца достигает 150 г/см^3 , то между ними нередки столкновения, которые становятся началом ядерных реакций. Течение ядерных реакций, или протон-протонного цикла (рис. 10), выражается в превращении водорода в гелий. Реакция начинается с крайне редкого явления

β -распада одного из двух протонов в момент особой близости их. При β -распаде протон превращается в нейтрон с испусканием позитрона e и нейтрино ν . Объединяясь со вторым протоном, нейтрон дает ядро тяжелого водорода ${}^2_1\text{D}^2$, который при столкновении с третьим протоном образует ядро неустойчивого изотопа ${}^3_2\text{He}^3$. Два ядра такого гелия, объединяясь, образуют ${}^4_2\text{He}^4$ и испускают 2 протона.



Рис. 11. Протон-протонный цикл

Важнейшим моментом протон-протонного цикла является то, что масса ядра гелия почти на 1% меньше суммы масс четырех протонов, то есть масс ядер водорода. Эта кажущаяся потеря называется **дефектом массы** и является причиной выделения огромного количества энергии при ядерных реакциях. Формула Эйнштейна $\Sigma = m \cdot c^2$ связывает массу покоя (m), скорость света (c^2) и энергию покоя (Σ). По Эйнштейну, масса системы частиц, связанных взаимным притяжением, меньше суммы масс этих же частиц в свободном состоянии на величину $\Delta m = \Delta \Sigma / c^2$, $\Delta \Sigma$ – численное значение энергии притяжения. Эта энергия выделяется в виде γ -квантов.

Большой интерес вызывают нейтрино, выделяющиеся при ядерной реакции, которые имеют ничтожную массу покоя и почти не взаимодействуют с веществом, свободно проникают из глубин Солнца к поверхности Земли, пересекая межпланетное пространство со скоростью света. Если регистрировать поток нейтрино на Земле, то можно получить важнейшие сведения о глубинном строении Солнца и об интенсивности ядерных реакций. Для такой звезды, как Солнце, нормальный поток ней-

трино, покидающих 1 см^2 солнечной поверхности, должен составлять 100 000 000 000 (сто триллионов) частиц в 1 сек.

Ядерные реакции могут происходить только в самых глубинных частях Солнца, так как к поверхности температура и давление понижаются. Верхние слои только передают энергию, выделившуюся в виде γ -квантов. Важно то, что вместо каждого поглощенного кванта большой энергии передающие частицы-атомы, как правило, излучают несколько квантов, но меньшей энергии. Происходит это по следующей причине. Поглощая энергию, атом ионизируется, сильно возбуждается (электроны при этом соскакивают со своих оболочек) и приобретает способность излучать энергию. Однако возвращение электрона на прежний энергетический уровень происходит не сразу, а через какие-то промежуточные состояния, при этом выделяются кванты меньших энергий. Таким образом, первоначальная, большая порция энергии «дробится», поэтому вместо γ -лучей излучаются рентгеновские, вместо рентгеновских – ультрафиолетовые. Ультрафиолетовые лучи в более высоких слоях Солнца дробятся на кванты видимых и тепловых лучей, которые окончательно излучаются в окружающее пространство. Таким образом, по мере продвижения энергетического потока к поверхности Солнца длина волны электромагнитного излучения удлиняется, а температура понижается.

4.1.1. Внутреннее строение Солнца

По современным представлениям Солнце дифференцировано на ряд concentрических сфер, или областей, каждая из которых обладает специфическими особенностями (рис. 12). Схематический разрез Солнца показывает его внешние особенности вместе с гипотетическим внутренним строением.

В центре находится ядро, затем область лучевого переноса энергии, далее конвективная зона и, наконец, атмосфера. К ней относят три внешние области: фотосферу, хромосферу и корону.

Ядро – центральная область Солнца со сверхвысокими давлением и температурой, обеспечивающими течение ядерных реакций. Они выделяют огромное количество электромагнитной энергии в предельно коротких диапазонах волн.

Область лучевого переноса энергии находится над ядром. Она образована практически неподвижным и невидимым сверх-

высокотемпературным газом. Передача через него энергии, генерируемой в ядре, к внешним сферам Солнца осуществляется лучевым способом, без перемещения газа.



Рис. 12. Внутреннее строение Солнца

Конвективная область располагается над предыдущей. Она образована также невидимым раскаленным газом, находящимся в состоянии конвективного перемешивания. Конвекция (вертикальные движения) обусловлена положением области между двумя средами, резко различающимися по господствующим в них давлению и температуре. Перенос тепла из солнечных недр к поверхности происходит в результате локальных поднятий сильно нагретых масс газа, находящихся под высоким давлением, к периферии светила, где температура газа меньше и где начинается световой диапазон излучения Солнца. Толщина конвективной области оценивается приблизительно в 1/10 часть солнечного радиуса.

Фотосфера – это нижний из трех слоев атмосферы Солнца, расположенный непосредственно на плотной массе невидимого газа конвективной области. Фотосфера образована раскаленным ионизированным газом, температура которого у основания близка к 10 000 К, а у верхней границы, расположенной примерно на 300 км выше, – порядка 5000 К. Средняя температура фотосферы принимается в 5700 К. При такой

температуре раскаленный газ излучает электромагнитную энергию преимущественно в оптическом диапазоне волн. Именно этот нижний слой атмосферы, видимый как желтовато-яркий диск, зрительно воспринимается нами как Солнце.

Через прозрачный воздух фотосферы в телескоп отчетливо просматривается ее основание – контакт с массой непрозрачного воздуха конвективной области. Поверхность раздела имеет зернистую структуру, называемую грануляцией. Зерна, или гранулы, имеют поперечники от 700 до 2000 км. Положение, конфигурация и размеры гранул меняются. Наблюдения показали, что каждая гранула в отдельности выражена лишь какое-то короткое время (около 5–10 мин.), а затем исчезает, заменяясь новой гранулой. На поверхности Солнца гранулы совершают нерегулярные движения со скоростью примерно 2 км/сек. В совокупности светлые зерна (гранулы) занимают до 40% поверхности солнечного диска.

Процесс грануляции представляется как наличие в самом нижнем слое фотосферы непрозрачного газа конвективной области – сложной системы вертикальных круговоротов. Светлая ячея – это поступающая из глубины порция более разогретого газа по сравнению с уже охлажденной на поверхности, а потому и менее яркой, компенсационно погружающейся вниз. Яркость гранул на 10–20% больше окружающего фона указывает на различие их температур в 200–300°C.

Поверхность Солнца, излучающая энергию в космическое пространство в световом диапазоне спектра электромагнитных волн, – это разреженный слой газов фотосферы и просматривающаяся сквозь нее гранулированная верхняя поверхность слоя непрозрачного газа конвективной области. В целом зернистая структура, или грануляция, признается свойственной фотосфере – нижнему слою солнечной атмосферы.

Хромосфера. При полном солнечном затмении у самого края затемненного диска Солнца видно розовое сияние – это хромосфера. Она не имеет резких границ, а представляет собой сочетание множества ярких выступов или языков пламени, находящихся в непрерывном движении. Хромосферу сравнивают иногда с горящей степью.

Языки хромосферы называют спикулами. Они имеют в поперечнике от 200 до 2000 км (иногда до 10 000) и достигают в высоту нескольких тысяч километров. Их надо представлять себе как вырывающиеся из Солнца потоки плазмы (раскаленного ионизированного газа).

Установлено, что переход от фотосферы к хромосфере сопровождается скачкообразным повышением температуры от 5700 К до 8000–10000 К. К верхней границе хромосферы, находящейся приблизительно на высоте 14000 км от поверхности Солнца, температура повышается до 15000–10000 К. Плотность вещества на таких высотах составляет всего 10^{-12} г/см³, т. е. в сотни и даже тысячи раз меньше, чем плотность нижних слоев хромосферы.

Солнечная корона – внешняя атмосфера Солнца. Она образована наиболее разреженным ионизированным газом. Простирается примерно на расстояние 5 диаметров Солнца, имеет лучистое строение, слабо светится. Ее можно наблюдать только во время полного солнечного затмения. Яркость короны примерно такая же, как у Луны в полнолуние, что составляет лишь около 5/1000000 долей яркости Солнца.

4.1.2. Физические процессы на Солнце

К физическим процессам на Солнце относятся: лучистый перенос энергии из центральной области к периферии, конвективное движение газа во внешнем слое Солнца, явление хромосферных спикул. На фоне равенства прихода и расхода энергии в атмосфере Солнца интенсивно протекают вихревые неупорядоченные или турбулентные движения газов. Они же характерны и для конвективной области. Движения газов на поверхности Солнца и в ее атмосфере представлены в виде солнечных пятен, солнечных факелов, флоккулов и протуберанцев. Все они обусловлены взаимодействием различных магнитных полей.

Солнечные пятна. В разных местах солнечной поверхности можно увидеть почти черные образования – пятна. Их поперечник может достигать многих тысяч километров. Они распределяются на фоне видимого диска Солнца неравномерно – то одиночно, то группами. Пятна существуют от нескольких часов до нескольких месяцев, а затем исчезают, и вместо них появляются новые пятна.

Образующий Солнце газ является прекрасным проводником электричества, особенно в центральной области, где условия экстремальны. В целом Солнце обладает единым магнитным полем и, кроме того, локальными полями. Например, вокруг солнечных пятен магнитные поля имеют напряженность в среднем 3000 Э (эрстед), у Земли магнитное в 7500 раз слабее. Температура пятен на 1000°–2000° ниже температуры фотосферы в целом.

Пятна и их скопления образуют на Солнце активные области. Изменение положения пятен, их количество и подвижность циклически меняются. Наиболее известным является 11-летний цикл (11,2 года) активности пятен – это осредненный срок, фактически же он колеблется от 7,5 до 16 лет. Ритм изменения солнечной активности отражается на многих процессах и явлениях земной поверхности и ее атмосферы (полярные сияния, магнитные бури).

Солнечные факелы и флоккулы. На краю солнечного диска, там, где находятся верхние, более холодные слои нижней атмосферы, часто наблюдаются светлые факелы. Полагают, что они имеют несколько более высокую температуру, чем фотосфера, поскольку газ в них ионизирован сильнее, т.е. у него меньше нейтральных атомов. Факелы могут достигать в высоту тысячи и даже десятки тысяч километров. В хромосфере над факелами располагаются светлые облака – флоккулы, имеющие по вертикали размеры в тысячи и сотни тысяч километров. Что же касается распространенности их в горизонтальном направлении, то в совокупности они занимают от 10 до 30% площади солнечного диска. Различают флоккулы, образованные преимущественно либо ионизированным водородом, либо кальцием.

Протуберанцы – особые формы неупорядоченного движения газов в солнечной атмосфере. Они наблюдаются на краю диска, имеют разнообразную и постоянно меняющуюся форму струй, фонтанов, арок, деревьев, облаков или столбов дыма и т. д., скорости движений протуберанцев могут измеряться сотнями километров в секунду.

До сих пор недостаточно раскрыта физическая сущность явлений протуберанцев. Очевидно, что неупорядоченные движения газовых масс объясняются неравномерностью теплового поля солнечной атмосферы и, следовательно, различной степенью ионизации ее газов, непостоянством магнитного поля, давления света и другими факторами. Можно лишь с уверенностью утверждать, что физические процессы на поверхности Солнца и в его атмосфере имеют совершенно особый, несравнимый с процессами на Земле характер, что исключает возможность сопоставления их между собой.

4.1.3. Солнечная энергия

Среднее количество вырабатываемой при ядерных реакциях энергии в расчете на грамм вещества в секунду составляет 1,92 эрга (1 эрг равен

работе силы в 1 дин при перемещении точки приложения силы на расстояние 1 см в направлении действия силы). Часть этой энергии идет на поддержание в центральной области сверхвысоких температур, необходимых для ядерных реакций, а остальная излучается Солнцем в межпланетное пространство. Мощность общего излучения Солнца $3,83 \cdot 10^{26}$ Вт, из которых на Землю попадает около $2 \cdot 10^{17}$ Вт, т. е. приблизительно одна двухмиллиардная часть. С 1 см² поверхности Солнца в 1 секунду излучается энергии 6000 Вт.

Излучаемый Солнцем поток энергии уносит из него ежегодно $1,4 \cdot 10^{13}$ т вещества. И хотя эта величина, по нашим земным понятиям, огромна, по сравнению с массой светила она ничтожна: потребуется невероятно огромное время, чтобы Солнце израсходовало на излучение энергии все свое вещество и таким образом перестало бы существовать. Но до такого состояния Солнца далеко – приблизительно 10 млрд лет.

Солнце генерирует и испускает в космическое пространство два основных потока энергии – электромагнитное излучение, или солнечную радиацию, и корпускулярное излучение, или солнечный ветер. Энергетические потоки Солнца обладают высокой мощностью в пределах близко расположенных космических тел. Далекие тела получают сильно ослабленные потоки энергии, и потому их значение в энергетическом балансе планет становится меньшим. Тем не менее тепловое поле поверхности всех планет Солнечной системы создается почти исключительно солнечной радиацией, так как приход эндогенной энергии планет к поверхности крайне незначителен. Вот почему для планет внутренней группы – Меркурия, Венеры, Земли и Марса – значение солнечной энергии особенно велико. Для сравнения природных условий на этих планетах необходимо ознакомиться с мощностью потоков солнечной энергии и особенностью ее поглощения.

4.1.3.1. Солнечная радиация

Согласно современной квантовой теории, излучение электромагнитной энергии Солнца происходит не непрерывно, а порциями квантами. Каждый квант несет определенную энергию. Она измеряется обычно электрон-вольтами (эВ). **Электрон-вольт – это количество энергии, которое приобретает свободный электрон, ускоренный электрическим полем с разностью потенциалов в 1 вольт (В).** Солнечные кванты могут иметь самую различную энергию – от миллионов электрон-вольт

до миллионных долей электрон-вольта. Иначе говоря, кванты электромагнитного излучения могут различаться по энергии в миллиарды раз!

Электромагнитное излучение имеет волновой характер. Каждому кванту определенной энергии свойственна волна излучения определенной длины, что позволяет характеризовать электромагнитное излучение не только в квантах разной мощности, но и в длинах волн. Они измеряются в разных единицах длины: короткие волны квантов большой энергии – ангстремами (Å), что составляет 1/100 млн часть сантиметра (10^{-8} см). Более длинные волны измеряются последовательно – миллиметрами, сантиметрами, дециметрами, метрами и километрами. Имеются и промежуточные единицы – микрометры (мкм) = 10^4 Å.

Совокупность всех видов квантов, расположенных последовательно с возрастанием их энергии, называется спектром электромагнитного излучения Солнца. Соответственно спектр солнечной радиации можно выразить через волны различной длины. Непрерывный спектр электромагнитного излучения (табл. 2) условно разделен по длине волн на диапазоны: гамма-излучение, рентгеновское, ультрафиолетовое; все это – ультракоротковолновая радиация, которая имеет высокие значения энергии и не воспринимается человеческим глазом. Далее следует оптический, или световой, диапазон. За ним опять идут два невидимых диапазона электромагнитных волн – инфракрасный и радиоволновой.

Таблица 2

**Дифференциация потока солнечной радиации
по длине волн и энергии фотонов излучения (по М. М. Ермолаеву, 1969)**

Диапазон излучения	Длина волн в (Å)*	Энергия фотонов (эВ)**
1	2	3
Гамма-лучи	1	10^4
Рентгеновское	1–650	9,5
Ультрафиолетовое	763–2884	5,8–4,3
Оптический диапазон:		
Фиолетовое	4550	2,7
Голубое	4920	2,5
Зеленое	5500	2,2
Желтое	5880	2,1
Оранжевое	6470	1,9
Красное	< 7600	1,6

1	2	3
Инфракрасное	$7600\text{--}5\cdot 10^6$	1,5
Радиоволны	$> 5\cdot 10^6$	

*Å – ангстрем – единица длины волн, равная 10^{-11} см;

**эВ – электрон-вольт – единица измерения энергии кванта, равная $1,6\cdot 10^{-19}$

Дж. Это энергия, которую приобретает электрон, когда разгоняется электрическим полем напряжением 1 вольт.

Распределение энергии в спектре неравномерное. На всю коротковолновую часть спектра – от длин волн менее одного ангстрема до 4000 Å , т. е. на гамма-лучи, рентгеновские и ультрафиолетовые лучи, – приходится только 7% энергии солнечной радиации. На оптический диапазон спектра – электромагнитные волны в интервале длин $4000\text{--}7600\text{ Å}$ – приходится 48% энергии. Именно к оптическому диапазону приурочен максимум излучения, соответствующий сине-зеленому интервалу световой гаммы излучения. Остальные 45% энергии солнечной радиации содержатся в основном в инфракрасном излучении – в волнах длиннее 7600 Å ; из этого количества энергии лишь незначительная часть приходится на радиоизлучение.

Волны электромагнитного излучения в зависимости от своей длины и соответственно энергии обладают многими индивидуальными свойствами, имеющими большое значение для формирования природных условий на планетах. Особенностью волн является их избирательная способность проникать в газовую и водную среды.

При встрече потока квантов с веществом энергия радиационного потока может изменить молекулярную или атомную структуру вещества. Такого рода фотохимические реакции подчиняются определенным ограничениям; реакция возможна только в том случае, если вещество, на которое падает фотон, способно этот фотон поглотить. Для каждого фотохимического акта необходимо поглощение одного кванта (фотона) одной реагирующей с ним частицей. Таким образом, для возбуждения реакции недостаточно иметь определенный запас энергии, надо еще, чтобы этот запас мог быть передан веществу, а это определяется свойствами его частиц, т. е. их структурой. Хорошими поглотителями колебаний, совершающихся с определенной частотой, являются системы, способные сами производить такие же колебания с той же частотой. Наибольшей прони-

цаемостью обладают самые длинные волны – радиоволны. Ни одна, даже самая плотная атмосфера, не является для них непреодолимым препятствием, в то время как волны всех других диапазонов на разных высотных уровнях могут полностью поглощаться атмосферами.

Поскольку радиоволны свободно проникают через газовые среды, с их помощью можно изучать поверхности многих небесных тел, куда лучи светового диапазона из-за атмосферы проникнуть не могут. Необыкновенно плотная атмосфера Венеры не позволяет пользоваться оптическими средствами для знакомства с ее поверхностью. Используя радиоволны (применяя радиолокации), ученые изучают рельеф поверхности планеты.

4.1.3.2. Корпускулярное излучение (солнечный ветер)

Газы солнечной короны в высокой степени ионизированы, что определяет их температуру примерно в 1 млн градусов. Внешние слои короны излучают в космическое пространство коронарный газ – **солнечный ветер**, представляющий собой корпускулярное излучение (корпускула – мельчайшая частица вещества), состоящее из электронов и протонов, в меньшей степени – из ядер гелия, других элементов. Еще коронарный газ называют потоком плазмы. Это второй энергетический (после лучистого электромагнитного) поток Солнца, получаемый планетами. Скорость распространения коронарного газа возрастает от нескольких километров в секунду у короны – до 450 км/сек на уровне орбиты Земли, что связано с уменьшением силы притяжения Солнца при увеличении расстояния. Постепенно разрежаясь, по мере удаления от Солнца, солнечный ветер заполняет все межпланетное пространство. Он воздействует на тела Солнечной системы как непосредственно, так и через магнитное поле, которое несет с собой. Оно взаимодействует с магнитными полями планет. Именно солнечный ветер является основной причиной полярных сияний на Земле и активности других процессов магнитосферы.

Температура ионизированного газа солнечной короны оценивается в 1 млн градусов. Термин «корпускулярное излучение» означает, что унос от Солнца вещества осуществляется не как непрерывный процесс, а порциями – частицами, корпускулами.

Ионизированный газ корпускулярного излучения, непрерывно испускаемый солнечной короной, постепенно ослабевая по мере движения к периферии Солнечной системы, заполняет ее всю и выходит в межзвезд-

ное пространство. Таким образом, окружающее планеты (и, в частности, Землю) пространство не является в строгом смысле слова вакуумом, а содержит рассеянную материю и потоки энергии. Одной из характерных особенностей солнечного ветра является присущее ему магнитное поле. Те планеты, которые не имеют своего магнитного поля (Луна, Венера), позволяют плазменному потоку солнечного ветра беспрепятственно проникать через атмосферу (где она имеется) до их поверхности и на атомарном уровне взаимодействовать с ее веществом. Иначе происходит, если у планеты есть сильное магнитное поле. Ярким примером сказанного может служить Земля, где процесс взаимодействия магнитных полей хорошо изучен. Сильное магнитное поле планеты препятствует проникновению потока плазмы к ее поверхности, и он вынужден обтекать ее на высоте нескольких земных радиусов.

Вопросы к разделу 4.1. Солнце

1. На чем основано единство Солнечной системы?
2. Каково соотношение водорода и гелия на Солнце?
3. Какова плотность вещества в центральной части Солнца?
4. Как проявляется дефект массы в протон-протонном цикле?
5. Какую информацию несет поток нейтрино, регистрируемых на Земле?
6. В чем причина возникновения зоны конвективного переноса энергии?
7. Какими формами представлены движения газов на поверхности Солнца и в его атмосфере, и чем это движение обусловлено?
8. Какие виды энергии генерирует и излучает Солнце?
9. Каким важнейшим индивидуальным свойством обладают волны электромагнитного излучения?
10. Какой вид энергии обеспечивает формирование природных условий на планетах?
11. Какое влияние оказывает солнечный ветер на процессы, происходящие на планетах?

4.2. Общая характеристика планет

Среди многочисленных небесных светил, изучаемых современной астрономией, особое место занимают планеты – самые крупные космические тела Солнечной системы. По своей массе и размеру они уступают толь-

ко Солнцу. Всего планет восемь, до недавнего времени к ним относили Плутон, теперь же известно, что он является одним из крупнейших объектов пояса Койпера.

В мире планет не встречается даже двух, совершенно похожих друг на друга, что связано с разнообразием физических условий на планетах, которые, в свою очередь, зависят от множества факторов, например, таких, как расстояние планеты от Солнца, определяющее количество солнечного тепла и температур поверхности, размеры, напряжение силы тяжести на поверхности, ориентировка оси вращения, определяющая смену времен года, наличие и состав атмосферы, внутреннее строение и многие другие (рис. 13).



Рис. 13. Сравнительные размеры и внешний вид планет

Изучение физических условий на планетах позволяет выявить особенности их развития и взаимосвязь между теми или иными свойствами планет. Так, например, от размеров, массы и температуры планеты зависит ее способность удерживать атмосферу того или иного состава, а наличие атмосферы, в свою очередь, влияет на тепловой режим планеты. Зарождение и дальнейшее развитие живой материи возможно только на планетах, поэтому только на них можно искать признаки жизни. Вот почему изучение планет, помимо общего интереса, имеет большое значение с точки зрения космической биологии, геологии, геофизики, географии, экологии.

Современные представления о планетах складывались в течение многих веков в упорной борьбе новых, прогрессивных знаний с взглядами старыми, отживающими.

В древних представлениях о Вселенной Земля считалась плоской, а планеты рассматривались лишь как светящиеся точки на небесном своде, отличавшиеся от звезд только тем, что они перемещались между ними, переходя из созвездия в созвездие. За это планеты и получили название, означающее «блуждающие». Наблюдателям древности было известно пять планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Даже после того, как была установлена шарообразная форма Земли, и были впервые определены ее размеры (Эратосфеном в III в. до н. э.), после того, как стала очевидна ограниченность Земли в пространстве, о природе планет ничего не было известно. И все же во взглядах выдающихся мыслителей древности: Анаксагора, Демокрита, Эпикура, Лукреция встречаются идеи о материальности и бесконечности Вселенной, заполненной бесчисленным количеством миров, подобных нашему, причем многие из них могут быть населены живыми существами. Начиная с IV в. до н. э., господствующим в науке стало мировоззрение Аристотеля, согласно которому Земля является неподвижным центром мира, а Солнце, Луна, планеты и звезды обращаются вокруг нее. Так возникла **геоцентрическая система мира**, просуществовавшая в науке почти 2000 лет. Как известно, любая из планет перемещается по небу среди звезд вдоль эклиптики – большого круга небесной сферы, который описывает центр солнечного диска в течение года. Большую часть времени планеты движутся в ту же сторону, что и Солнце (прямым движением). Но время от времени планеты изменяют прямое движение на иное, направленное в сторону, противоположную видимому годичному движению Солнца. Попытное – продолжается от трех недель (для Меркурия) до 4,5 месяцев (для Сатурна) и затем снова сменяется прямым движением, так что планета как бы описывает на небе петлю. Лишь в середине XVI века великий польский ученый Николай Коперник высказал идею о том, что Земля не является центром мира, а обращается вокруг Солнца так же, как и другие планеты. Его гениальная книга «Об обращении небесных сфер», вышедшая в 1543 г., в корне изменила представления об устройстве Солнечной системы и о движении планет и Земли.

Рассматривая Землю как небесное тело, которое наряду с другими планетами обращается вокруг Солнца, Коперник своими трудами подготовил логический вывод о том, что не только характер движения, но и сама природа планет и Земли должна быть одинакова. Этот вывод был сделан выдающимся последователем Коперника итальянским мыслите-

лем Джордано Бруно и подтвержден в результате телескопических открытий Галилея.

Планеты представляют собой темные, несамосветящиеся тела, освещаемые Солнцем и отражающие его лучи. Такое определение небесных тел распространяется не только на планеты Солнечной системы, но и на системы других звезд.

Отличить на небе планету от звезды можно по целому ряду признаков. Прежде всего, планеты перемещаются между звездами, их перемещение можно заметить, проводя наблюдения в течение нескольких вечеров. Такие планеты, как Венера и Юпитер, легко распознать, так как по блеску они намного превосходят самые яркие из звезд. Отличительным признаком каждой планеты является ее цвет: у Венеры он белый, у Марса – красноватый, у Юпитера – желтовато-белый, у Сатурна – желтый. Отличить планету от звезды можно еще благодаря тому, что все звезды мерцают, а планеты обычно светят ровным, почти немигающим блеском. Мерцание звезд вызывается колебаниями воздуха, сквозь который проходят лучи на пути к глазу наблюдателя. Но звезды даже в самые сильные телескопы представляются точками, а планеты имеют заметные видимые размеры, так как они гораздо ближе к нам, чем звезды. Каждая точка диска планеты тоже как бы мерцает, т.е. изменяет свой блеск, но при этом усиление блеска в одной точке сопровождается ослаблением его в другой. В результате эти «мерцания» отдельных точек планетного диска, складываясь, создают постоянную во времени яркость каждого участка диска, и свет от диска в целом тоже получается неизменным. Чтобы отличать одну планету от другой и находить на небе, надо знать основные созвездия и яркие звезды, особенно так называемые зодиакальные созвездия, по которым передвигается Солнце, Луна и планеты. Таких созвездий двенадцать: Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей, Рыбы.

Все планеты делятся на нижние и верхние (с точки зрения земного наблюдателя). К нижним планетам относятся Меркурий и Венера, которые в своем видимом движении по небу никогда не отходят далеко от Солнца. Угол наибольшего видимого удаления (элонгация) нижней планеты от Солнца зависит от соотношения радиусов орбит планеты и Земли. Эпохи наибольших элонгаций – лучшее время для наблюдения Меркурия и Венеры.

Верхние планеты (Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) могут наблюдаться на любом расстоянии от Солнца – до 180° включительно. Де-

ление планет на нижние и верхние было сделано сначала на основе различия их видимого движения по небу. Но уже Коперник объяснил это различие тем, что нижние планеты расположены ближе к Солнцу, чем Земля, а верхние планеты – дальше.

Время от времени планеты Солнечной системы, двигаясь по своим орбитам, близко подходят друг к другу – «сближаются», такое явление в астрономии называется соединением. В пространстве никакого сближения не происходит, просто они видны в одном направлении с Земли, и это сближение кажущееся. Соединения планет случаются ежегодно по несколько раз. Различие лишь в расстоянии между планетами, которое может составлять от нескольких угловых минут до нескольких градусов. Такой диапазон расстояний связан с тем, что орбиты планет расположены не точно в плоскости эклиптики, а наклонены к ней под разными углами от $0,773^\circ$ у Урана до $7,005^\circ$ у Меркурия, а у Плутона этот угол составляет 17° (рис. 14).



Рис. 14. Наклоны орбит планет к плоскости эклиптики

Если бы орбиты всех планет Солнечной системы лежали в одной плоскости, то покрытия планет друг другом происходили бы регулярно. Замечательное сближение планет на фоне восходящей Луны (парад планет) произойдет 27 апреля 2022 года (рис. 15)

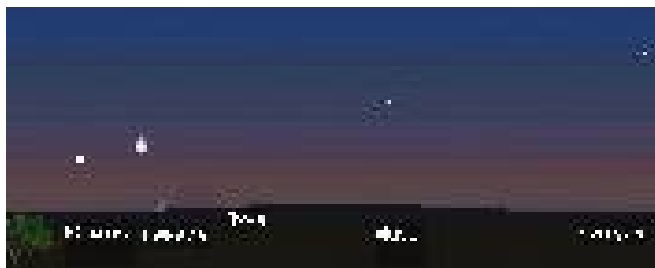


Рис. 15. Парад планет

4.2.1. Движение планет

Чем ближе планеты к Солнцу, тем больше линейная и угловая скорости их обращения вокруг Солнца. *Период обращения планет вокруг Солнца по отношению к звездам называется звездным периодом.* Такой период обращения Земли относительно звезд называется звездным годом. Наименьший звездный период обращения у Меркурия. По мере удаления планеты от Солнца период обращения увеличивается: у Марса он составляет около 2 лет, у Юпитера – 12 лет, у Плутона 250 лет.

Заслуга открытия законов движения планет принадлежит выдающемуся австрийскому ученому Кеплеру. В начале XVII в. Кеплер установил три закона движения планет. Они названы законами Кеплера. **Первый закон Кеплера: каждая планета обращается вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.**

Эллипсом называется плоская замкнутая кривая, имеющая такое свойство, что сумма расстояний каждой ее точки от двух точек, называемых фокусами, остается постоянной.

Степень вытянутости эллипса характеризуется величиной его эксцентриситета. Эксцентриситет равен отношению разности большого и малого радиусов к сумме радиусов и показывает меру отклонения эллипса от правильного круга.

Ближайшая к Солнцу точка орбиты называется перигелием, а самая далекая от него точка называется афелием. Орбиты планет – эллипсы, мало отличающиеся от окружностей, их эксцентриситеты очень малы. Например, для расчета эксцентриситета орбиты Земли надо получить отношение разности большого и малого радиусов орбиты к их сумме. В афелии Земля удалена от Солнца на 152 000 000 км, а в перигелии на 147 000 000 км, значит

$$e = 152 \text{ млн км} - 147 \text{ км} / 152 \text{ млн км} + 147 \text{ млн км} = 0,017.$$

Эксцентриситеты орбит у комет приближаются к единице. При $e=1$ второй фокус эллипса удаляется (в пределе) в бесконечность, так что эллипс становится разомкнутой кривой, называемой параболой. Ее ветви в бесконечности стремятся стать параллельными. При $e>1$ орбита является гиперболой. Двигаясь по параболе или гиперболе, тело только однажды огибает Солнце и навсегда удаляется от него.

Кеплер открыл свои законы, изучая периодическое обращение планет вокруг Солнца. Ньютон, исходя из законов Кеплера, открыл закон все-

мирного тяготения. При этом он нашел, что под действием взаимного тяготения тела могут двигаться друг относительно друга по эллипсу, в частности по кругу, по параболе и по гиперболе. Выяснилось, что некоторые кометы огибают Солнце, двигаясь по параболе или по гиперболе. В таком случае они уходят из солнечной системы и уже не являются ее членами.

Ньютон установил, что *вид орбиты, которую описывает тело, зависит от его скорости*. При некоторой скорости тело описывает окружность около притягивающего центра. Такую скорость называют первой космической скоростью и придают телам, запускаемым в качестве искусственных спутников Земли (направляя эту скорость горизонтально). Первая космическая скорость составляет около 8 км/сек. Если телу сообщить вторую космическую скорость, около 11 км/сек, то тело навсегда удалится от Земли и может стать спутником Солнца. В этом случае движение тела будет происходить по параболе относительно Земли. При еще большей скорости относительно Земли тело полетит по гиперболе.

Средняя скорость движения Земли по орбите 30 км/сек. Орбита Земли близка к окружности, а скорость Земли по орбите близка к круговой на расстоянии Земли от Солнца. Параболическая скорость для Земли должна составлять 42 км/сек. При такой скорости относительно Солнца тело покинет Солнечную систему.

Второй закон Кеплера (закон площадей): радиус-вектор планеты за одинаковые промежутки времени описывает равные площади. Радиусом-вектором планеты называется отрезок прямой, соединяющий планету с Солнцем. Скорость планеты при движении ее по орбите тем больше, чем ближе она к Солнцу. В перигелии скорость планеты наибольшая. Второй закон Кеплера количественно определяет изменение скорости движения планеты по эллипсу.

Третий закон Кеплера: квадраты звездных периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит. Третий закон Кеплера связывает средние расстояния планет от Солнца с периодами их звездных обращений и позволяет большие полуоси всех планетных орбит выразить в единицах большой полуоси земной орбиты. *Большую полуось земной орбиты называют астрономической единицей (а. е.) расстояний.* В астрономических единицах средние расстояния планет от Солнца были определены раньше, чем узнали длину астрономической единицы в километрах.

Планеты-гиганты быстро совершают один оборот вокруг своей оси (10–18 часов). При этом разные слои вращаются с разной скоростью:

слой планеты, расположенный вблизи экватора, вращается быстрее всего, а околополярные области – медленнее. Отсутствие твердых поверхностей вызывает при вращении сильное полярное сжатие, наблюдаемое в простой телескоп. Солнце, являясь газовым шаром, тоже вращается слоями, но с периодом 25–35 суток.

4.2.2. Планетные оболочки. Дифференциация недр

4.2.2.1. Химический состав вещества планеты

Вещество, из которого сложены тела Солнечной системы, можно условно разделить на три группы.

«Земное вещество» – это горные породы, состоящие из различных минералов, которые хорошо известны на Земле. Современные знания позволяют прогнозировать характер глубинных пород, из которых состоят земные недра. Анализ доступного в настоящее время внеземного вещества показал его общее сходство с земным веществом по химическому и минералогическому составу. Основными минералообразующими элементами во всех случаях являются **кремний, железо, алюминий, магний и титан** в окисленном состоянии, то есть при значительном включении кислорода в химические соединения. Средняя температура плавления этих материалов достигает почти 2000 К.

«Земное вещество» более чем на 99% образует планеты земного типа (рис. 16), астероиды и отдельные спутники – это тела с большой плотностью (3,0–5,5 г/см³) слагающего их вещества и твердой поверхностью. (О планетах земной группы более подробно будет сказано в последней главе). Вещество может находиться в твердом или расплавленном (в недрах) состоянии. Твердая поверхность контактирует или с внешними оболочками (Земля, Венера, Марс), или непосредственно с вакуумом межпланетного пространства (Меркурий, Луна, спутники планет, астероиды). На долю тел этой группы приходится малая доля процента массы Солнечной системы.

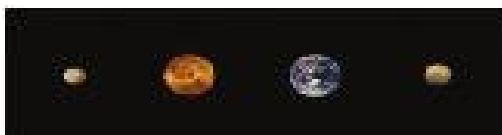


Рис. 16. Меркурий, Венера, Земля, Марс

«Льды» – углерод, азот, кислород и в меньшем количестве водород, входящий в некоторые химические соединения, составляют распространенную группу планетных летучих веществ. В виде газов эти элементы образуют атмосферы отдельных планет или крупных спутников. Но чаще летучие компоненты вещества Солнечной системы существуют при температурах ниже 273 К в твердом состоянии, то есть в виде льда. Большая часть спутников, относящихся к системам планет-гигантов, состоит в основном из «льдов» с некоторой примесью «земного вещества». (Те же составляющие, но в другой пропорции, характерны для комет). Юпитер и Сатурн в основном состоят из «солнечного вещества» с примесями «льдов» и «земного вещества». Для Урана и Нептуна основным веществом являются «льды».

«Солнечное вещество» – это газы, такие как водород и гелий, наиболее обильно встречающиеся на Солнце, с небольшими примесями неона, аргона и некоторых других элементов. Температура кипения подобной смеси составляет около 15 К.

Планеты-гиганты внешней группы системы: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун состоят в основном из легких элементов. Они представляют собой газовые шары с малой плотностью вещества ($0,7\text{--}1,41\text{ г/см}^3$), но на их долю приходится почти вся масса Солнечной системы.

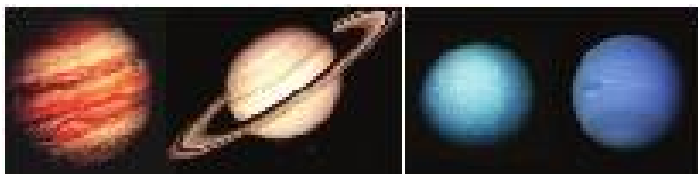


Рис. 17. Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун

Атмосферы Юпитера и Сатурна состоят из легких элементов: водорода и гелия. Уран и Нептун в значительной степени содержат в себе метан (CH_4), аммиак (NH_3), воду и другие не слишком тяжелые соединения. Других элементов гораздо меньше. Выяснено, что с увеличением массы гиганта растет и его атмосфера. Следовательно, самой обширной атмосферой обладает Юпитер. Уран и Нептун, близкие по массе, мало отличаются и своими атмосферами. Сатурн занимает промежуточное положение. Разница в химическом составе гигантов обусловлена ходом эволюции Солнечной системы.

4.2.2.2. Внутреннее строение

Вещество планет дифференцировано по вертикали и образует несколько сферических оболочек, различающихся по химическому составу, фазовому состоянию, плотности и другим физико-химическим характеристикам. Все планеты земной группы имеют твердые оболочки, в которых сосредоточена почти вся их масса. Три из них – Венера, Земля и Марс – обладают газовыми атмосферами, Меркурий практически лишен атмосферы. Из всех планет только Земля имеет жидкую водную оболочку – гидросферу, а также биосферу – сферу жизни. Аналогом гидросферы на Марсе является криосфера – лед H_2O в полярных шапках и в грунте (вечная мерзлота). Одна из загадок Солнечной системы – дефицит воды на Венере. Жидкой воды там нет из-за высокой температуры, а количество водяного пара в атмосфере эквивалентно слою жидкости толщиной ≈ 1 см.

Твердые оболочки планет находятся в состоянии гидростатического равновесия, поскольку предел текучести горных пород соответствует весу столба пород высотой ≈ 10 км (для Земли). Поэтому форма твердых оболочек планет, имеющих большую мощность, почти сферическая. Из-за различия гравитационных сил различна максимальная высота гор на планетах (например, на Земле около 9 км, а на Марсе, где гравитационное поле слабее земного, – около 25 км). Форма небольших спутников планет и астероидов может заметно отличаться от сферической.

Характеристики твердых оболочек планет относительно хорошо известны лишь у Земли (по данным о прохождении через недра сейсмических волн, возникающих при землетрясениях). Модели внутреннего строения других планет земной группы строятся на основании данных о свойствах вещества земных недр (рис. 18). Как и у Земли, в твердых оболочках планет выделяют кору – самую внешнюю тонкую (10–100 км) твердую оболочку, мантию – твердую и мощную (1000–3000 км) оболочку, расположенную под корой, и ядро. У Земли ядро подразделяется на внешнее (жидкое) и внутреннее (твердое). Жидкое ядро, вероятно, есть также у Меркурия и Венеры, у Марса его, по-видимому, нет. Ядро – наиболее плотная часть планетных недр ($12,5 \text{ г/см}^3$ в центре Земли), кора наименее плотная (для Земли $2,8 \text{ г/см}^3$), плотность мантии промежуточная. Мантия Земли делится на три слоя, причем в нижней мантии температура близка к точке плавления. Температура в центре Земли оценивается в 4000–5000 К.

Наиболее обильные элементы в «твердом» теле Земли – Fe (34,6%), O (29,5%), Si (15,2%) и Mg (12,7%). Наиболее распространенные соединения в коре – SiO_2 и Al_2O_3 . Ядро, по-видимому, состоит из железа. Таким образом, по элементному составу планеты земной группы резко отличаются от Солнца и совершенно не соответствуют средней космической распространенности элементов (очень мало водорода, а также инертных газов, включая гелий).

Планеты-гиганты обладают иным химическим составом. Юпитер и Сатурн содержат водород и гелий в той же пропорции, что и Солнце. Вероятно, другие элементы также содержатся в пропорциях, соответствующих солнечному составу. В недрах Урана и Нептуна тяжелых элементов, по-видимому, больше.

Недра Юпитера находятся в жидком состоянии, за исключением небольшого каменного ядра (рис. 19). Жидкий водород на глубине ~ 25 000 км, по-видимому, металлизуется. Выше этой границы расположена зона молекулярного водорода, ниже – металлического. Температура в центре Юпитера ~ 30000 К. Сатурн по внутреннему строению похож на Юпитер. Строение недр Урана и Нептуна иное: доля каменных материалов в них существенно больше. Тепловая энергия, выделяющаяся из недр Юпитера и Сатурна, возможно, была аккумулирована еще в эпоху их формирования.

Луна по составу и внутреннему строению похожа на планеты земной группы. Тяжелое ядро у нее, видимо, отсутствует. Четыре крупных спутника Юпитера (Галилеевы спутники) по характеру внутреннего строения неодинаковы. Ганимед и Каллисто имеют большие каменные ядра, толстые водные мантии (жидкие либо твердые) и ледяную кору. Европа водной мантии не имеет, но у нее есть ледяная кора. На Ио льда нет, недра этого спутника каменные, они частично расплавлены, о чем свидетельствуют активные вулканические явления. Спутник Сатурна

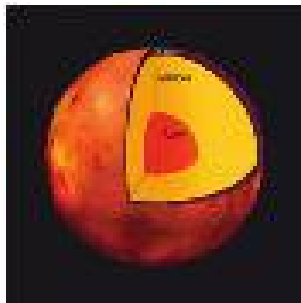


Рис. 18. Внутреннее строение планет земной группы

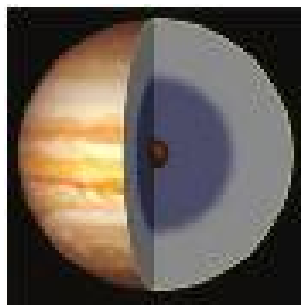


Рис. 19. Внутреннее строение планет гигантов

Титан – единственный среди спутников, имеющий плотную атмосферу (давление у поверхности около 1,5 атм., состоит она в основном из азота). По внутреннему строению он, вероятно, схож с Ганимедом и Каллисто. Большинство других спутников Сатурна, скорее всего, целиком состоят из водяного льда.

4.2.2.3. Процессы в недрах планет земной группы.

Рельеф поверхности

Основными источниками энергии в недрах планет является радиоактивный распад элементов и гравитационная дифференциация вещества. Второй процесс представляет собой постепенное перераспределение вещества по глубине в соответствии с плотностью – тяжелые фрагменты тонут, легкие всплывают. Такое перераспределение на Земле еще далеко до завершения. Вещество внутри Земли непрерывно перемещается, этому способствует не только гравитационная дифференциация, но и осевое вращение. Движение как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении сопровождается фазовыми переходами и изменениями химического состава горных пород и минералов. Эндогенные (внутренние, глубинные) процессы влияют на земную кору, вызывая перемещения отдельных ее участков – литосферных плит, деформацию, горообразование, вулканические процессы, землетрясения. Судя по характеру поверхности среди планет земной группы, Земля в тектоническом отношении наиболее активна, за ней следуют Венера и Марс.

Поверхности планет и их спутников формируются под действием как эндогенных процессов, так и экзогенных (внешних). Одним из важнейших экзогенных процессов является переработка поверхности планет падающими на нее метеоритными телами, образующими характерные кратеры и измельчающими материал поверхности. К экзогенным процессам относятся также механическая эрозия под действием ветра (коррозия), осадков, воды, ледников, химическое взаимодействие поверхности с атмосферой и гидросферой. На Земле к перечисленным факторам добавляется воздействие биосферы. Строение поверхности определяется тем, какие процессы главенствуют в различные периоды времени.

В Солнечной системе эндогенные процессы наиболее активны сейчас на Земле и на Ио (спутнике Юпитера), поэтому на этих телах мало следов метеоритной бомбардировки. По-видимому, только на Земле хорошо выражена так называемая тектоника плит – перемещение крупных

блоков земной коры. На Земле большой вклад в формирование поверхности вносят атмосферная, водная и ледниковая эрозии. Признаки действия экзогенных процессов этого типа имеются на Марсе, но они выражены намного слабее, так же как и тектоническая активность. На поверхности всех тел, лишенных плотной атмосферы и обладающих относительно слабой тектонической активностью, наиболее важным остается процесс метеоритной бомбардировки.

Наиболее типичными формами рельефа Земли, Марса и Венеры является:

1) континентальные блоки и океанические впадины. Это наиболее крупномасштабные элементы рельефа. Лишь на Земле океаны заполнены водой;

2) горные цепи хорошо выражены только на Земле. Это складки тектонического происхождения;

3) вулканы имеются на Земле, Марсе, Венере, Ио. Из них действующие – только на Земле и Ио. Видимо, Ио – наиболее активное в отношении вулканизма тело в составе Солнечной системы. Были предложены две гипотезы о возможных источниках энергии, обеспечивающих вулканизм на Ио: а) мощные приливы, обусловленные гравитационным полем Юпитера; б) электрические токи, возникающие при движении Ио в магнитном поле Юпитера;

4) долины тектонического происхождения («разломы») имеются на Земле, Венере и Марсе;

5) метеоритные кратеры – наиболее распространенная форма рельефа на поверхности Меркурия (рис. 20), Луны, спутников Марса – Фобоса и Деймоса, спутников Юпитера – Ганимеда, Каллисто (рис. 5, вверху), Европы, спутников Сатурна – Дионы, Мимаса, Тефии, Реи и, вероятно, почти всех тел Солнечной системы, имеющих достаточно разреженную атмосферу и твердую поверхность. Размеры кратеров – от долей метров до десятков и сотен км. Метеоритные кратеры имеются в большом количестве на поверхности Марса. При помощи радиолокационных методов они обнаружены на Венере. На Земле настоящих метеоритных кратеров почти не обнаружено, однако имеются кольцевые структуры – «астроблемы» – слабо выраженные следы древних метеоритных кратеров. В большинстве случаев следы метеоритной бомбардировки на Земле стерты эрозионной деятельностью и другими экзогенными процессами;

6) бассейны – приблизительно круглые низменности, заполненные застывшей лавой. Они имеют диаметр от нескольких сот до 1000 км. Наи-

более четко бассейны выражены на Луне, но имеются также на Марсе и Меркурии. Они образовались в результате падения крупных планетезималей (планетных зародышей, астероидальных тел) около 4 млрд лет назад. При таких падениях кора растрескивалась, гигантские кратеры заполнялись лавой. Лунные моря являются типичным примером бассейнов;

7) образования, связанные с водной и ледниковой эрозией, а также с золовой деятельностью (перенос пылевого вещества ветром), наблюдаются на Земле и Марсе. Марсианские извилистые долины (рис. 20), вероятно, русла древних рек, свидетельствуют о том, что несколько млрд лет назад Марс имел более плотную атмосферу и гидросферу (в настоящее время атмосферное давление настолько низкое, что вода в жидкой фазе не может существовать на поверхности Марса).

На Марсе имеются области так называемого хаотического рельефа, испещренные провалами, сформировавшимися, вероятно, в результате сублимации грунтового льда. Сложными образованиями являются полярные шапки Марса, в которых выделяют сезонную и постоянную части. Сезонный лед – представляет собой конденсат CO_2 с примесью H_2O , который выпадает осенью, а весной сублимирует и «перекачивается» в противоположное полушарие. Постоянная часть состоит из водяного льда. Для полярных областей Марса типичны отложения из большого количества ледяных слоев, перемежающихся уплотнившимся пылевым материалом.



Рис. 20. Извилистая долина Nirgal Vallis

По механической структуре поверхностные слои грунта Марса, Меркурия, Луны, Фобоса, Деймоса представляют собой раздробленное вещество – реголит. Такая структура является результатом метеоритной бомбардировки и эрозионных процессов. Кроме реголита, на поверхности планет земной группы имеются и каменные глыбы метровых размеров (рис. 21).



Рис. 21. Панорамы поверхности Венеры, полученные советскими спускаемыми аппаратами «Венера-9» и «Венера-10» (СССР, 1975 г.)

4.2.3. Излучение планет

Спектр излучения любой планеты содержит два максимума, один из них соответствует отраженному солнечному излучению, второй – тепловому излучению планеты. Второй максимум присутствует независимо от величины теплового потока из недр, поскольку часть солнечного излучения поглощается планетой и переизлучается в длинноволновой области спектра. Длина волны λ_m , на которой наблюдается второй максимум, определяется эффективной температурой планеты T_e в приблизительном соответствии с законом Вина.

$$\lambda_m (\text{мкм}) = 2886/T_e (\text{K}) \quad (1)$$

Доля солнечной энергии, отраженной от планеты, определяется величиной интегрального сферического альбедо

$$A = \Phi/\Phi_0, \quad (2)$$

где Φ_0 – падающий поток солнечного излучения, Φ – поток, рассеянный планетой во все стороны.

Значения A и средней (по всей планете) эффективной температуры T_e связаны уравнением теплового баланса:

$$s T_3^4 = \frac{1}{4} (1-A) E_0 + q, \quad (3)$$

где $s T_3^4$ – уходящий тепловой поток (в расчете на ед. площади планеты);

$\frac{1}{4} (1-a) E_0 + q$ – поглощенный планетой поток излучения Солнца,

E_0 – освещенность, создаваемая Солнцем в подсолнечной точке планеты,

$s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная Стефана–Больцмана,

q – тепловой поток из недр планеты.

Коэффициент $\frac{1}{4}$ в первом члене справа появился из-за того, что падающий поток пропорционален освещенной поверхности (πR^2), а уходящий – всей поверхности планеты ($4\pi R^2$, где R – радиус планеты). Для планет земной группы $q \ll E_0$.

В каждом данном интервале длин волн уровень, с которого уходит излучение (отраженное или тепловое), может располагаться на той или иной высоте в атмосфере, на некоторой глубине под поверхностью или практически с ней совпадать. Детальное исследование спектра излучения является благодаря этому важным источником информации об атмосфере и поверхности планеты.

УФ-излучение ($s \lambda < 0,3$ мкм) уходит из относительно высоких слоев атмосферы. Самые внешние слои планетных атмосфер (их водородные короны) излучают в основном в линии с $\lambda = 0,1216$ мкм.

Видимая, ближняя УФ- и ближняя ИК-области спектра (0,3–4 мкм) соответствуют излучению поверхности планет (Меркурий, Марс) или облаков в атмосфере (Венера и планеты-гиганты) в отраженном солнечном свете. В средней и дальней ИК-областях ($\lambda = 4$ мкм – 1 мм) наблюдается тепловое излучение поверхности планеты (Меркурий, Марс) или атмосферы планет (Венера, планеты-гиганты).

Радиоволны миллиметрового, сантиметрового и дециметрового диапазонов излучает грунт Венеры ($\lambda \gtrsim 1$ см), Меркурия и Марса, атмосфера Юпитера ($\lambda < 3$ см) и других планет-гигантов.

Кроме теплового излучения, планеты могут излучать радиоволны. Особенно интенсивно излучение Юпитера, представляющее собой стационарное синхротронное излучение, рождающееся в магнитосфере ($3 \text{ см} < \lambda < 100 \text{ см}$), и излучение в форме всплесков, генерируемое колебаниями ионосферной плазмы ($10 \text{ м} < \lambda < 1 \text{ км}$).

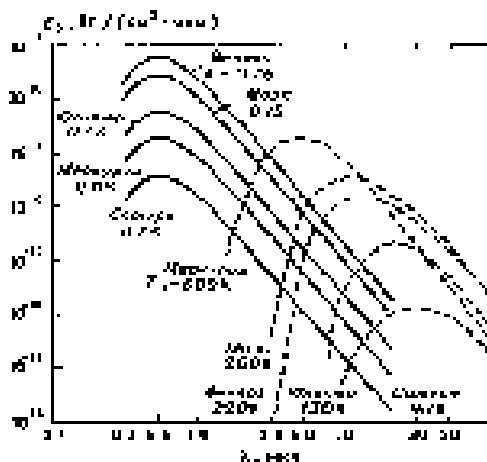


Рис. 22. Распределения энергии в спектре излучения планет. Сплошные кривые соответствуют отраженному солнечному излучению, прерывистые – тепловому излучению планет (рядом указаны значения альбедо A планет и эффективной температуры T_p , их поверхности)

Основные законы лучистой энергии. Все тела в природе излучают лучистую энергию в виде колебаний различных длин волн λ .

Количество энергии определенной длины волны, испускаемое в 1 мин. одним квадратным сантиметром поверхности тела при температуре T , называется его **излучательной способностью** $e_{\lambda T}$. Излучательная способность тела зависит от его природы, абсолютной температуры T и длины волны λ .

Падающая на какое-либо тело лучистая энергия частично им поглощается и частично отражается. Число, показывающее, какая часть падающей на тело энергии поглощается им, называется его **поглощательной способностью** $k_{\lambda T}$. Число, показывающее, какая часть падающей на тело лучистой энергии отражается от него, называется его **отражательной способностью** a .

Для непрозрачного тела между отражательной и поглощательной способностью существует такая связь: $k + a = 1$, т. е. чем больше поглощательная способность тела для излучения определенной длины волны, тем меньше его отражательная способность для излучения той же длины волны.

Тело, поглощающее всю падающую на него лучистую энергию, называется **абсолютно черным телом**. Для абсолютно черного тела $k=1$ и $a=0$.

В природе абсолютно черных тел нет, но для коротковолновой радиации к абсолютно черному телу наиболее близки сажа и платиновая чернь ($\epsilon_r = 0,9$), а для инфракрасного излучения – снег ($\epsilon_r = 0,995$).

Тело, отражающее всю падающую на него лучистую энергию, называется **зеркальным**. В природе нет абсолютно зеркальных поверхностей. Для коротковолновой радиации зеркальной, т. е. почти полностью отражающей, является белая поверхность (окись магния), а для длинноволнового излучения – полированные золотые и никелированные поверхности.

Закон Кирхгофа. Кирхгоф установил связь между излучательной и поглощательной способностью тела. Согласно закону Кирхгофа, **отношение излучательной способности тела для определенной длины волны и абсолютной температуры к его поглощательной способности есть величина постоянная для всех тел.**

Следовательно, согласно закону Кирхгофа, отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности при той же температуре есть величина постоянная и равна излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре, таким образом, поглощательная способность любого тела всегда < 1 .

Из закона Кирхгофа следует: если тело излучает лучистую энергию данной длины волны λ при заданной температуре T , то оно и поглощает при этой температуре лучистую энергию этой же длины волны.

Закон Кирхгофа называют избирательным законом поглощения, так как тело поглощает только те лучи, которые излучает.

Закон Стефана–Больцмана. Полная излучательная способность различных тел зависит от их природы и абсолютной температуры. Излучательная способность абсолютно черного тела зависит только от его температуры.

В 1877 г. Стефан опытным путем, а в 1879 г. Больцман теоретически установили, что полная излучательная способность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

Таким образом, согласно закону Стефана–Больцмана, $E = \sigma T^4$, где $\sigma = 8,26 \cdot 10^{-11} \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин.град.}$ – постоянный коэффициент, численно равный излучательной способности абсолютно черного тела при температуре $T = 1^\circ$.

Полная излучательная способность различных естественных тел, как следует из закона Кирхгофа, всегда меньше излучательной способности абсолютно черного тела. Следовательно, закон Стефана–Больцмана применительно к любому телу будет выражаться так: $E_l = k_l \sigma T^4$, где k_l – поглотительная способность данного тела.

Закон Вина. Большое значение для всех расчетов лучистой энергии имеет закон Вина, который выражает связь длины волны максимального излучения λ абсолютно черного тела с его абсолютной температурой T .

Согласно закону Вина, произведение длины волны, которой соответствует максимальная излучательная способность тела, на его абсолютную температуру есть величина постоянная $\lambda_m T = 2884 \text{ мк-град}$.

Эта формула позволяет найти температуру тела, если известно распределение энергии в его спектре, т. е. известна длина волны, соответствующая максимальной излучательной способности этого тела. И, наоборот, можно определить, какой длине волны соответствует максимальное излучение при заданной температуре.

Из закона Вина следует: **чем выше температура тела, тем более коротковолновые лучи оно излучает, и наоборот.**

Таким образом, при **изменении температуры тела максимум энергии в его спектре смещается. Поэтому закон Вина называют еще законом смещения.**

Все указанные законы излучения применимы, строго говоря, только к абсолютно черному телу. Но так как из всех известных нам источников энергии Солнце является наиболее мощным, то можно с достаточной точностью применить их к солнечному излучению.

Так, например, по закону Стефана–Больцмана можно вычислить температуру излучающей поверхности Солнца – фотосферы.

Известно, что на 1 см^2 поверхности, перпендикулярной к солнечным лучам, за пределами атмосферы поступает в 1 мин $1,98 \text{ кал}$ тепла.

Если обозначить через R радиус Солнца, а через r_0 среднее расстояние от Солнца до Земли, можно вычислить E – энергию, излучаемую 1 см^2 поверхности Солнца в 1 мин. , т. е. его излучательную способность, $E = 91\,925 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$.

Тогда $T = \text{корень четвертой степени из } 91925 = 5800^\circ$.

Максимальная энергия в солнечном спектре приходится на длину волны $\lambda = 0,47 \text{ мкм}$. Отсюда по закону смещения Вина также можно определить температуру фотосферы, которая равна 6136° .

4.2.4. Атмосферы планет

4.2.4.1. Химический состав¹

Атмосферы планет-гигантов и планет земной группы сильно отличаются, более того, состав атмосфер внутренних планет тоже различен, что видно из таблицы (приложение). На Венере и Марсе основными компонентами атмосферы являются CO_2 и N_2 , соответственно, на Земле – O_2 и N_2 . Причины этого различия следующие: 1) на Земле имеется много жидкой воды, которая растворяет CO_2 и переводит его в осадочные породы; 2) растительный покров Земли перерабатывает CO_2 в O_2 . Наиболее резко от земной атмосферы отличаются атмосферы Юпитера и других планет-гигантов, которые состоят главным образом из водорода и гелия. Из спутников планет только Титан имеет плотную атмосферу, главный компонент которой – азот.

4.2.4.2. Вертикальная структура атмосфер

Расслоение атмосферы определяется полем тяготения планеты, температурой атмосферы и ее химическим составом. Давление в атмосфере убывает с высотой, которую можно рассчитать по формуле:

$$H = RT/mg,$$

где m – молекулярная масса газа, g – ускорение силы тяжести, R – газовая постоянная, T – температура. Величина H называется шкалой высоты или высотой однородной атмосферы. Она является функцией геометрической высоты h , т. е. T , m , g зависят от h .

С высотой атмосферное давление убывает, так как уменьшается вышележащая масса атмосферы. Если бы плотность воздуха с высотой не менялась, давление уменьшалось бы пропорционально высоте поднятия. Но, как известно, нижние слои воздуха обладают большей плотностью, чем вышележащие. Значит, убывание атмосферного давления с высотой должно происходить не линейно, а быстрее в нижних слоях и медленнее в верхних.

Если выделить в атмосфере столб воздуха с поперечным сечением 1 см^2 и на каком-либо уровне AB обозначить давление буквой p , то при изменении высоты на бесконечно малую величину Δz давление изменится

¹ Сравнительный состав атмосфер приводится в таблице 2 Приложения.

на бесконечно малую величину Δp . Таким образом, при переходе с одного высотного уровня на другой давление уменьшается на величину $-\Delta p$; уменьшение давления Δp равно весу объема элементарного столба воздуха, который равен $\Delta z \cdot 1 \text{ см}^2$, на плотность ρ воздуха в рассматриваемом слое p и на ускорение силы тяжести g . Отсюда $\Delta p = -\rho g \Delta z$.

Это уравнение называется *основным уравнением статики*, так как оно выражает связь между указанными величинами в случае, когда атмосфера находится в покое. Знак минус показывает, что давление с высотой убывает.

Для атмосферы нельзя вывести точную зависимость давления от высоты, т.к. отдельные слои атмосферы имеют различные характеристики.

1. Если плотность воздуха в атмосфере с высотой не меняется, атмосферу называют *однородной*. Высота такой атмосферы H выражается следующей формулой $H=RT/g$, где R -газовая постоянная.

Эта формула выводится из основного уравнения статики.

Обозначим давление на нижнем уровне p , а на границе атмосферы оно по условию равно нулю, следовательно, разность давлений рассматриваемого столба воздуха равна p , а разность рассматриваемых высот, или иначе высота однородной атмосферы, равна H ; тогда уравнение статики примет вид $p=\rho gH$, отсюда, $H=p/\rho g$.

Для Земли при нормальных условиях, т. е. при температуре 273° (0°) и нормальной силе тяжести $980,6 \text{ см/сек}^2$ высота однородной атмосферы составляет около 8000 м . Для температуры отличной от 0° получим $H_1=8000(1+\alpha t)$, где α – коэффициент объемного расширения газов, равный $1/273$, или $0,0036$ на 1° .

Процессы конвекции и турбулентность приводят к перемешиванию газов атмосферы (в земной атмосфере это происходит до высоты $100\text{--}120 \text{ км}$), и эта часть атмосферы называется гомосферой. Гомопауза отделяет область перемешивания от области диффузионного разделения газов, называемой – гетеросферой. Наличие гетеросферы приводит к тому, что гелий и водород становятся основными компонентами на высоте нескольких сот километров даже в атмосферах планет земной группы. Поэтому их самой внешней частью являются водородные короны. Благодаря малой молекулярной массе ($m = 1$) атомарного водорода образуемая им корона простирается примерно на 20000 км над Землей. Газы внешних слоев атмосферы способны из нее улетучиваться – диссипировать. В результате диссипации из атмосфер планет земной группы эффективно

удаляется водород и гелий. В атмосферах планет-гигантов эти газы удерживаются благодаря сильному полю тяготения.

2. Если температура в атмосфере с высотой остается постоянной, то атмосфера называется *изотермической*.

3. *Политропной* называется такая атмосфера, в которой температура изменяется с высотой линейно, т. е. градиент температуры γ с высотой остается постоянным.

4. Для разного рода практических расчетов введено понятие *международной стандартной атмосферы*. Международной стандартной атмосферой называется такая атмосфера, в которой давление у земли равно 1013 гПа, а температура воздуха составляет 15°. До высоты 11 км атмосфера политропна с вертикальным градиентом температуры $\gamma=0,65^\circ/100$ м; выше 11 км атмосфера изотермическая с температурой -56,5°.

4.2.4.3. Температура атмосферы

Тепловой баланс атмосферы определяет ее температуру. Самая нижняя часть атмосферы полностью или частично непрозрачна (то есть не пропускает излучение) для теплового излучения поверхности планеты и самой атмосферы. Солнечное излучение в видимом диапазоне обычно проникает достаточно глубоко, нагревает поверхность планеты и нижние слои атмосферы, а поток собственного планетарного теплового излучения (балансирующий тепловой поток от Солнца) уходит вверх. Поэтому температура в нижних слоях атмосферы уменьшается снизу вверх. Нижняя часть атмосферы с большим по абсолютной величине градиентом температуры называется тропосферой. Падение температуры прекращается на уровне, выше которого атмосфера становится прозрачной для теплового излучения. Этот уровень называется тропопаузой. Над тропопаузой расположена мезосфера, или стратомезосфера, – область, где температура приблизительно постоянна. Исключение составляет Земля, в атмосфере которой существует температурный пик (мезопик), разделяющий стратосферу и мезосферу. Мезопик обусловлен поглощением солнечной радиации озоном ($0,2 \text{ мкм} < \lambda < 0,3 \text{ мкм}$). Коротковолновое ($\lambda < 0,13 \text{ мкм}$) УФ-излучение Солнца поглощается в высоких слоях атмосферы (примерно соответствующих по высоте гетеросфере). Поток излучения, приходящийся на эту область спектра, мал, но мала и плотность газа на рассматриваемых высотах, так что результирующий температурный эффект оказывается большим. Образуется горячая область верхней атмосферы – термосфера.

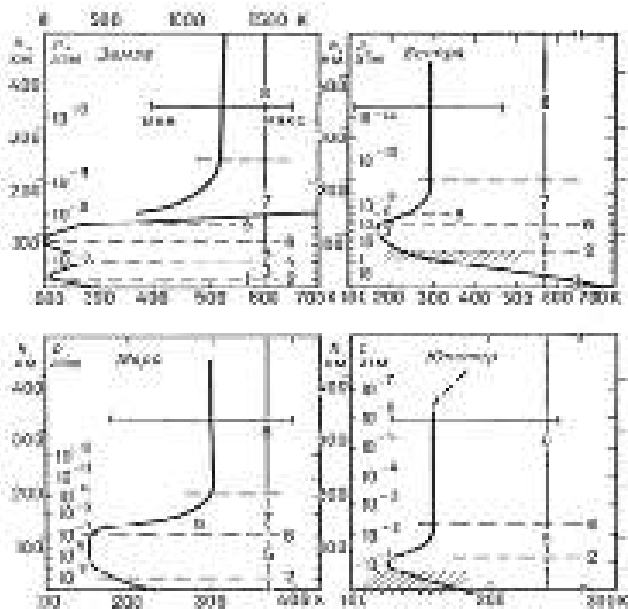


Рис. 23. Вертикальное строение атмосфер Земли, Венеры, Марса и Юпитера

По оси абсцисс – температура T , по оси ординат – высота h и давление p . Пунктиром показаны характерные уровни и слои атмосферы: 1 – тропосфера, 2 – тропопауза, 3 – стратосфера, 4 – мезопик (присутствует только в земной атмосфере), 5 – мезосфера, 6 – мезопауза, 7 – термосфера, 8 – термопауза, 9 – гомопауза. У Юпитера твердой (или жидкой) поверхности нет, и за нулевой уровень принимается условно высота, на которой давление равно 1 атм. Штриховкой показаны облака в атмосферах Венеры и Юпитера. Для Земли шкала абсцисс сверху относится к верхней части кривой $T(h)$, снизу – к нижней части кривой.

В отводе теплоты участвуют молекулярная и турбулентная теплопроводность (вниз), излучение молекул в ИК-диапазоне (вверх). На Земле эффективны только первые два процесса, на Венере и Марсе существенную роль играет и третий (благодаря молекулам CO_2 , которые являются хорошими излучателями). Поэтому термосфера Земли имеет более высокие температуры по сравнению с Венерой и Марсом (рис. 23). Поглощение

УФ-излучения Солнца приводит к диссоциации молекул, а также ионизации молекул и атомов. Поэтому в верхней атмосфере появляются атомы и более простые молекулы – продукты диссоциации молекул, имеющих в нижней атмосфере. В результате этого процесса в атмосферах Марса и Венеры (как и в земной атмосфере) на высотах 120–200 км основным компонентом является атомарный кислород. Ионизация приводит к образованию атомных и молекулярных ионов и свободных электронов. Поэтому планетная термосфера является одновременно ионосферой.

Солнечный ветер, набегая на планеты, тормозится либо ее собственным магнитным полем (Земля, Меркурий, Юпитер, Сатурн), либо наведенным в результате взаимодействия с ионосферой. Собственное или наведенное магнитное поле создает магнитосферу планет.

4.2.4.4. Общая циркуляция атмосферы

Полярные области планет получают меньше теплоты, чем экваториальные. Сглаживание температур между экваториальной и полярной областями происходит в результате атмосферной циркуляции. Атмосферные массы на экваторе нагреваются, поднимаются вверх, уходят в сторону полюсов и замещаются более холодными массами, приходящими из области высоких широт. Сила Кориолиса отклоняет поток от меридионального направления. Если нагрев на экваторе слабый, направление потока имеет вид, показанный на рис. 24, слева.

Такой режим называется симметричным. Если нагрев на экваторе и охлаждение на полюсах увеличиваются, то перенос теплоты возрастает. Симметричная циркуляция в состоянии переносить лишь относительно небольшой тепловой поток. При достаточно сильном нагреве и быстром вращении симметричный режим циркуляции заменяется более мощным – волновым (рис. 24, справа). Элементы обоих типов циркуляции могут сочетаться в пределах одной атмосферы, но один из них обычно преобладает.

На Земле преобладает волновой режим циркуляции, на Венере доминирует, вероятно, симметричный. Сложна картина общей циркуляции на Юпитере. Полосатая структура и характер движения многих атмосферных деталей свидетельствуют о симметричном режиме. Однако в то же время имеются и мощные волновые процессы, к числу которых принадлежат циклоны. Большое красное пятно (рис. 25) является, вероятно, самым большим циклоном в атмосферах планет Солнечной системы (размер $\approx 40000 \times 13000$ км).

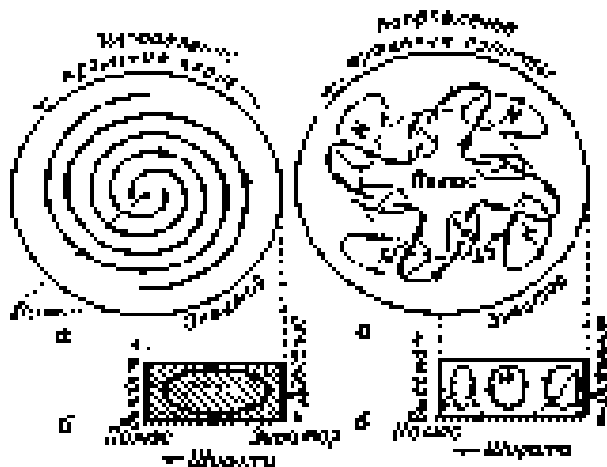


Рис. 24. Два режима общей циркуляции атмосферы планеты

Слева – симметричный режим общей циркуляции: а – линия тока в высоких слоях, б – поперечный разрез, показывающий меридиональную проекцию общей циркуляции. Справа – волновой режим общей циркуляции: а – линия тока на среднем и нижнем уровнях (жирная кривая) и вблизи поверхности (тонкая кривая), L – область низкого давления, Н – область высокого давления; б – поперечный разрез зонально-умеренной меридиональной циркуляции и усредненный зональный ветер (W – западный, E – восточный)



Рис. 25. Большое красное пятно Юпитера и окрестности пятна («Вояджер-1», 1979)

4.2.4.5. Аэрозольные примеси в атмосферах

Имеется несколько типов аэрозольных частиц: твердые пылинки, поднятые с твердой поверхности планет; жидкие либо твердые частицы, возникшие в результате конденсации атмосферных газов; метеорная пыль, которая может играть существенную роль в качестве ядер конденсации.

Пыль, поднятая с поверхности в больших количествах, иногда на несколько месяцев делает непрозрачной атмосферу Марса (явление глобальных пылевых бурь). Облака в атмосферах Земли, Венеры, планет-гигантов являются конденсационными. На Земле облака состоят из частиц жидкой воды или льда, на Юпитере верхний слой облаков состоит из кристаллов NH_3 (по-видимому, ниже имеются также облака из H_2O), на Сатурне – из NH_3 и, возможно, CH_4 . Полностью еще не раскрыт состав облаков Венеры. Там имеется несколько фракций разных размеров, одна из них состоит, вероятно, из водного раствора H_2SO_4 , состав других неизвестен.

4.2.4.6. Происхождение и эволюция атмосфер

Атмосферы Юпитера и Сатурна образовались вместе с планетами и в дальнейшем не изменялись, для планет земной группы эти проблемы до конца не решены. Имеется несколько моделей возникновения атмосфер:

1 – постепенная дегазация планет в течение всей жизни в результате вулканической деятельности;

2 – катастрофическая дегазация в период первоначальной аккреции или вскоре после нее;

3 – захват газов непосредственно из протопланетной туманности.

Возможно, все три процесса участвовали в образовании атмосфер, но значение каждого процесса в присутствии того или иного газа могло быть различным. Например, нерадиогенные (не являющиеся продуктами радиоактивного распада) изотопы инертных газов на Венере могли быть захвачены прямо из протопланетной туманности, в то время как химически активные газы (CO_2 , N_2) были ею получены в составе твердых частиц (адсорбированными). Для Земли прямой захват газов из протопланетной туманности сыграл меньшую роль, а для Марса – еще меньшую.

4.2.4.7. «Климат» на планетах

На поверхности планеты (или спутника), лишенной атмосферы, температура T_s определяется уравнением локального теплового баланса. Для дневной стороны планеты оно имеет вид:

$$asT_s^4 = (1-A)E\cos J + F,$$

где A – локальное альбедо, J – зенитное расстояние Солнца, a – коэффициент излучения, F – тепловой поток, обусловленный теплопроводностью (внутренний тепловой поток считается пренебрежимо малым). Для ночной стороны планет в этом уравнении $(1-A)E\cos J$ равно нулю, так как поверхность планет только излучает теплоту, запасенную в грунте в течение дня. Атмосфера Марса достаточно разрежена, и данное уравнение можно к ней применять.

Теплопроводность планетных грунтов достаточно низка, поэтому на Меркурии, Луне, Марсе имеют место сильные суточные изменения температуры. В полдень на экваторе температуры на этих телах составляют соответственно около 700, 400, 280 К (ночью они снижаются соответственно до 100, 120, 200 К). На поверхности Марса температура не опускается ниже 147 К – точки конденсации CO_2 .

Степень плотности атмосферы существенно влияет на климат планет через:

- а) величину парникового эффекта, увеличивающего температуру поверхности;
- б) теплоемкость атмосферы, сглаживающей суточные температурные колебания;
- в) общую циркуляцию атмосферы, сглаживающую разность температур между экватором и полюсом.

Например, на Земле благодаря парниковому эффекту средняя температура составляет около 288 К, вместо – 249 К, а на Венере из-за огромной массы атмосферы парниковый эффект повысил температуру ее поверхности с 230 К до 735 К, при этом суточные и широтные вариации температуры < 1 К.

Сезонные амплитуды температуры возникают при достаточно большом наклонении экватора к плоскости орбиты. Они весьма заметны на Земле и Марсе и практически отсутствуют на Венере и Юпитере.

Устойчивость и вековые изменения климата планет зависят как от астрономических (поток солнечной энергии, форма орбиты, наклонение экватора к эклиптике), так и от планетных (состав атмосферы, альбедо облаков и поверхности) факторов. Даже небольшие изменения их параметров могут резко повлиять на климат и кардинально изменить природную обстановку на планете.

4.2.5. Характеристика планет¹

4.2.5.1. Планеты-гиганты

Юпитер – пятая от Солнца большая планета. Состав атмосферы: H_2 , CH_4 , NH_3 , He. Юпитер – мощный источник теплового радиоизлучения, обладает радиационным поясом и обширной магнитосферой. Экватор наклонен к плоскости орбиты под углом $3^\circ 5'$, из-за этого сезонные изменения на Юпитере выражены весьма слабо. В противостоянии Юпитер виден как чуть желтоватая звезда – 2,6 звездной величины; из всех планет уступает в блеске только Венере и Марсу. Говоря о размерах Юпитера, указывают радиус верхней границы облаков, где давление порядка 10 кПа. В атмосфере Юпитера отчетливо просматриваются параллельные слои, или зоны, вращающиеся вокруг оси планеты с различными угловыми скоростями. В умеренных южных широтах Юпитера медленно перемещается овальное Большое красное пятно, поперечные размеры которого 30–40 тыс. км. За сто лет оно совершает примерно 3 оборота. Природа этого феномена до конца неясна.

В атмосфере Юпитера абсолютно доминирующими являются водород и гелий в «солнечной» пропорции 3,4:1, но имеется и небольшая примесь метана, молекул воды, аммиака и другие. Красноватый оттенок планеты приписывают главным образом присутствию в атмосфере красного фосфора и, возможно, органике, возникающей благодаря электрическим разрядам. В области, где давление порядка 100 кПа, температура составляет около 160 К. На Юпитере наблюдаются интенсивные атмосферные потоки, в том числе вертикальная циркуляция. Установлено наличие облаков, высота которых в различных поясах различна, замечены грозы. Светлые полосы и Большое красное пятно связаны с восходящими потоками; облака здесь выше, а температура ниже, чем в остальных областях. Исследователи обращают внимание на необычную устойчивость вихрей. Установлено также наличие ионосферы, протяженность которой по высоте порядка 3000 км. На Юпитере имеется магнитное поле. Его магнитный дипольный момент почти в 12000 раз превосходит дипольный момент Земли, но так как напряженность магнитного поля обратно пропорциональна кубу радиуса, а он у Юпитера на два порядка больше, чем у Земли, то напряженность у поверхности Юпитера выше, по сравнению

¹ Основные параметры планет приведены в таблице 1 приложения.

с Землей, только в 5–6 раз. Магнитная ось наклонена к оси вращения на $10,2^\circ \pm 0,6$. Дипольная структура магнитного поля доминирует до расстояний порядка 15 радиусов планеты. Юпитер обладает обширной магнитосферой, которая подобна земной, но увеличена примерно в 100 раз. Имеются радиационные пояса.

Сатурн – шестая планета, среднее расстояние от Солнца 9,54 а. е., по размерам вторая после Юпитера большая планета Солнечной системы. В состав атмосферы входят CH_4 , H_2 , He , NH_3 . У Сатурна обнаружены радиационные пояса. Наклон орбиты планеты к плоскости эклиптики $2^\circ 29,4$. Угол между плоскостями экватора и орбиты достигает $26^\circ 44$. Планета не имеет четкой твердой поверхности, оптические наблюдения затрудняются непрозрачностью атмосферы. На земном небе Сатурн выглядит как желтоватая звезда, блеск которой меняется от нулевой до первой звездной величины. *Поверхность Сатурна* (облачный слой), как и Юпитера, не вращается как единое целое. Тропические области в атмосфере Сатурна обращаются с периодом 10 ч. 14 мин. земного времени, а на умеренных широтах этот период на 26 мин. больше. Температура в средних слоях атмосферы около 100 К. По внутреннему строению и составу Сатурн сильно напоминает Юпитер. На глубине, примерно равной $R/2$, то есть половине радиуса планеты, водород при давлении около 300 ГПа переходит в металлическую фазу. По мере дальнейшего увеличения глубины, начиная с $R/3$, возрастает доля соединений водорода и оксидов. В центре планеты (в области ядра) температура порядка 20000 К. В экваториальной области Сатурна также существует Красное пятно, хотя оно и меньших размеров, чем на Юпитере.

Уран – седьмая от Солнца большая планета, среднее расстояние от Солнца 19,18 а. е. Ось вращения Урана наклонена на угол 98° . Плоскость орбиты наклонена к эклиптике под углом $0,8^\circ$. Состав атмосферы: H_2 , He , CH_4 . На поверхности Урана не обнаружено заметных локальных неоднородностей, которые помогли бы уточнить длительность суток на планете. Вращение Урана обладает рядом отличительных особенностей: ось вращения почти перпендикулярна (98°) к плоскости орбиты, а направление вращения противоположно направлению обращения вокруг Солнца, то есть обратное (из всех других больших планет обратное направление вращения наблюдается только у Венеры). Подобно другим планетам-гигантам, атмосфера Урана в основном состоит из водорода, гелия и метана, хотя их относительные вклады несколько ниже по сравнению с Юпите-

ром и Сатурном. Теоретическая модель строения Урана такова: его поверхностный слой представляет собой газожидкую оболочку, под которой находится ледяная мантия (смесь водяного и аммиачного льда), а еще глубже ядро из твердых пород. Масса мантии и ядра составляет примерно 85–90% от всей массы Урана. Зона твердого вещества простирается до 3/4 радиуса планеты. Температура в центре Урана близка к 10000 К при давлении 7–8 млн атмосфер (одна атмосфера примерно соответствует одному бару). На границе ядра давление примерно на два порядка ниже (около 100 килобар). Эффективная температура, определяемая по тепловому излучению с поверхности планеты, составляет около 55 К.

Нептун – восьмая планета, среднее расстояние от Солнца 30,06 а. е. Удаленность Нептуна от Земли существенно ограничивает возможности его исследования. Свет от Солнца доходит до Нептуна немногим более чем за 4 часа. Нептун выглядит на небе как звезда 7,8 звездной величины (недоступна невооруженному глазу); при сильном увеличении имеет вид зеленоватого диска, лишенного каких-либо деталей. Состав атмосферы: CH_4 , H_2 , Не. Эффективная температура поверхностных областей около 38 К, но по мере приближения к центру планеты она возрастает до $(12\text{--}14) \cdot 10^3$ К при давлении 7–8 мегабар.

Нептун – планета самых быстрых ветров в Солнечной системе. В высоких широтах ветер дует в направлении вращения планеты, на 70-й южной широте была измерена самая высокая скорость ветра – 300 м/сек. В низких широтах ветер дует параллельно экватору в обратном направлении, его скорость составляет около 100 м/сек.



Рис. 26. Темное пятно в атмосфере Нептуна

Наиболее заметная структура в южном полушарии, обнаруженная «Вояджером-2», была названа Большим темным пятном. Эта обширная циклоническая система по размерам в два раза меньше, чем Большое красное пятно Юпитера (т.е. примерно с Землю). Располагаясь на 20° к югу от экватора, оно вращалось против часовой стрелки с периодом около 16 дней.

К 1994 году оно исчезло, но космический телескоп им. Хабб-

ла обнаружил новое темное пятно в северном полушарии. Согласно современным представлениям, темные пятна в атмосфере Нептуна – дыры в первом слое облаков, позволяющие увидеть более глубокие облачные слои. Отдельные белые перистые облака в тропосфере Нептуна быстро изменяются, часто образуясь и исчезая всего за несколько часов (рис. 26).

Нептун обладает магнитным полем, которое заметно отличается от магнитного поля Земли, Юпитера и Сатурна. Если магнитное поле Земли и ближайших планет-гигантов вызвано конвекцией в жидком ядре планеты и является дипольным по своей структуре (имеет один северный и один южный полюс), то магнитное поле Нептуна вызвано конвекцией в водно-аммиачной мантии планеты. Если описывать реальное магнитное поле Нептуна как дипольное, то окажется, что магнитная ось диполя смещена от центра планеты на 0,55 радиуса и наклонена на 47 градусов к оси вращения. Так как ось вращения планеты сама наклонена почти на 30 градусов, магнитная ось описывает конус почти в 77 градусов в течение каждого оборота планеты, и магнитосфера поворачивается к потокам солнечного ветра то «боком», то «макушкой».

Еще лучше магнитное поле Нептуна описывается как квадрупольное (т. е. имеющее два южных и два северных полюса).

Напряженность магнитного поля на полюсах примерно вдвое больше, чем на Земле.

4.2.5.2. Планеты земной группы

Меркурий – ближайшая к Солнцу планета, длительное время была загадкой, так как близость к Солнцу мешала производить за ним наблюдения. Большой объем информации о Меркурии принес космический аппарат «Маринер-10» в 1974–75 годах и радиолокация.

Период обращения Меркурия вокруг Солнца равен 88 суток. Установлено, что период вращения вокруг оси Меркурия равен 59,3 суток, т. е. он составляет ровно $\frac{2}{3}$ орбитального периода. Это значит, что три полных оборота вокруг оси Меркурий завершает за 176 суток. За тот же срок планета совершает два оборота вокруг Солнца. Таким образом, Меркурий занимает относительно Солнца то же самое положение на орбите и ориентировка шара остается прежней. Такое движение, как показывает теория, является устойчивым. Вращение находится в резонансе с орбитальным движением. Наблюдения за Меркурием раз в 348 суток, когда он находится в условиях благоприятной видимости, обнаруживают те же детали, что и в прошлые наблюдения.

Ось Меркурия почти перпендикулярна к плоскости его орбиты. Карта планеты, построенная на основе многолетних визуальных и фотографических наблюдений, показывает круглые темные пятна, похожие на лунные «моря», – темные линейные образования протяженностью 1–2 км и разделяющие их светлые области. Общее альbedo Меркурия оказалось крайне низким, около 0,05.

Температурный режим планеты был получен еще в 1962 г. радионаблюдениями. Различие яркостных температур дневного и ночного полушарий составляет в среднем 509 К. Средняя температура ночного полушария равна 111 К. Температура подсолнечной точки на среднем расстоянии Меркурия от Солнца равна 620 К. В перигелии она может достигать 690 К, а в афелии снижается до 560 К. Таков диапазон температур поверхности Меркурия.

Смена дня и ночи на Меркурии происходит каждые 88 земных суток, то есть день и ночь продолжаются по году планеты. Солнце восходит на востоке, поднимается крайне медленно (в среднем на один градус за двенадцать часов), достигает верхней кульминации (на экваторе – зенита) и также медленно заходит. Но так происходит не на всех долготах. На долготах, близких к 90 и 270, наблюдается весьма странная и, пожалуй, единственная в Солнечной системе картина. На этих долготах восход и заход Солнца совпадают по времени с прохождением Меркурия через перигелий, когда на короткое время (8 суток) угловая скорость орбитального движения планеты превышает угловую ее вращения. Солнце на небе планеты описывает петлю, как сам Меркурий на небе Земли. На указанных долготах Солнце после восхода вдруг останавливается, поворачивает обратно и заходит почти в той же точке, где взошло. Но спустя несколько земных суток Солнце восходит снова в той же точке, и уже надолго. Около захода картина повторяется в обратном порядке.

Поверхность Меркурия усеяна кратерами разных размеров, и распределены они по размерам так же, как на поверхности Луны. Обнаружены гладкие округлые равнины, получившие, по сходству с лунными «морями», название бассейнов. Наибольший из них – Калорис – имеет в диаметре 1300 км (океан Бурь на Луне – 1800 км).

Эволюция поверхности Меркурия могла идти по следующей схеме. После завершения процесса аккумуляции поверхность планеты была гладкой, далее наступил процесс интенсивной бомбардировки остатками допланетного роя, во время которой образовались бассейны типа

Калорис, а также кратеры типа Коперника на Луне. Следующий период характеризовался интенсивным вулканизмом и выходом потока лавы, заполнявшей крупные бассейны. Этот период завершился около 3 млрд лет назад. Данные об атмосфере Меркурия указывают лишь на ее сильную разреженность. Наблюдения с ультрафиолетовым спектрометром дают давление у поверхности 10^{-12} бар (1 бар почти равен давлению в 1 атмосфере). В состав так называемой атмосферы входят молекулы гелия, обнаружены небольшие количества водорода и кислорода. Подозревается также присутствие CO_2 и CO .

Приборы «Маринера-10» установили наличие у планеты слабого магнитного поля – около 100 гамм на расстоянии 450 км. Тщательное изучение магнитного поля планеты показало, что оно имеет более сложную структуру, чем земное, кроме дипольного (двухполюсного), в нем присутствуют еще поля с четырьмя и восемью полюсами с относительной напряженностью 1:0,4:0,3 (у Земли 1:0,14:0,09). Со стороны Солнца магнитосфера Меркурия сильно сжата под действием солнечного ветра.

Пролеты «Маринера-10» мимо Меркурия позволили уточнить его массу $1/6023600$ солнечной или 0,054 массы Земли, а также среднюю плотность $5,45 \text{ г/см}^3$, т.е. Меркурий по плотности занимает второе место в Солнечной системе, уступая только Земле. Диаметр Меркурия составляет 4879 км. Высокая плотность и наличие магнитного поля доказывают наличие у Меркурия мощного железистого ядра. Плотность вещества в центре Меркурия должна достигать $9,8 \text{ г/см}^3$. Радиус ядра, по данным американских ученых, составляет 1800 км (75% радиуса планеты). На долю ядра приходится 80% массы Меркурия. Несмотря на медленное вращение планеты, большинство специалистов считает, что ее магнитное поле возбуждается тем же динамомеханизмом, что и магнитное поле Земли. Вкратце этот механизм сводится к образованию кольцевых электрических токов в ядре планеты при ее вращении, которые и генерируют магнитное поле. Выяснение происхождения магнитного поля Меркурия может иметь большое значение для проблемы планетарного механизма в целом.

Венера – следует за Меркурием. Длительное время о Венере ничего не было известно. Атмосфера Венеры была открыта в 1761 г. М. В. Ломоносовым при наблюдении прохождения Венеры перед диском Солнца. При сходе ее с диска Солнца край последнего как бы выгнулся, образовав «пупырь». М. В. Ломоносов правильно объяснил наблюдавшееся им явление преломлением солнечных лучей в атмосфере Венеры. Это явление

получило название «явление Ломоносова». В течение почти 200 лет атмосфера Венеры была непроницаемым барьером для изучения поверхности планеты и определения периода ее вращения вокруг оси. 80 попыток определить этот период с помощью оптических методов потерпели полную неудачу. Не удавалось определить и наклон оси Венеры к плоскости ее орбиты. Первое уверенное определение радиуса твердого шара Венеры было сделано в 1965 г. радиоастрономами – советским ученым А. Д. Кузьминым и американским ученым Б. Дж. Кларком, которые получили значение 6057 км, окончательное его значение 6050 км. Масса Венеры была уточнена по пролетам мимо планеты американских космических аппаратов «Маринер-2», «Маринер-5» и «Маринер-10». Она составляет $1/408\,524$ массы Солнца или 84,5% массы Земли. По массе и размерам была уточнена средняя плотность Венеры, $5,27\text{ г/см}^3$, и определено ускорение силы тяжести на ее поверхности – 885 см/сек^2 . Радиолокационные наблюдения позволили определить, наконец, период ее вращения. Он оказался самым большим в Солнечной системе: 243,16 суток при обратном направлении вращения. Иначе говоря, если смотреть с северного полюса Венеры, планета вращается по часовой стрелке, а не против нее, как Земля и все планеты (исключая Уран). Из-за этого солнечные сутки на Венере короче звездных и равны 117 земным суткам. Таким образом, день и ночь на Венере продолжается по 58,5 суток. Несмотря на это, температуры дневного и ночного полушарий планеты отличаются очень мало – благодаря большой теплоемкости и интенсивному переносу тепла в плотной атмосфере Венеры. Углекислый газ – существенный компонент венерианской атмосферы, давление которой у поверхности планеты оказалось 90 атмосфер! Высокая температура нижних слоев атмосферы Венеры объясняется парниковым эффектом. Атмосфера планеты пропускает солнечное излучение лишь частично и не в виде прямых лучей, а в форме многократного рассеянного излучения. Облачный слой Венеры обладает весьма высоким альбедо – 0,78, иначе говоря, более $3/4$ солнечной радиации отражается облаками и лишь менее $1/4$ достигает поверхности. Парниковым эффектом обладают также атмосферы Земли и Марса, но в атмосфере Марса средняя температура у поверхности повышается лишь на 9° , в атмосфере Земли на 38° , а в атмосфере Венеры парниковый эффект достигает 400°C .

Атмосфера Венеры на 97% состоит из углекислого газа (CO_2). Не более 2% приходится на долю азота и инертных газов (в первую очередь

аргона), содержание кислорода составляет менее 0,1%. Инфракрасный спектроскоп обнаруживает окись углерода (CO) в количестве $5 \cdot 10^{-5}$ от всей массы атмосферы, хлористый водород (HCl) – $4 \cdot 10^{-7}$ и фтористый водород (HF) – 10^{-9} . Другие компоненты пока не выявлены.

Верхний слой Венеры имеет обратное вращение с тем же периодом. Скорость вращения на уровне верхней границы облаков иная, чем самой планеты. Это означает, что над экватором Венеры на высоте 65–70 км господствует постоянно дующий ветер в направлении движения планеты, имеющий скорость 100 м/сек (ураган). Такая система циркуляции атмосферы была предсказана почти 250 лет назад английским метеорологом Гадлеем. На Земле была бы аналогичная циркуляция атмосферы, если бы ее не подавляли такие факторы, как разность температур, влияние океанов. На Венере же океанов нет, а температуры выровнены благодаря интенсивному переносу тепла в нижних слоях. Фотографии верхнего слоя облаков Венеры с близкого расстояния, полученные в феврале 1974 г. американским космическим кораблем «Маринер-10», подтвердили четырехсуточный период вращения на уровне облаков, обнаруженный еще в 1927 году.

У планеты имеется, как и у Земли, ионосфера. Дневной максимум электронной концентрации расположен на высоте 145 км и равен 400000 электронов/см³, что в 10 раз меньше, чем в земной ионосфере. На уровне 500 км наблюдается резкий спад электронной концентрации, а на ночной стороне длинный хвост из заряженных частиц протяженностью до 3500 км с концентрацией электронов 1000–500 электронов/см³. Такое строение ионосферы связано с обтеканием ее солнечным ветром и со слабой напряженностью магнитного поля Венеры (оно в 10000 раз слабее земного). Самые верхние слои атмосферы Венеры, которые простираются до высоты 5500 км, состоят почти целиком из водорода.

Наземные американские установки дали возможность исследовать приэкваториальную область планеты. Было обнаружено около 10 кольцевых структур, подобных метеоритным кратерам Луны и Меркурия, диаметром от 35 до 150 км, но сильно сглаженных, уплощенных. Удалось обнаружить гигантский разлом в коре планеты длиной 1500 км, шириной 150 км и глубиной 2 км. Выявлен дугообразный горный массив, пересеченный и частично разрушенный другим. Это говорит в пользу наличия сбросовых движений в коре планеты. Найден вулкан с диаметром основания 300–400 км и около 1 км в высоту. Американские ученые выявили

в северном полушарии планеты огромный круглый бассейн протяженностью около 1500 км с севера на юг и 100 км с запада на восток. Был изучен рельеф 55 районов Венеры. Среди них имеются участки как сильно всхолмленной местности, с перепадами высот в 2–3 км, так и относительно ровной. Обнаружена равнина длиной около 800 км, еще более гладкая, чем поверхность лунных морей. Поверхность Венеры в целом более гладкая, чем поверхность Луны, но имеются каменистые участки с характерными скальными образованиями и свежими каменистыми осыпями. Это говорит о непрекращающейся тектонической активности Венеры. Средняя плотность пород Венеры равна $2,7 \text{ г/см}^3$, что тоже близко к плотности земных базальтов. Таким образом, можно сказать, что Венера имеет сложный рельеф со следами активного вулканизма и тектонической деятельности и с явными последствиями метеоритной бомбардировки в прошлом.

Земля – наибольшая из планет земной группы. Ее уникальность определяется наличием жизни. Однако при взгляде на Землю из космоса это не заметно. Хорошо видны облака, плавающие в атмосфере. Сквозь просветы в них различимы материки. Большая же часть Земли покрыта океанами.

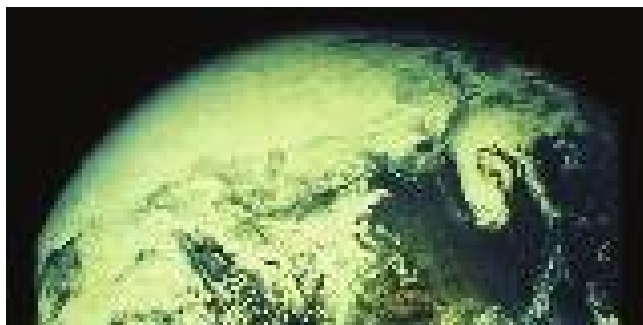


Рис. 27. Фрагмент поверхности Земли

Появление жизни, живого вещества – биосферы – на нашей планете явилось следствием ее эволюции. В свою очередь, биосфера оказала значительное влияние на весь дальнейший ход природных процессов.

Несомненно, всестороннее изучение Земли имеет громадное значение для человечества, но знания о ней служат также своеобразной отправной точкой при изучении остальных планет земной группы.

В соответствии с законами Кеплера Земля обращается вокруг Солнца с переменной скоростью по слегка вытянутому эллипсу. Ближе всего к Солнцу она подходит в начале января, когда в северном полушарии зима, удаляется в начале июля, когда в северном полушарии лето. Разница в удалении Земли от Солнца между январем и июлем составляет около 5 млн км, вследствие этого зима в северном полушарии чуть-чуть теплее, чем в южном, а лето, наоборот, чуть-чуть прохладнее. Это явно ощущается в Арктике и Антарктиде. Эллиптичность орбиты Земли сказывается на характере времен года лишь косвенно и очень незначительно. Причина смены времен года кроется в наклоне земной оси. Ось вращения Земли расположена под углом в $66,5^\circ$ к плоскости орбиты.

Для большинства практических задач можно принимать, что ось вращения Земли перемещается в пространстве всегда параллельно самой себе. На самом же деле ось вращения Земли, или, что то же самое, ось мира, поскольку они параллельны, описывает на небесной сфере малый круг, совершая один полный оборот за 26 тыс. лет. В ближайшие сотни лет северный полюс мира будет находиться недалеко от Полярной звезды, затем начнет удаляться от нее, и название последней звезды в ручке ковша Малой Медведицы – Полярная – утратит свой смысл. Через 12 тыс. лет полюс мира приблизится к самой яркой звезде северного неба – Веге из созвездия Лиры. Описанное явление носит название прецессии оси вращения Земли. Обнаружил явление прецессии уже Гиппарх Никейский (ок. 190 до н. э. – ок. 120 до н. э.), который сравнил положения звезд в своем каталоге с составленным задолго до него звездным каталогом Аристиллы и Тимохариса (296–272 гг. до н. э.). Сравнение каталогов и указало Гиппарху на медленное перемещение оси мира.

Земля совершает в пространстве множество сложных движений (более 13), некоторые из них заметны для наблюдателей, другие, наоборот, почти неощутимы. Их совокупность демонстрирует на примере Земли ту вечную изменчивость, которая свойственна всему мирозданию и является общим свойством материи. Главной силой, определяющей все эти движения, служит гравитация – притяжение Земли другими космическими телами.

Тринадцать движений Земли нашли научное подтверждение. Два движения Земли известны с давних времен – это вращение вокруг собственной оси и обращение вокруг Солнца.

Известно немало доказательств вращения Земли, например, с помощью маятника Фуко или, если с высокой башни бросить камень, то он упадет к востоку, т. е. в том же направлении, в котором вращается Земля.

Все движения в природе в той или иной степени неравномерны. Например, движение вокруг Солнца Земля совершается по эллипсу. Когда она проходит через перигелий – ближайшую к Солнцу точку своей орбиты, от Солнца ее отделяет почти 147 млн км. Через полгода расстояние от Земли до Солнца становится близким к 152 млн км. При этом скорость движения Земли все время меняется. Вблизи Солнца она увеличивается, с удалением от него – уменьшается. В среднем же Земля летит по своей орбите в 36 раз быстрее пули – 30 километров в секунду. Но эта скорость кажется огромной лишь по земным меркам.

Земной шар часто сравнивают с волчком. Такое сравнение имеет более глубокий смысл. Если раскрутить волчок, а потом слегка толкнуть его ось – она начнет описывать конус, причем со скоростью, значительно меньшей скорости вращения волчка. Это движение называется прецессией. Оно свойственно и земному шару, являясь его третьим движением.

Луна вызывает еще одно, гораздо менее значительное, четвертое движение Земли. Из-за воздействия Луны на различные точки земного эллипсоида земная ось описывает маленький конус с периодом в 18,6 года. Благодаря этому движению, называемому нутацией, небесный полюс вычерчивает на фоне звездного неба крошечный эллипс, у которого наибольший диаметр близок к 18 секундам дуги, а наименьший – около 14 секунд.

Во всех учебниках географии подчеркивается, что наклон оси Земли к плоскости ее орбиты всегда остается неизменным. Строго говоря, это не совсем точно. Земля, хотя и крайне медленно, все же «покачивается», и наклон земной оси слегка меняется. Впрочем, это пятое движение Земли мало ощутимо.

Не остается неизменной и форма земной орбиты. Ее эллипс становится то более, то менее вытянутым. В этом заключается шестое движение земного шара.

Прямая, соединяющая ближайшую и наиболее отдаленную от Солнца точки орбиты Земли, называется линией апсид. В ее медленном повороте выражается седьмое движение Земли. Из-за этого меняются сроки прохождения Земли через перигелий. В настоящую эпоху максимальное сближение Солнца и Земли приходится на 3 января. За 4000 лет до нашей эры Земля проходила через перигелий 21 сентября. Это снова повторится лишь в 17000 году.

Выражение «Луна обращается вокруг Земли» не совсем точно. Дело в том, что Земля притягивает Луну, а Луна Землю, поэтому оба тела дви-

жуются вокруг общего центра тяжести. Если бы массы Земли и Луны были одинаковы, то этот центр находился на равном удалении от них, и оба небесных тела обращались бы вокруг по одной орбите. На самом же деле Луна в 81 раз легче Земли, и центр тяжести системы Земля–Луна в 81 раз ближе к Земле, чем к Луне. Он находится внутри Земли почти в 1700 километрах от нее поверхности. Вот вокруг этой точки происходит восьмое движение Земли.

Если бы вокруг Солнца обращалась только Земля, оба тела описывали бы эллипсы вокруг общего неподвижного центра тяжести. Однако в действительности притяжение Солнца другими планетами заставляет этот центр двигаться по очень сложной кривой. Ясно, что это движение отражается и на Земле, порождая еще одно девятое ее движение.

Наконец, сама Земля весьма чутко реагирует на притяжение всех других планет Солнечной системы. Их общее воздействие отклоняет Землю с ее простого эллиптического пути вокруг Солнца и вызывает все те не-правильности в орбитальном движении Земли, которые астрономы называют возмущениями. Движение Земли под действием притяжения планет является ее десятым движением.

Установлено, что звезды несутся в пространстве со скоростью в десятки, а иногда и сотни километров в секунду. Солнце и в этом проявляет себя как рядовая звезда. Вместе со всей Солнечной системой оно летит в направлении созвездия Геркулеса со скоростью около 20 километров в секунду, перемещение Земли относительно ближайших к Солнцу звезд называется одиннадцатым ее движением.

Обращение Солнца вокруг галактического ядра совершается за период около 200 млн лет – такова продолжительность «галактического года». Полет Земли в пространстве вместе с Солнцем вокруг центра Галактики – двенадцатое ее движение.

Тринадцатым движением Земли является ее участие в движении всей звездной системы Галактики относительно ближайших к ней и известных других галактик.

Перечисленные тринадцать движений Земли не исчерпывают всех ее движений.

Различают три наружных оболочки Земли: литосферу, гидросферу и атмосферу. Под литосферой понимают верхний твердый покров планеты, который служит ложем океана, а на материках совпадает с сушей. Гидросфера – это все виды химически не связанной воды в твердом, жидком

и газообразном состоянии. В состав гидросферы входят воды Мирового океана, подземные воды, воды рек, озер, болот, морей, ледников и других криогенных образований. Мировой океан покрывает 71% поверхности Земли, его средняя глубина 3900 м.

Луна оказывает разнообразное влияние на Землю, которое обусловлено простыми законами динамики. Самая удивительная особенность движения Луны состоит в том, что скорость ее вращения вокруг оси совпадает со средней угловой скоростью обращения вокруг Земли.

Наименьшее расстояние между центрами Земли и Луны равно 356410 км, наибольшее – достигает 406700 км, а среднее расстояние составляет 384401 км. Земная атмосфера искривляет лучи света до такой степени, что всю Луну (или Солнце) можно видеть еще до восхода или после заката. Дело в том, что преломление лучей света, входящих в атмосферу из безвоздушного пространства, составляет около $0,5^\circ$, т. е. равно видимому угловому диаметру Луны. Таким образом, когда верхний край истинной Луны находится чуть ниже горизонта, вся Луна видна над горизонтом.

Под действием притяжения Луны Земля в целом подвергается деформациям (приливообразующие силы образуют своеобразную волну во всех оболочках) и сразу же возвращается к первоначальной форме после прекращения их действия. Таким образом, Земля не только тверже стали, но и более упругая.

О внутреннем строении Земли можно судить лишь по косвенным показателям. Даже самые глубокие скважины на суше едва преодолевают 10-километровый рубеж, а под водой удается, пройдя осадочный чехол, проникнуть в базальтовый фундамент не более чем на 1,5 км. Но существует сейсмический метод изучения внутреннего строения Земли. Скорость движения сейсмических волн зависит от плотности и упругих свойств горных пород, через которые они проходят. Более того, они отражаются от границ между пластами пород разного типа и преломляются на этих границах.

По записям колебаний земной поверхности при землетрясениях – сейсмограммам – было установлено, что недра Земли состоят из трех основных частей: коры, мантии и ядра.

Кора отделяется от мантии отчетливой границей, на которой скачкообразно возрастают скорости сейсмических волн, что вызвано резким повышением плотности вещества. Эта граница носит название раздел

Мохововичича (иначе – поверхность Мохо или раздел М) по фамилии сербского сейсмолога, открывшего ее в 1909 г. Мощность коры меняется от нескольких километров в океанических областях до нескольких десятков километров в горных районах материков. В самых грубых моделях Земли кору представляют в виде однородного слоя толщиной порядка 35 километров. Ниже, до глубины примерно 2900 км, расположена мантия. Она, как и земная кора, имеет сложное строение.

Еще в XIX столетии стало ясно, что у Земли должно быть плотное ядро. Действительно, плотность наружных пород земной коры составляет около $2,8 \text{ г/см}^3$ для гранитов и примерно $3,0 \text{ г/см}^3$ для базальтов, а средняя плотность нашей планеты – $5,5 \text{ г/см}^3$. В то же время существуют железные метеориты со средней плотностью $7,85 \text{ г/см}^3$ и возможна еще более значительная концентрация железа. Это послужило основанием для гипотезы о железном ядре Земли. А в начале XX в. были получены первые сейсмологические свидетельства его существования.

Граница между ядром и мантией наиболее отчетливая. Она сильно отражает продольные (Р) и поперечные (S) сейсмические волны и преломляет Р-волны. Ниже этой границы скорость Р-волны резко падает, а плотность вещества возрастает: от $5,6 \text{ г/см}^3$ до $10,0 \text{ г/см}^3$. S-волны ядро вообще не пропускает. Это означает, что вещество там находится в жидком состоянии.

Есть и другие свидетельства в пользу гипотезы о жидком железном ядре планеты. Так, открытое в 1905 г. изменение магнитного поля Земли в пространстве и по интенсивности привело к заключению, что оно зарождается в глубинах планеты. Наиболее вероятный источник магнитного поля – жидкое железо (т.е. проводящее токи) – ядро, где возникают движения, действующие по механизму самовозбуждающегося динамо. В нем должны существовать токовые петли, грубо напоминающие витки провода в электромагните, которые и генерируют различные составляющие геомагнитного поля.

В 30-е гг. сейсмологи установили, что у Земли есть и внутреннее твердое ядро. Современное значение глубины границы между внутренним и внешним ядрами примерно 5150 км.

Граница наружной зоны Земли расположена на глубине порядка 70 км. Литосфера включает в себя как земную кору, так и часть верхней мантии. Этот жесткий слой объединяется в единое целое его механическими свойствами. Литосфера расколота примерно на десять больших плит,

на границах которых случается подавляющее число землетрясений. Под литосферой на глубинах от 70 до 250 км существует слой повышенной текучести – так называемая астеносфера Земли. Жесткие литосферные плиты плавают в «астеносферном океане».

В астеносфере температура мантийного вещества приближается к температуре его плавления. Чем глубже, тем выше давление и температура. В ядре Земли давление превышает 3600000000 гПа, а температура – 6000°C.

Свидетельствами высокой температуры земных недр являются вулканические извержения, рост температуры при погружении в глубокие шахты, тепловой поток из недр на дне океанов. В среднем у поверхности Земли ее увеличение составляет 20 градусов на километр.

Тепловая энергия земных недр измеряется количеством тепла, выделяемого с единицы площади за единицу времени. Измерить тепловой поток Земли с достаточной точностью удалось только во второй половине XX века.

Распад радиоактивных изотопов калия, урана и тория служит источником тепла в материковой коре, средняя мощность которой около 35 мВт. При радиоактивном распаде указанных элементов выделяется примерно 130 Дж·см/год, что почти полностью совпадает с тепловыделением из коры, равным 130–170 Дж·см/год.

Океаническая кора значительно тоньше континентальной, и основу ее составляет 5–6-километровый базальтовый слой. Распад содержащихся в нем радиоактивных элементов дает всего около 10 Дж·см/год, но тепловой поток на океанах примерно такой же, как и на материках. Установлено, что основная часть тепла поступает в океаническую кору через литосферную плиту из мантии. Вещество мантии постоянно находится в движении. Неравенство температур различных слоев в ней приводит к активному перемешиванию вещества: более холодное и, соответственно, более плотное тонет, более горячее – всплывает. Это так называемая тепловая конвекция.

Большинство современных исследователей указывают на три возможных источника энергии для поддержания тепловой конвекции в мантии. Во-первых, мантия все еще сохраняет большое количество тепла, накопленного в период формирования планеты. Его достаточно, чтобы поверхностный тепловой поток сохранялся на его теперешнем уровне в течение срока, в несколько раз превышающего нынешний возраст Земли.

При этом планета должна остывать, но ее остывание происходит очень медленно. Во-вторых, определенное количество тепла, по-видимому, поставляется в мантию из ядра. И, наконец, третий источник – это распад радиоактивных элементов (их содержание в мантии в настоящее время трудно оценить).

Радиоактивный распад. Большинство атомных ядер нестабильно, поэтому рано или поздно они *спонтанно* (самопроизвольно) распадаются на более мелкие ядра и элементарные частицы, которые принято называть *продуктами распада* или *дочерними элементами*. Распадающиеся частицы принято именовать *исходными материалами* или *родителями*. У всех известных химических элементов (железо, кислород, кальций и т. п.) имеется хотя бы один стабильный изотоп (*изотопы* – разновидности химического элемента с одним и тем же числом протонов в ядре, соответствующим порядковому номеру элемента, – но разным числом нейтронов). Свидетельством их стабильности – является способность в значительных количествах накапливаться в природных условиях, не распадаясь на составляющие. Но у каждого из природных элементов имеются и нестабильные изотопы – их ядра можно получить в процессе ядерных реакций, но долго они не живут, поскольку быстро распадаются.

Распад ядер радиоактивных элементов или изотопов может происходить тремя основными путями, и соответствующие реакции ядерного распада названы тремя первыми буквами греческого алфавита. При *альфа-распаде* выделяется атом гелия, состоящий из двух протонов и двух нейтронов, – его принято называть альфа-частицей. Поскольку альфа-распад влечет за собой понижение числа положительно заряженных протонов в атоме на два, ядро, испустившее альфа-частицу, превращается в ядро элемента, отстоящее на две позиции ниже от нее в Периодической системе Менделеева. При *бета-распаде* ядро испускает электрон, а элемент продвигается на одну позицию *вперед* по периодической таблице (при этом, по существу, нейтрон превращается в протон с излучением этого самого электрона). Наконец, *гамма-распад* – это распад ядер с излучением фотонов высоких энергий, которые принято называть гамма-лучами. При этом ядро теряет энергию, но химический элемент не видоизменяется.

В реальности распад ядра радиоактивного элемента чем-то напоминает процесс жарки кукурузы при изготовлении поп-корна: зерна (нуклоны) отпадают от «початка» (ядра) по одному, в совершенно непредсказуемом

порядке, пока не отвалятся все. Закон, описывающий реакцию радиоактивного распада, собственно, только констатирует этот факт: за фиксированный отрезок времени радиоактивное ядро испускает число нуклонов, пропорциональное числу нуклонов, остающихся в его составе. То есть чем больше зерен-нуклонов все еще остается в «недожаренном» початке-ядре, тем больше их выделится за фиксированный интервал времени «жарки». При переводе этой метафоры на математический язык получим уравнение, описывающее радиоактивный распад:

$$dN = \lambda N dt,$$

где dN – число нуклонов, испускаемых ядром с общим числом нуклонов N за время dt , а λ – экспериментально определяемая *константа радиоактивности* исследуемого вещества.

Константа радиоактивности определяет, насколько быстро распадается ядро. Обычно измеряют *время полураспада* ядра (то есть срок, за который исследуемое ядро испускает половину содержащихся в нем нуклонов). У изотопов различных радиоактивных веществ время полураспада варьирует (в полном соответствии с теоретическими предсказаниями) от миллиардных долей секунды до миллиардов лет. То есть некоторые ядра живут практически вечно, а некоторые распадаются буквально моментально (тут важно помнить, что по истечении времени полураспада остается половина совокупной массы исходного вещества, по истечении двух сроков полураспада – четверть его массы, по истечении трех сроков полураспада – одна восьмая и т. д.).

Что касается возникновения радиоактивных элементов, то рождаются они по-разному. В частности, ионосфера (верхний разреженный слой атмосферы) Земли подвергается постоянной бомбардировке космическими лучами, состоящими из частиц с высокими энергиями. Под их воздействием долгоживущие атомы расщепляются на неустойчивые изотопы: в частности, из стабильного азота-14 в земной атмосфере постоянно образуется неустойчивый изотоп углерода-14 с 6 протонами и 8 нейтронами в ядре. Но гораздо чаще радиоактивные элементы образуются в *цепи реакций* ядерного деления. Так называют череду событий, в ходе которых исходное («материнское») ядро распадается на два «дочерних» (также радиоактивных), те, в свою очередь, – на четыре ядра «внучки» и т. д. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут получены стабильные изотопы. Примером может послужить изотоп урана-238 (92 протона + 146 нейтронов) со временем полураспада около 4,5 млрд.

лет. Этот период приблизительно равен возрасту Земли, значит, что примерно половина урана-238 из состава первичной материи формирования Земли по-прежнему находится в совокупности элементов земной природы. Уран-238 превращается в торий-234 (90 протонов + 144 нейтрона), время полураспада которого равно 24 суткам. Торий-234 превращается в палладий-234 (91 протон + 143 нейтрона) со временем полураспада 6 часов – и т. д. После десяти с лишним этапов распада получается, наконец, стабильный изотоп свинца-206.

Тектоника плит. Еще в 1912 г. немецкий исследователь Альфред Вегенер выдвинул гипотезу дрейфа континентов. На эту идею его натолкнули соответствие очертаний береговых линий материков Африки и Южной Америки, а также явные следы глобального изменения климата в прошлом во многих регионах мира. Но гипотеза поначалу была отвергнута научным сообществом, так как не указывала причин дрейфа. В 30-е гг. английский геолог Артур Холмс предложил объяснить движение континентов тепловой конвекцией. В 50-е гг., когда широко проводились исследования дна океана, гипотеза о крупных горизонтальных перемещениях в литосфере получила новые подтверждения. Значительную роль в этом сыграло изучение магнитных свойств пород, слагающих океаническое дно.

Еще в начале XX в. было установлено, что намагниченность современных лав соответствует нынешнему магнитному полю Земли, а у древних лав она часто ориентирована под большими углами или вообще противоположна направлению современного поля. Таким образом, намагниченность пород отражает состояние магнитного поля в предшествующие геологические эпохи. В базальтовых лавах много железа, и они, затвердевая по мере охлаждения, намагничивались в соответствии с существовавшим в тот период геомагнитным полем.

Имелись также данные о перемене полярности: северный магнитный полюс Земли становился южным и наоборот. Зарегистрировано 16 инверсий магнитных полюсов за последние несколько миллионов лет. Причины этого до сих пор окончательно не выяснены, но предполагают, что они связаны с процессами в жидком ядре. И, как оказалось, график этих инверсий свидетельствовал в пользу крупномасштабных перемещений материков.

Магнитная съемка тихоокеанского дна в 1955 и 1957 гг. обнаружила простирающиеся почти параллельно с севера на юг «полосы» с магнитными полями аномальной напряженности. А в 1963 г. были открыты полосо-

вые магнитные аномалии, вытянутые параллельно хребту Карлсберг в Индийском океане. К этому времени уже стала довольно известной гипотеза, выдвинутая в 1960 г. профессором Принстонского университета (США) Гарри Хессом и названная позже гипотезой спрединга, или «расширения морского дна». По ней горячая полурасплавленная мантийная масса поднимается под срединно-океаническими хребтами, распространяется в стороны от них в виде мощных потоков, которые разрывают и расталкивают литосферные плиты в разные стороны. Мантийное вещество заполняет образовавшиеся с обеих сторон от хребтов трещины – рифты.

Площадь поверхности Земли (как и ее объем) практически не изменилась за время ее существования. Поэтому, если новые участки поверхности наращиваются вдоль хребтов, то где-нибудь они должны и уничтожаться. Вероятнее всего, это происходит в глубоководных океанских желобах. Эти так называемые зоны субдукции (поглощения) расположены вдоль вулканических дуг, протянувшихся в Тихом океане от Аляски вдоль Алеутских островов к Японии, Марианским островам и Филиппинам вплоть до Новой Зеландии и вдоль берегов Америки. Когда в этих зонах земная кора опускается до глубины 100–150 км, часть вещества плавится, образуя магму, которая затем в виде лавы прорывается наверх и извергается в вулканах.

Таким образом, земная кора создается в рифтовых зонах океанов, как ленточный конвейер, движется со средней скоростью 5 см в год, постепенно остывая.

Гипотеза спрединга может хорошо объяснить магнитные аномалии морского дна. Если расплавленная порода, изливающаяся в срединно-океанических хребтах, затвердевает с обеих сторон от них, а затем расплзается в противоположных направлениях, то она будет создавать полосы, намагниченные согласно с ориентацией магнитного поля в период их застывания. Когда поверхность меняется, вновь образовавшееся морское дно намагничивается в противоположном направлении. Чередование полос дает подробную картину формирования морского дна по обеим сторонам от активного хребта, причем одна сторона является зеркальным отражением другой.

Первые же магнитные карты тихоокеанского дна у берегов Северной Америки, в районе хребта Хуан-де-Фука, показали наличие зеркальной симметрии. Еще более симметричная картина обнаружена с обеих сторон центрального хребта в Атлантическом океане.

Используя концепцию дрейфа материков, известную сегодня как «новая глобальная тектоника», можно восстановить взаимное расположение континентов в далеком прошлом. Оказывается, 200 млн лет назад они составляли единый материк.

В процессе формирования Земли из частиц протопланетного облака постепенно увеличивалась ее масса. Росли силы тяготения, а, следовательно, и скорости частиц, падавших на планету. Кинетическая энергия частиц превращалась в тепло, и Земля все сильнее разогревалась. При ударах на ней возникали кратеры, причем выбрасываемое из них вещество уже не могло преодолеть земного тяготения и падало обратно.

Чем крупнее были падавшие тела, тем сильнее они нагревали Землю. Энергия удара освобождалась не на поверхности, а на глубине, равной примерно двум поперечникам внедрившегося тела. А так как основная масса на этом этапе поставлялась планете телами размером в несколько сот километров, то энергия выделялась в слое толщиной порядка 1000 км. Она не успевала излучаться в пространство, оставаясь в недрах Земли. В результате температура на глубинах 100–1000 км могла приблизиться к точке плавления. Дополнительное повышение температуры, вероятно, вызывал распад короткоживущих радиоактивных изотопов. По-видимому, первые возникшие расплавы представляли собой смесь железа, никеля и серы. Расплав накапливался, а затем вследствие более высокой плотности просачивался вниз, постепенно образуя земное ядро. Таким образом, дифференциация (расслоение) вещества Земли могла начаться еще на очень ранней стадии, но этому процессу препятствовали ударная переработка поверхности и начавшаяся конвекция. Тем не менее определенная часть более тяжелого вещества все же успевала опуститься под перемешиваемый слой. В свою очередь конвекция притормаживалась дифференциацией вещества по плотности, сопровождавшейся выделением дополнительного тепла, которое ускоряло процесс формирования различных слоев в Земле.

Предположительно ядро сформировалось за несколько сот миллионов лет. При постепенном остывании планеты богатый никелем железоникелевый сплав, имеющий высокую температуру плавления, начал кристаллизоваться – так зародилось твердое внутреннее ядро. К настоящему времени оно составляет 1,7% массы Земли. В расплавленном внешнем ядре сосредоточено около 30% земной массы.

Развитие других оболочек продолжалось гораздо дольше и в некотором отношении не закончилось до сих пор.

Литосфера сразу после своего образования имела небольшую толщину и была очень неустойчивой. Она снова поглощалась мантией, разрушалась в эпоху великой бомбардировки (от 4,2 до 3,9 млрд лет назад), когда Земля, как и Луна, подвергалась ударам очень крупных и довольно многочисленных метеоритов. Следы этого периода на Земле практически стерты активными тектоническими процессами и воздействием атмосферы и гидросферы.

Около 3,8 млрд лет назад сложилась первая легкая и, следовательно, «непотопляемая» гранитная кора. В то время уже имелись воздушная оболочка и океаны, выделившиеся в процессе дегазации из недр Земли в предшествующий период. Атмосфера тогда состояла в основном из углекислого газа, азота и водяных паров, кислорода в ней было мало, но он вырабатывался в результате, во-первых, фотохимической диссоциации воды и, во-вторых, фотосинтезирующей деятельности простейших организмов, таких как сине-зеленые водоросли.

600 млн лет назад на Земле было несколько подвижных континентальных плит, весьма похожих на современные. Новый суперматерик Пангея появился значительно позже. Он существовал 300–200 млн лет назад, а затем распался на части, которые и сформировали нынешние материки. В будущем недра Земли могут остыть до такой степени, что конвекция в мантии и, следовательно, движение материков, а значит, и проявления других тектонических процессов (горообразование, извержение вулканов, землетрясения) постепенно ослабнут и прекратятся. Выветривание со временем сотрет неровности земной коры, и поверхность планеты скроется под водой. Дальнейшая ее судьба будет определяться среднегодовой температурой. Если она значительно понизится, то океан замерзнет, и Земля покроется ледяной коркой. Если же температура повысится (а скорее, к этому и приведет возрастающая светимость Солнца), то вода испарится, обнажив поверхность планеты. Очевидно, ни в том, что ни в другом случае жизнь человечества на Земле будет уже невозможна, по крайней мере, в современном представлении о ней.

Солнце не является уникальным объектом – это звезда спектрального класса G2, аналогов которой очень много в нашей Галактике и ее окрестностях. Эволюция звезд такого типа очень хорошо изучена – от рождения до смерти.

Главная особенность таких звезд в том, что они могут очень стабильно светить на протяжении всей своей жизни, а это 10 млрд лет. Светимость Солнца возрастает крайне медленно – на 10 процентов за миллиард лет. Это очень слабое изменение. В то же время эти звезды не взрываются, как сверхновые, не превращаются в черные дыры, не было случая, чтобы такая звезда внезапно погасла и т.д. Исходя из этого, делается вывод, что Солнце будет стабильным, и с ним ничего не может случиться, непрерывные наблюдения за ним ведутся с 1749 года.

Современная атмосфера Земли, составляющая менее одной миллионной доли массы планеты, содержит 78,08% азота, 20,05% кислорода, 0,94% инертных газов, 0,03% углекислого газа и незначительное количество других газов.

Давление и плотность в атмосфере убывают с высотой. Половина воздуха содержится в нижних 5–6 км, а почти вся вторая половина сосредоточена до высоты 11,3 км. На высоте 95 километров плотность воздуха в миллион раз ниже, чем у поверхности. На этом уровне изменяется химический состав атмосферы. Растет доля легких газов с преобладанием водорода и гелия. Часть молекул разлагается на ионы, образуя ионосферу. Выше 1000 км находятся радиационные пояса. Их тоже можно рассматривать как часть атмосферы, заполненную очень энергичными ядрами атомов водорода и электронами, захваченными магнитным полем планеты.

Вода покрывает более 70% поверхности земного шара, а средняя глубина Мирового океана около 4 км. Масса гидросферы в 275 раз больше массы атмосферы, но лишь 1/4000 от массы всей Земли.

Гидросферу на 94% составляют воды Мирового океана, в которых растворены соли (средняя соленость 35‰, то есть на 1000 долей воды приходится 35 долей соли), а также ряд газов. Верхний слой океана содержит 140 трлн тонн углекислого газа, а растворенного кислорода – 8 трлн тонн.

Вступая в XX в., ученые считали, что: 1) облик Земли в основных чертах неизблем и мало изменчив, т. к. это остывающая планета, тепло которой обеспечивает протекание земных процессов и явлений; 2) жизнь – сугубо земное образование, возникшее и существующее в сравнительно узком диапазоне температур и давлений; 3) существует защитный экран от губительного для живых организмов жесткого космического излучения; 4) между живой и неживой природой имеется резкая грань; 5) неживая природа формировалась в условиях, близких к современным, а ее иные образования есть результат последующих изменений; 6) окружаю-

щее Землю пространство, по сути, представляет собой вакуум; 7) функционирование планеты обеспечивается солнечной энергией, а человек на ней есть вершина мироздания; 8) кислород атмосферы – результат фотосинтеза, и увеличение его количества связано с разрастанием растительности.

За последние 50 лет XX в. появилось много принципиально новых данных, свидетельствующих об иных, чем ранее предполагалось, основных положениях в науках о Земле.

Важнейшими из них являются:

- поверхность каменных планет и их спутников в Солнечной системе сложена горными породами основного и ультраосновного типа по земной классификации;

- на планетах и их спутниках имеются льдистые образования, часть из которых может быть замерзшей водой;

- на каменных объектах Солнечной системы почти повсеместны вулканические процессы;

- функционирующие живые организмы на Земле обнаружены под километровыми толщами океанской воды, в горных породах на глубинах более тысячи метров, при положительных температурах в сотни градусов Цельсия и давлениях в тысячи атмосфер. Организмы сохраняют свою активность в условиях высоких значений радиоактивного и иного излучения, при низких температурах почти до абсолютного нуля и за пределами защитного озонового экрана Земли;

- разнообразные флора и фауна на дне океана существуют без солнечного света в условиях вулканических извержений (так называемые белые и черные курильщики), функционируют в различных рассолах, включая металлоносные, в абсолютной темноте и без присутствия кислорода;

- фотосинтез может проходить и без солнечного света, вероятно, при помощи других источников, например, света от подводных извержений, а бактерии могут производить органическое вещество и без света – за счет химической энергии (хемосинтез);

- дно океанов сформировано главным образом молодыми базальтами с прослоями осадков в течение последних 150 млн лет, причем основные излияния происходили по трещинам земной коры, которые постоянно расширялись, образуя гигантские понижения между континентами;

- расширение рифтогенных образований на дне океанов (зоны спрединга или срединно-океанические хребты) происходит в настоящее вре-

мя со средними скоростями 4–5 см/год. По данным измерений из космоса примерно с такой же скоростью расходятся берега океана и движутся отдельные острова;

- на дне океанов широко развиты процессы разнообразной дегазации земных недр в виде поступлений магмы, вулканических газов, ювенильных (впервые появившихся) глубинных вод, термальных и металлоносных образований;

- сверхглубокое бурение на суше не подтвердило существования ожидавшегося так называемого базальтового слоя. В кернах были представлены все те же осадочно-метаморфические горные породы с неизменными значениями кислотности, радиоактивности и металлоносности;

- нарушение скоростей и направлений продольных сейсмических волн при движении вглубь Земли интерпретировалось как изменение состава горных пород, но оказалось связанным с изменением состояний одних и тех же горных пород, повлиявших на их физические характеристики;

- в толщах материков подземные воды циркулируют на глубинах более 7–8 км, что явно ниже среднего современного уровня вод Мирового океана (это, вероятно, подтверждает молодость последнего и еще не установившееся гидростатическое равновесие планеты Земля);

- глубоководные океанические впадины являются молодыми формирующимися структурами, возникшими в условиях расширения коры;

- на дне океанов существует разнообразная жизнь, формирующая специфические экосистемы, в том числе уникальные (например, подводно-гейзерные);

- материковая и океаническая коры имеют принципиально различное строение, свидетельствующее о различных истории и возрасте;

- взаимодействие океана и атмосферы носит более тесный характер, чем предполагалось ранее, что наглядно прослеживается, например, на таких явлениях, как Эль-Ниньо и Ла-Нинья, и их отражении в характеристиках атмосферы, воздействующей на океан и сушу;

- масштабы отдельных природных катастроф, представляющих собой естественные явления в жизни планеты, приводят к перемещению огромных масс вещества и энергии, что превышает эффект антропогенного воздействия на окружающую среду.

Марс расположен от Солнца в полтора раза дальше, чем Земля и получает в 2,3 раза меньше света и тепла. Расстояние Марса от Солнца со-

ставляет в среднем 228 млн км. Благодаря большому эксцентриситету орбиты, Марс может изменять свое расстояние от Солнца на 21 млн км.

Первые наблюдения Марса проводились еще до изобретения телескопа Коперником, старавшимся подкрепить ими свою гелиоцентрическую систему мира. Но значительно более точными были наблюдения знаменитого датского астронома Тихо Браге; их точность достигала до 10 секунд дуги. За свою долгую жизнь Тихо пронаблюдал десять противостояний Марса, накопив непрерывный ряд наблюдений за 22 года. Этот ценнейший материал попал после смерти Тихо в самые верные руки — в руки Иоганна Кеплера, прекрасного вычислителя, человека широких взглядов. Обработка наблюдений положений Марса привела Кеплера к открытию трех его знаменитых законов движения планет. Для выяснения законов движения планет и формы их орбит был выбран именно Марс, так как орбита Марса имеет эксцентриситет 0,093, тогда как орбита Венеры — только 0,007, в 13 раз меньше. Наблюдая Венеру или Юпитер, Кеплер не открыл бы свой первый закон, не обнаружил бы отличия орбиты планеты от окружности. Кроме того, наблюдать Венеру очень трудно, так как эта планета не отходит от Солнца далее 48°, наблюдается на светлом небе и ее положение трудно привязывать к положениям неподвижных звезд. С другой стороны, Юпитер и Сатурн движутся по небу очень медленно, так как находятся относительно далеко от Земли. Марс же близок к Земле, сравнительно быстро перемещаться среди звезд, его можно наблюдать на фоне звездного неба на любых угловых расстояниях от Солнца, он описывает довольно широкие петли около эпохи противостояния. Элементы орбиты Марса, найденные Кеплером, мало отличались от современных. Например, большая полуось орбиты по Кеплеру равнялась 1,5264 астрономической единицы (а. е.), тогда как современное ее значение 1,5237 а. е. Эксцентриситет орбиты Марса по Кеплеру равен 0,0934. Чтобы найти, насколько расстояние в ближайшей к Солнцу точке орбиты, перигелии, меньше среднего, надо найти произведение среднего расстояния до Солнца и эксцентриситета:

$$228 \times 0,093 = 21 \text{ млн км}$$

Поток солнечного света и тепла на единицу поверхности Марса в перигелии и афелии относятся как 1,44:1. Период обращения Марса вокруг Солнца равен 2 годам 50 суткам. Марс вращается вокруг своей оси почти так же, как и Земля: его период вращения равен 24 час. 37 мин. 23 сек., что на 41 мин. 19 сек. больше периода вращения Земли. Ось вращения

наклонена к плоскости орбиты на угол 65° , почти равный углу наклона земной оси ($66,5^\circ$). Это значит, что смена дня и ночи, а также смена времен года на Марсе протекает почти так же, как на Земле. Там есть и тепловые пояса, подобные земным. Но из-за удаленности от Солнца климат Марса суровее земного. Год Марса почти вдвое длиннее земного, а значит, дольше длятся и сезоны. Наконец, из-за эксцентриситета орбиты длительность и характер сезонов заметно отличаются в северном и южном полушариях. В северном полушарии лето долгое, но прохладное, а зима короткая и мягкая, тогда как в южном полушарии лето короткое, но теплое, а зима долгая и суровая. Масса Марса была довольно точно определена по движению его спутников Фобоса и Деймоса, а теперь уточнена по движению искусственных спутников серии «Маринер». Она равна $1:3098700$ долей массы Солнца, $0,107$ массы Земли, или $6,42 \cdot 10^{26}$ г. Отсюда средняя плотность Марса получается $3,89 \text{ г/см}^3$, ускорение силы тяжести на его поверхности на экваторе 372 см/сек^2 ($0,38$ земного) и критическая скорость, достаточная для преодоления притяжения планеты, — $5,0 \text{ км/сек}$. Таковы общие характеристики Марса как планеты, которые во многом определяют условия на Марсе: состояние его атмосферы, температурный и ветровой режимы.

Измерения температур в различных точках поверхности Марса в разные сезоны и времена суток показали, что днем на экваторе температура может достигать 300 К ($+27^\circ\text{C}$), но уже к вечеру она падает до нуля, а к утру — до 223 К (-50°C). На полюсах температура может колебаться от $+10^\circ\text{C}$ в период полярного дня до очень низких температур во время полярной ночи. На Марсе могут наблюдаться и еще более низкие температуры, достигающие до 140 К — ниже точки замерзания углекислого газа. Средняя температура Марса составляет 198 К (-75°C).

Различие температур дня и ночи, полярных и тропических районов, зимы и лета приводит к возникновению ветров, имеющих подчас скорости $40\text{--}50 \text{ м/сек}$. Система воздушной циркуляции на Марсе до конца не изучена, но известно, что там могут возникать ураганные ветры, пыльные бури, формироваться смерчи.

Среди образований, обнаруженных на поверхности Марса, всеобщее внимание привлекают руслообразные протоки, или меандровые долины. Их внешний вид, наличие «притоков» позволяет предположить, что это русла рек. Однако на Марсе в настоящее время реки течь не могут, там вообще не может быть жидкой воды. Причина этого состоит в том, что при

тех низких давлениях, которые господствуют на Марсе, вода может закипать при очень низких температурах. Никакая другая жидкость не могла образовать наблюдаемых русел: лава быстро застывает, а жидкая углекислота даже в земных условиях не может существовать. Единственным объяснением меандров на Марсе – это работа водных потоков, рек, для которых в прошлом существовали необходимые условия – значит, в прошлом атмосферное давление на Марсе было значительно выше, чем в настоящее время.

Важнейшим критерием для оценок возраста тех или иных структур на поверхности планеты служит число кратеров ударного происхождения в зависимости от их размеров и степени разрушения. Однако в условиях сильной эрозии трудно установить истинную плотность кратеров на Марсе. К тому же в отдельных районах она может быть частично связана с позднейшей вулканической активностью, а не только с возрастом древних форм рельефа. Особенно много их в южном полушарии планеты, где число кратеров и их распределение по размерам сравнимы со степенью насыщенности лунной поверхности, в то время как на других участках они практически отсутствуют.

Темные области, занимающие значительную часть поверхности планеты, получили название морей. Диаметры некоторых из них превышают 2000 км. Возвышенности, напоминающие земные континенты, представляющие собой светлые поля оранжево-красного цвета, названы материками. Как и на Венере, здесь есть огромные вулканические конусы. Высота наибольшего из них – Олимпуса – превышает 25 км, диаметр кратера 90 км. Диаметр основания этой гигантской конусообразной горы более 500 км. О том, что миллионы лет назад на Марсе происходили мощные вулканические извержения и смещались поверхностные пласты, свидетельствуют остатки лавовых потоков, огромные разломы поверхности (один из них – Маринер – тянется на 4000 км), многочисленные ущелья и каньоны.



Рис. 28. Гора Olympus на Марсе
Высота около 25 км, диаметр основания
более 500 км

4 августа 2007 года состоялся запуск космического аппарата Phoenix (Феникс), а 25 мая 2008 года он успешно сел на поверхность Марса. Последний сеанс связи с аппаратом прошел 2 ноября 2008 года, и 10 ноября этого же года было объявлено об окончании миссии Феникса. Бортвая лаборатория исследовала химические и физические свойства марсианских «почв». Результаты анализа показали, что грунт содержит микроэлементы, необходимые для жизни растений, а его pH колеблется от 8 до 9 единиц, что соответствует слабощелочным земным почвам. Основная задача подобных исследований практически не изменилась за последние десятилетия, но если раньше ученые искали на Марсе жизнь, то теперь занимаются поиском условий для нее. По предварительным данным можно сделать вывод о том, что марсианский грунт пригоден для растительной и бактериальной жизни (по крайней мере, в месте посадки Феникса). Phoenix нашел следовые количества магния, натрия, калия и хлора, соединения которых удалось растворить, и тем самым подтвердить возможность усвоения их живыми существами.

Среди неорганики, требуемой для аналогичной земной жизни, необходимо найти азотистые соединения, возможно, даже в более глубоко лежащих богатых льдом слоях.

Таким образом, состав марсианского грунта не исключает возможность жизни. Теперь список растений и микроорганизмов, способных существовать на поверхности красной планеты, существенно расширился. Помимо экстремофилов, выживающих в больших концентрациях сульфитов и железа, обнаруженных на экваторе Марса, в него можно включить как минимум половину всех бактерий, а главное – обычные растения вроде спаржи, бобов или репы.

На нашей планете почвы с такой кислотностью весьма распространены и даже без подготовки пригодны для культивации полезных растений.

Для огородничества на красной планете необходимо решить две проблемы: 1 – низкие температуры, при которых вода не может оставаться в жидкой форме; 2 – крайняя разреженность атмосферы, в которой к тому же очень мало кислорода и недостаточное количество углекислого газа. На ранней стадии геологической истории Марса, датируемой 4,6–3,5 миллиардами лет назад, его атмосфера содержала достаточно CO₂, чтобы поддерживать температуру в нужном диапазоне через парниковый эффект.

26 ноября 2011 года НАСА был запущен марсоход «Кьюриосити», который высадился на поверхность планеты 6 августа 2012 года. Его основ-

ной задачей является изучение геологии и атмосферы Красной планеты, а также поиск вероятных следов жизни.

«Кьюриосити» обнаружил на Марсе следы древнего озера, в котором предположительно могла существовать жизнь (рис. 29).



Рис. 29. Реконструкция озера в кратере Гейла
Изображение: NASA

Следы озера были найдены на участке Yellowknife Bay в кратере Гейла. Анализ осадочных пород показал, что около 3,6 миллиарда лет назад в кратере Гейла существовало, по меньшей мере, одно озеро. Предположительно оно было пресноводным и содержало ключевые химические элементы, необходимые для жизни: углерод, водород, кислород, азот и серу. Ученые предполагают, что в такой воде могли существовать простые бактерии, такие как хемолитоавтотрофные (то есть получающие энергию за счет окисления неорганических соединений и использующие углекислый газ как источник углерода).

Однако никаких признаков жизни на Марсе пока не обнаружено. Пока можно говорить лишь о том, что озеро в кратере Гейла могло бы предоставить благоприятные условия для микроорганизмов.

4.3. Спутники планет¹

Спутники планет – это небольшие тела Солнечной системы, обращающиеся вокруг планет под действием их притяжения. В настоящее время открыто 136 спутников планет. Из них 101 спутник имеет собственные названия, а остальные – временные обозначения. Ближайшие к Солнцу планеты – Меркурий и Венера не имеют естественных спутников. Земля имеет единственный естественный спутник – Луну.

Марс имеет два спутника – Фобос и Деймос, открытые Холлом в 1877 году, размером 27 и 15 км. Эти спутники известны своей близостью к планете и весьма быстрым движением. В течение марсианских суток Фобос дважды восходит и дважды заходит. Деймос перемещается по небосводу медленнее: с момента его восхода над горизонтом до захода проходит более двух с половиной суток. Оба спутника Марса движутся почти точно в плоскости его экватора. С помощью космических аппаратов установлено, что Фобос и Деймос имеют неправильную форму и в своем орбитальном движении остаются повернутыми к планете всегда одной и той же стороной.

Система спутников Юпитера в настоящее время содержит более 60 спутников. До 1999 года были известны 16 спутников Юпитера, образующих 4 группы. Это Галилеевы спутники, названные по имени их первооткрывателя Галилео Галилея, – Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. Они отличаются большими размерами. Ио и Европа имеют размер Луны, Каллисто по размеру равна Меркурию, а Ганимед – крупнейший спутник Солнечной системы, его диаметр равен 5262 км. По сравнению с другими, галилеевы спутники исследованы более детально. При хороших атмосферных условиях можно различить диски этих спутников и даже заметить некоторые детали на поверхности.

На основании результатов тщательных наблюдений за изменениями блеска и цвета галилеевых спутников установлено, что у всех у них осевое вращение синхронно с орбитальным, поэтому они всегда обращены к Юпитеру одной стороной.

Из других спутников первая группа малых внутренних спутников находится ближе к планете, чем Ио, и идентифицируется теперь как спутники кольца. Это – Метида, Адрастея, Теба (Фива) и Амальтея, находящаяся на расстоянии всего в 2,6 радиуса планеты.

¹ Основные параметры спутников приведены в таблице 2 приложения.

Вторая группа малых внешних спутников располагается на расстоянии около 11 млн км с прямым движением на похожих орбитах с наклонами 30–45°. Это группа Гималии, в которую входят еще Лиситея, Леда, Элара и другие. Радиусы этих спутников от 8 км у Леды до 90 км у Гималии.

Третья группа обратных спутников – на расстоянии около 22 млн км от Юпитера на орбитах с наклонами примерно 150 градусов – Пасифе, Синопе, Ананке, Карме, S/1999 J1 и другие, их размеры от 30 до 70 км в диаметре.

И только один спутник не входит ни в одну из указанных групп. Это S/2000 J1, движущийся на расстоянии 7,5 млн км на орбите с наклоном 45 градусов.

Система Сатурна содержит 31 спутник (18 спутников имеют собственные названия и 12 спутников открыты в 2000 году).

Первый спутник был открыт Гюйгенсом в 1655 году. Это самый большой спутник Сатурна Титан. Два спутника – Мимас и Энцелад – были открыты Гершелем, четыре спутника – Тефию, Диону, Рею и Япет открыл Кассини. В XIX веке были открыты наземными наблюдениями Гиперион и Феба. В течение 1979–1981 гг. открыто восемь новых спутников Сатурна – это Атлас, Прометей, Пандора, Елена и коорбитальные спутники Янус и Эпиметей. На орбите Тефии найдены еще два малых спутника – Калипсо и Телесто. Еще один спутник Пан был открыт в 1990 году. Ближайший из них к Сатурну – Янус – движется настолько близко к планете, что обнаружить его удалось только при затмении колец Сатурна, создающего вместе с планетой яркий ореол в поле зрения телескопа.

Все спутники Сатурна, кроме Фебы, обращаются в прямом направлении. Феба движется по орбите с довольно большим эксцентриситетом в обратном направлении.

В 2000 году были открыты 12 спутников, получивших временные обозначения S/2000 S1–S12. Точные орбиты для них еще определяются.

Система спутников Урана включает 27 небесных тел (20 спутников, имеющих названия, один спутник S/1986 U10, открытый в 1999 году по снимкам Вояджера, полученным в 1986 г., и спутник S/2001 U1, открытый в 2001 г.).

Система спутников Урана состоит из 15 регулярных спутников, движущихся в плоскости экватора Урана на почти круговых орбитах, и 5 далеких нерегулярных спутников, открытых в 1997 и 1999 годах, движущихся

на орбитах с большими наклонами и эксцентриситетами. Пять больших спутников: Ариэль, Умбриэль, Титания, Оберон и Миранда – вращаются по орбитам, плоскости которых практически совпадают между собой. Самый удивительный из них – Миранда, около 500 км в поперечнике. Его поверхность поражает разнообразием долин, ущелий и крутых скал. Кажется, что эта луна сплавлена из трех или четырех огромных каменных обломков. Возможно, они представляют собой остатки прежней луны, некогда столкнувшейся с астероидом, а теперь сумевшей вновь собрать воедино свои обломки.

Девять спутников открыты при пролете «Вояджера» в 1986 году. Они были названы именами действующих лиц пьес Шекспира – Корделия, Афелия, Бианка, Крессида, Дездемона, Джульетта, Порция, Розалинда и Белинда. Пятнадцатый спутник Пак был открыт Синнотом в 1985 году. В 1997 году были открыты два далеких нерегулярных спутника Урана – Калибан и Сикоракса. В 1999 г. найдены еще три далеких спутника, которые также получили имена действующих лиц пьесы Шекспира «Буря» – Просперо, Сетевос и Стефано. В 1999 году на снимках, сделанных «Вояджером-2», был открыт спутник на орбите Белинды, который имеет предварительное обозначение S/1986 U10. В 2001 г. открыт еще один далекий спутник Урана S/2001 U1.

Вся система в целом отличается необычайным наклоном – ее плоскость почти перпендикулярна средней плоскости всех планетных орбит. Кроме спутников, вокруг Урана движется множество мелких частиц, образующих своеобразные кольца, совсем, однако, не похожие на знаменитые кольца Сатурна.

В системе Нептуна содержится 13 спутников, два из которых были открыты наземными наблюдениями – Тритон и Нереида, а шесть спутников открыты при пролете «Вояджера» – Наяда, Таласса, Деспина, Галатея, Ларисса и Протей.

Тритон был открыт в 1846 г., через две недели после открытия самого Нептуна. По размерам и массе он больше Луны. Имеет обратное направление орбитального движения.

Спутник Нереида – очень небольшой, обладает сильно вытянутой орбитой. Расстояние спутников до планеты меняется в пределах от 1,5 до 9,6 млн км. Направления орбитального движения – прямое. В 2002–2003 годах открыты пять далеких спутников Нептуна, имеющих временные обозначения S/2002 N1- N4 и S/2003 N1.

У бывшего в числе планет Плутона также удалось в 1978 г. обнаружить спутник – Харон. Это открытие имеет большое значение, так как дает возможность более точно вычислить массу тела по данным о периоде обращения спутника. Поскольку Плутон исключен из списка планет, дискуссией о том, не является ли он «потерявшимся» спутником Нептуна, потеряла смысл. Плутон является объектом пояса Койпера.

Вопрос о происхождении наблюдаемых систем спутников очень важен, он является одним из узловых вопросов современной космогонии.

4.3.1. Спутник Земли – Луна

К спутникам планет с тяжелым веществом (плотность $3,34 \text{ г/см}^3$) и твердой поверхностью относятся Луна и ряд других. Луна имеет сходное с большими планетами строение и эволюцию, что позволяет считать ее полноправной планетой второй группы. В качестве спутника Луна – слишком большое космическое тело по отношению к нашей планете. Другие спутники значительно меньше своих планет. Например, у Юпитера диаметр в 25 раз больше диаметра его наибольшего спутника Ганимеда. Приблизительно такое же соотношение (24:1) поперечников Сатурна и его крупнейшего спутника Титана. Соотношение же диаметров Земли (12756 км) и Луны (3476 км) – 3,7:1. Другими словами, если соотношение размеров других планет и их крупнейших спутников выражается разнорядковыми величинами, то у Земли и Луны – однопорядковыми.

Это один из доводов считать Луну планетой, а, кроме того, Солнце притягивает Луну в 2,2 раза сильнее, чем это делает Земля. Иными словами, движением Луны управляет Солнце, а не Земля. Ни один другой спутник планет Солнечной системы не испытывает на себе такого сильного относительного притяжения Солнца, которое превосходило бы притяжение самой планеты.

На Луне, лишенной атмосферы и гидросферы, метеоритная бомбардировка до сих пор остается важнейшей в формировании рельефа поверхности и структуры коры, и эффект ее действия здесь наиболее выразителен. К тому же он лучше изучен, чем на других планетах.

Крупные метеоритные кратеры называют ударно-взрывными.

Удар крупного метеорита – это чрезвычайно грандиозное и эффектное явление. На поверхности планеты возникает огромная взрывная воронка с поперечником в десятки и сотни километров и в глубину – до

нескольких километров. Десятки тысяч кубических километров грунта выбрасывается из образующегося кратера во все стороны на расстояние сотен километров (до 500 и более). Причем часть рыхлой массы может быть выброшена с такой силой, что приобретенная ею скорость может преодолеть силу притяжения Луны и улететь в космос. Однако основная масса выброшенного материала образует светлые полосы, радиально расходящиеся от кратера. Такие кратеры называются лучевыми. По прошествии многих миллионов лет полосы светлого материала темнеют и сливаются с темным фоном старой поверхности грунта. Вдоль светлых лучевых полос, исходящих от воронки кратера, нередко наблюдаются цепочки малых вторичных кратеров. Последние возникают от ударов, разлетающихся из кратера крупных глыб.

4.3.2. Спутники Марса

Поверхность спутников Марса состоит из очень темных минералов с низким альбедо (меньше 5%) и покрыта многочисленными кратерами. Один из кратеров на Фобосе имеет поперечник около 5,3 км. Они, вероятно, рождены метеоритной бомбардировкой, происхождение системы параллельных борозд неизвестно. Средняя плотность массы Фобоса (по гравитационному возмущению траектории орбитального космического аппарата «Викинг») составляет около 2 г/см^3 . Угловая скорость орбитального движения Фобоса настолько велика, что он, обгоняя осевое вращение планеты, восходит, в отличие от других светил, на западе, а заходит на востоке. Возможно, Фобос и Деймос являются астероидами, захваченными полем тяготения Марса, а не лунами, которые когда-то образовались вблизи планеты. Поверхность у них темная, как у всех астероидов, и по плотности они тоже близки к ним. Оба спутника выглядят как большие куски каменистой породы; возможно, они образовались на ранней стадии существования Солнечной системы – может быть, даже раньше, чем большие планеты. Неправильная форма Фобоса и Деймоса может быть объяснена двумя причинами. Во-первых, они, возможно, представляют собой фрагменты, отколовшиеся при столкновении более крупных небесных тел. Во-вторых, ввиду столь небольших размеров, их собственная сила тяготения слишком мала, чтобы сжать их до более круглой формы.

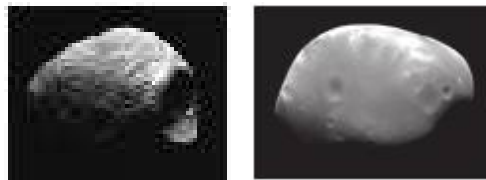


Рис. 30. Фобос (слева) Деймос (справа)

Своего рода контрольную цифру для получения сравнительной оценки числа соударений, которым подверглась поверхность Марса за геологическую историю, дает изучение поверхности его спутников – Фобоса и Деймоса (рис. 30, 31).

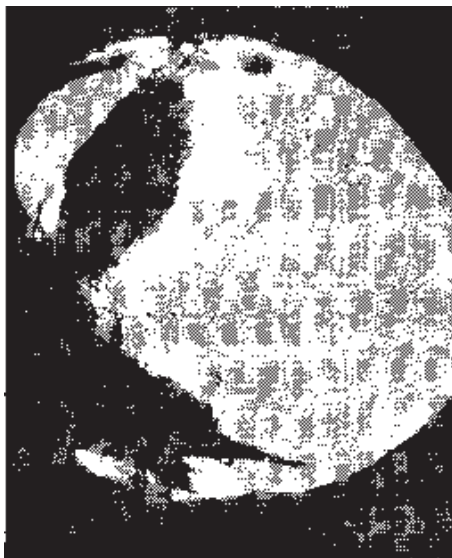


Рис. 31. Ближайший спутник Марса – Фобос

Снята его сторона, постоянно обращенная к Марсу. Слева сверху – самый большой кратер Стикни, диаметром 10 км. Снизу от него заметны поперечные борозды, вероятно, являющиеся трещинами, возникшими при ударе образовавшего этот кратер метеорита (снимок «Викинга-1»)

Низкую отражательную способность (альбедо) объясняют их химическим составом, который более всего похож на углистые хондриты. Последние представляют собой неплотное темное углистое вещество, богатое гидратированными силикатами, газами и даже органическими соединениями. Они

образуют небольшую группу среди обычных хондритов – самого распространенного класса каменных метеоритов, содержащих наибольшее количество легких летучих элементов. Предположение об углистых хондритах и сравнительно малая плотность спутников (около 2 г/см^3) не противоречат наиболее вероятной модели их внутреннего строения, согласно

которой рыхлым материалом образованы только внешние слои, окружающие более плотные недра. Видимо, их поверхности покрыты слоем пыли вследствие интенсивной метеоритной бомбардировки, и поверхностный слой напоминает лунный реголит. Как показали фотоснимки, полученные с близкого расстояния «Маринером-9» и «Викингими», на Деймосе имеются кратеры поперечником менее 50 м, засыпанные пылью, сползающей по склонам. Вдоль орбит спутников можно ожидать повышенную плотность пылевых частиц, формирующих своего рода пылевые торы, что связано с малой силой тяжести и, следовательно, низкой скоростью убегания, которую обычно называют второй космической скоростью (для Фобоса она всего около 13 м/с, а для Деймоса около 8 м/с).

На поверхности Деймоса при высоком разрешении снимка (рис. 32) различимы даже отдельные глыбы неправильной формы, поперечником в десятки метров (т. е. размером с небольшой дом), видимо, представляющие собой следы выбросов из кратеров при ударе метеорита или его фрагменты. Наиболее впечатляющей особенностью поверхности Фобоса (рис. 31) являются линейные структуры типа борозд или желобов, которые ориентированы примерно

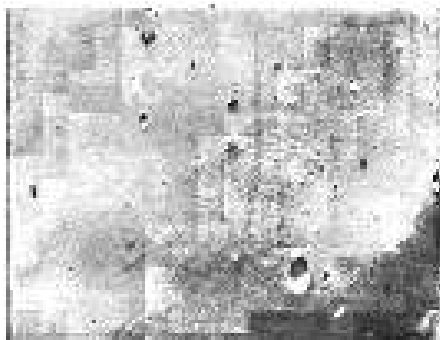


Рис. 32. Поверхность Деймоса. Видны многочисленные кратеры диаметром 50–100 м, отдельные глыбы (снимок «Викинга-2»)

перпендикулярно оси, направленной к Марсу. Для объяснения происхождения этих структур предложены различные гипотезы. Вполне правдоподобным кажется предположение о приливных эффектах, значительно более сильных, чем оказываемые Землей на Луну, и приведших к образованию «складок». Предпринималась попытка связать желоба с эрозией материала различной прочности на поверхности более крупного тела, фрагментом которого мог бы быть Фобос, и последующим отложением рыхлого материала. Высказана оригинальная идея о возникновении трещин во время гипотетического захвата этого тела Марсом из пояса астероидов, который сопровождался внутренним напряжением при торможении.

Тщательное изучение изображений дает возможность предположить, что это скорее трещины, а не складки и не остаточные формы эрозии. Действительно, наиболее крупные, четко выраженные трещины, имеющие ширину от 100 до 200 м и глубину от 10 до 20 м, находятся вблизи кратера Стикни, который образовался от удара крупного метеорита. Это событие могло стать катастрофой для такого небольшого тела, хотя бы частично состоящего из углистых хондритов, обладающих очень слабой механической прочностью. На противоположной кратеру стороне трещины меньше, а самая крупная, непосредственно примыкающая к Стикни, имеет ширину 700 м и глубину 90 м! Эти размеры огромны, так как максимальный поперечник Фобоса всего 27 км, а минимальный – 19 км.

Исходя из плотности кратеров на Фобосе и скорости кратерообразования на небесных телах в районе орбиты Марса, которая вдвое выше, чем в районе земной орбиты, возраст борозд оценивается в 3,4 млрд лет.

4.3.3. Спутники Юпитера

Естественные спутники планеты Юпитер на сегодняшний день образуют самое многочисленное семейство: известны 63 спутника Юпитера, которые делятся на несколько групп, кроме того, у Юпитера есть система колец.

Таблица 4

Группы спутников Юпитера, перечисление в группах в порядке возрастания большой полуоси орбиты	
Внутренние спутники	Метида, Адрастея, Амальтея, Фива.
Галилеевы спутники	Ио, Европа, Ганимед, Каллисто.
	Фемисто.
Группа Гималии	Леда · Гималия · Лиситея · Элара · S/2000 J 11.
	Карпо, S/2003 J 12.
Группа Ананке	Эвпории, S/2003 J 3, S/2003 J 18, Тельксиное, Эванте, Гелике, Ортозии, Иокасте, S/2003 J 16, Праксидике, Гарпалике, Мнемее, Гермиппе, Тионе, Ананке.
Группа Карме	Херсе, Этне, Кале, Тайгете, S/2003 J 19, Халдене, S/2003 J 10, Эриноме, Каллихоре, Калике, Карме, Пазите, Эвкеладе, Архе, S/2003 J 5, Исоное, S/2003 J 9.
Группа Пасифе	S/2003 J 15, S/2003 J 23, Аойде, Каллирое, Эвридоме, Киллене, S/2003 J 4, Пасифе, Гегемоне, Синопе, Спонде, Автоное, Коре, Мегаклите, S/2003 J 2.

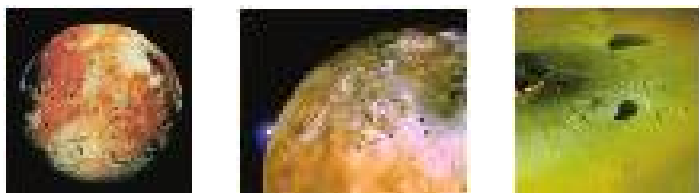
После пролетов около Юпитера космических аппаратов «Вояджер» стало известно много нового о галилеевых спутниках Юпитера (рис. 33).



Рис. 33. Каллисто, Ганимед, Европа, Ио
(слева направо)

Кроме того, были открыты три новых небольших спутника: Метида и Адрастея, – находящиеся ближе всего к планете, и Фива (табл. 2, прилож.). Следовательно, считавшийся ближайшим к Юпитеру спутник Амальтея переместился на третье место, а с пятого по восьмое места занимают галилеевы спутники. По своим размерам и расположению галилеевы спутники можно уподобить модели внутренней области Солнечной системы, где находятся планеты земной группы. Однако эти тела, обладающие уникальными свойствами поверхностей, сильно отличаются от земных планет по целому ряду характеристик.

Наиболее удивительным оказался первый из семейства галилеевых спутников – Ио, на котором обнаружено много действующих вулканов (рис. 34 а, б, в).



а

б

в

Рис. 34 (а, б, в). Изображения спутника Юпитера Ио

На протяжении нескольких часов пролета двух аппаратов «Вояджер» наблюдалось несколько извержений с мощными вулканическими вы-

бросами, причем шесть из семи вулканов, зарегистрированных первым аппаратом, продолжали действовать четыре месяца спустя, во время пролета второго аппарата. Крупнейшее извержение со следами изливающихся потоков лавы и вулканических отложений, по форме напоминающих отпечаток коровьего копыта (рис. 34 в). Крупные извержения отчетливо выделяются на краях диска Ио (рис. 34 б). Высота выброса с левой стороны снимка составляет почти 300 км. Легко подсчитать, что для такого мощного извержения необходимо, чтобы скорость движения магмы из жерла вулкана была около 1 км/с. Это во много раз превышает скорость и высоту выбросов при извержении вулканов на Земле. Извержение самого крупного вулкана в Европе Этны (о. Сицилия) достигало высоты 20 км, а протяженность облака газов и пепла составляла 200 км. Извержения на Ио выглядят более впечатляюще. Объясняется это в первую очередь тем, что, в отличие от Земли, Ио имеет очень разреженную атмосферу, поэтому продукты извержения ускоряются за счет расширения газа в вакууме. При этом очаг извержения может быть расположен на очень небольшой глубине.

Спектры отражения Ио, в которых не обнаруживается признаков воды или водяного льда, содержат четкие признаки серы и ее соединений. Ио является источником этого вещества, поставляемого мощными вулканическими выбросами. Хорошо известно, что сера в виде диоксида (ангидрида) SO_2 и сероводорода H_2S является одним из главных продуктов вулканических извержений на Земле. С учетом этого все исследователи сходятся во мнении о том, что именно сера играла и продолжает играть определяющую роль в геологической эволюции и строении Ио.



Рис. 35. Участок поверхности Ио вблизи южного полюса. Видна широкая долина, с крутыми откосами; внутри ее система эскарпов и ущелий (снимок «Вояджера-1»)

Большое количество серы могло накопиться за геологическую эпоху в поверхностном слое, поверх силикатной коры. Толщина этого слоя оценивается от 3–4 до 20–30 км. Поднимаясь из глубины, жидкая магла из-за большей, чем у серы, плотности вряд ли достигает поверхности (подобно большинству извержений подводных вулканов на Земле), а, взаимодействуя с отложениями серы и сернистого ангидрида, приводит к их испарению. Расширяющийся газ вырывается в космос, увлекая за собой потоки жидкой серы. При охлаждении сера и сернистый ангидрид конденсируются на поверхности, создавая яркую окраску: красный и красновато-желтый цвета принадлежат сере, белые пятна – это снег из сернистого ангидрида, а черные пятна – вулканический пепел. В более глубоких слоях могут отлагаться соединения типа сульфидов магматогенного происхождения.

Среди объектов Солнечной системы Ио является рекордсменом по вулканической активности. Это пока единственный (кроме Земли) пример широко развитого современного вулканизма, вероятно, продолжающегося непрерывно и превосходящего по своей интенсивности вулканическую деятельность на Земле.

На маленькой по сравнению с земными планетами Ио (по своим размерам она почти такая же, как Луна) обнаружено свыше ста вулканических кальдер поперечником до 200 и более километров, т. е. в 10–100 раз превосходящих земные! Обнаружены потоки вытекающей или застывшей лавы протяженностью несколько сотен километров и шириной десятки километров, что также во много раз превосходит привычные земные масштабы. Серная лава вылетает наружу со скоростью 1000 м в секунду. Некоторое количество этого лавового вещества вырывается из поля тяготения Ио и образует кольцо, опоясывающее Юпитер.

Сами вулканы сравнительно невысокие, больших перепадов высот на поверхности Ио нет. Только в полярных областях встречаются отдельные горы высотой до 10 км (рис. 35). В целом же рельеф сглаженный, преобладают межвулканические равнины, и одновременно не обнаруживается выходов скальных пород. Предполагают, что под тонким верхним слоем затвердевшей серы встречаются очаги расплавов – подповерхностные «серные моря» с температурой не ниже +110°C, при которой сера плавится. Сама же температура поверхности в районе экватора составляет -140°C, а в полярных областях еще градусов на 50 ниже. Лишь в локальных участках, ассоциируемых с вулканической деятельностью, обна-

ружена температура $+ 10^{\circ}\text{C}$, т.е. на 150° выше средней поверхностной температуры. При столь низкой температуре пары серы, вырываясь на поверхность, очень быстро охлаждаются, что и объясняет образование ее красной модификации в вулканических отложениях, помимо двух наиболее распространенных в земных условиях аллотропических модификаций лимонно-желтого и медово-желтого цвета.

Ио подвергается возмущающему действию огромных приливных сил. Постоянное чередование растягивающих и сжимающих приливов внутри Ио порождает интенсивное внутреннее трение. Благодаря этому внутренние области остаются горячими и расплавленными, несмотря на огромное удаление Ио от Солнца.

По данным космического аппарата «Пионер-10» были открыты разреженная атмосфера и ионосфера Ио.

Другие галилеевы спутники также являются феноменами, обладающими каким-либо уникальным свойством. Например, Европа отличается наибольшей отражательной способностью и очень гладкой поверхностью. Максимальные вариации рельефа оцениваются не в километрах, а в десятках метров – и это в глобальном масштабе для тела, диаметр которого всего лишь на 350 км меньше, чем у Луны! Именно такую высоту (порядка 50 м) имеют различающиеся на поверхности цепи холмиков и пригорков, в то время как отдельные детали рельефа на поверхностях Ганимеда и Каллисто достигают, по крайней мере, в десять раз большей высоты. Совершенно не видно на поверхности Европы кратеров, во всяком случае кратеров крупнее 5 км в диаметре, что приводит к представлениям о ее сравнительно недавнем формировании или о периодически происходящих процессах «обновления» (рис. 36).

Еще одним феноменом этого спутника оказалось наличие большого количества линейных структур – пересекающихся под разными углами, буквально изрезавших его поверхность и протянувшихся в разных направлениях на сотни и тысячи километров, иногда охватывающих половину окружности (около 5000 км). Ширина этих полос в среднем несколько десятков километров, но местами доходит до 200–300 км, а глубина обычно не превышает нескольких сотен метров.

На основе анализа спектров отражения галилеевых спутников было высказано предположение о наличии на поверхности Европы и Ганимеда водяного льда. Измерения с космических аппаратов подтвердили правильность этого предположения. Была также определена поверхностная

температура, которая в районе терминатора составила 93 К (-180°C) и всего на 30–40 К больше в полдень. При такой температуре поверхность, конечно, является полностью замерзшей. Объяснение удивительной гладкости поверхности Европы и обилия нитевидных полос можно найти в рамках модели, согласно которой слой льда простирается на довольно большую глубину. Однако твердая ледяная корка, очевидно, лежит только на самой поверхности, которая покоится на гораздо более протяженном слое, состоящем из смеси сравнительно рыхлого «губчатого» льда с водой. Такая смесь, называемая шугой, хорошо известна у нас на Земле. Она образуется перед началом ледостава за счет переохлаждения воды на горных и порожистых реках, а также в нижних бьефах гидроузлов, забивая водозаборники, фильтры и препятствуя их нормальной работе.

Оба слоя – шуга и ледяной покров – составляют своеобразную верхнюю оболочку Европы, максимальная толщина которой оценивается примерно в 100 км. Предполагают, что ее частично расплавленное состояние обусловлено механизмом генерации внутреннего тепла. Под шугой, возможно, скрыты значительные вариации высот на поверхности, представляющей собой твердое силикатное вещество, подобно тому, как земные океаны полностью нивелируют рельеф дна. Только на Европе шугу скорее следует уподобить собственно коре, а не гидросфере.



Рис. 36. Гладкая поверхность и увеличенный фрагмент Европы с системой трещин, образующихся в ледяной коре

Нитевидные полосы на поверхности – это не что иное, как трещины в верхнем отвердевшем слое льда, возникающие под действием внутренних напряжений, создаваемых расширением и сжатием шуги. При образовании трещин может происходить оседание льда, его смещение, поднятие шуги на поверхность и ее замерзание. Заполнение трещин свежим рыхлым (а значит, и менее плотным) льдом легко объясняет возник-

новение белых полос на фоне грязноватой поверхности льда, а темные полосы, возможно, образуются там, где вместе со льдом на поверхность выходит темное вещество с большей глубины. Сопровождающие эти процессы смещения крупных массивов льда, типа движений ледников (глетчеров), должны приводить к стиранию неоднородностей рельефа, в частности, к исчезновению больших кратеров ударного происхождения, что и объясняет факт их отсутствия. Видимо, временная шкала этих процессов составляет от единиц до нескольких десятков миллионов лет, если принять во внимание число сохранившихся на отдельных участках поверхности кратеров небольших размеров.



Рис. 37. Ганимед

Еще старше поверхность Ганимеда (рис. 37), наибольшего среди галилеевых спутников, превышающего по своим размерам почти на 500 км Меркурий. Внешне этот спутник больше всего похож на Луну, однако при наблюдении с близкого расстояния обнаруживаются очень большие отличия.

Самым примечательным свойством его поверхности является множество ветвящихся «пучков» длинных параллельных борозд (желобов) и вытянутых хребтов, сосредоточенных в светлых областях (рис. 38

а, б). С ними соседствует много темных областей, сильно изрытых кратерами, сравнительно неглубокими, диаметром от единиц до нескольких десятков километров (рис. 39). В то же время на поверхности светлых областей кратеров значительно меньше (хотя и больше, чем, например, на лунных морях). Особенно выделяется крупная темная область на противоположной к Юпитеру стороне Ганимеда протяженностью свыше 3000 км. Она, вероятно, представляет собой пример наиболее древней коры, не закрытой более поздними отложениями, как это случилось со светлыми областями. В некоторых темных областях угадываются остатки старых больших котловин. С образованием одной из громадных древних котловин связаны хорошо различимые расходящиеся концентрические кольца, возникшие при ударе.

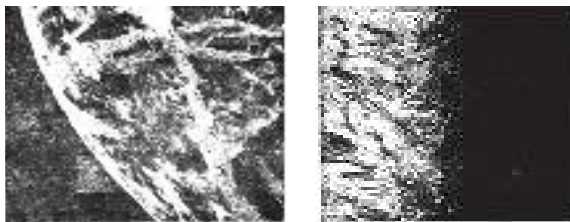


Рис. 38. а) поверхности Ганимеда с системой желобов; б) крупномасштабное изображение желобов на поверхности Ганимеда

Аналогичные кольцевые структуры еще более отчетливо видны в нескольких местах на Каллисто. Его поверхность во многом похожа на поверхность Ганимеда в темных областях. Такие области можно рассматривать как своего рода «окна» в самый ранний период эволюции галилеевых спутников. Обусловлено это тем, что количество кратеров диаметром несколько десятков километров на их поверхности аналогично их количеству на древних плоскогорьях планет земной группы и Луны.

Формирование же этих плоскогорий относят к завершающему периоду интенсивной бомбардировки планет около 4 млрд лет назад. Такое сопоставление допустимо при условии примерно одинакового хода этих процессов во внутренних и внешних областях Солнечной системы.

Морфология «пучков» параллельных борозд в светлых областях Ганимеда хорошо различима (рис. 39). Ширина этих «пучков» достигает нескольких сотен, а длина – нескольких тысяч километров, отдельные борозды имеют ширину от 5 до 15 км и глубину несколько сотен метров (последнее определено по величине отбрасываемой тени у терминатора). В областях наибольшего сосредоточения они разделяют всю поверхность на отдельные многоугольники размером в несколько сотен километров. Высказываются предположения, что такие ландшафты – результат наибольшей геологической активности этого спутника, когда кора была особенно подвижной и подвергалась различным тектоническим процессам, напоминавшим перемещения и деформации материковых платформ на Земле. При этом за счет горизонтальных сдвигов образовались складки с относительными смещениями и перпендикулярными ответвлениями, как это хорошо видно, например, в верхней части рис. 39, а также отдельные хребты, «выжатые» из возникавших трещин в коре. Эти образования моложе темных областей, о чем опять же можно судить по числу крате-

ров, плотность которых на этих участках поверхности приблизительно на порядок меньше. По своему возрасту они, вероятно, соответствуют морским районам на Луне.



Рис. 39. Фрагмент поверхности Ганимеда со «звездами» льда вокруг кратеров ударного происхождения; «звезды» свидетельствуют о ледяной коре спутника (снимок «Вояджера-1»)

Подобно Европе, поверхность Ганимеда покрыта льдом. Помимо сравнительно высокого альбедо и спектров отражения в ближней инфракрасной области, убедительным свидетельством существования поверхностного льда служат кратеры, образующиеся при ударе метеоритов (рис. 39). В отличие от лунных или марсианских, у них вогнутое дно, образующееся при быстром замерзании текучего, а не сыпучего материала. Крупный кратер в верхней части снимка имеет диаметр около 150 км, очень хорошо видна лучевая структура, наслаения выброшенного льда вокруг кратера, выбросы и обнажения «свежего» льда вдоль лучей. Отсутствие значительных вариаций высоты на поверхности (свыше 1 км) также свидетельствует в пользу представлений о ледяной поверхности этого спутника Юпитера.

Самым старым в семействе, обладающим наибольшей степенью насыщенности ударными кратерами не только среди галилеевых спутников, но вообще среди известных нам небесных тел, оказался спутник Каллисто (рис. 40). Плотность кратеров в ряде областей Каллисто, уступающего Ганимеду по своим размерам, видимо, достигла почти предельной величины, число только крупных кратеров достигает нескольких сотен, вокруг нескольких из них наблюдаются яркие лучи.

Два наиболее светлых участка в целом довольно темной поверхности Каллисто — это громадные котловины типа лунных морей с концентрическими кольцами, получившие название «бычий глаз». Размер наибольшей котловины на рис. 41 превышает 600 км, число колец — не менее 15, а диаметр самого внешнего кольца — около 2600 км. Эти образования также изрыты кратерами, однако плотность их убывает к центру котловины.



Рис. 40. Каллисто

Фактура поверхности у левого края снимка образована огромным числом буквально примыкающих друг к другу кратеров, а по направлению к правому краю значительная часть кратеров была разрушена смещением и напластованием поверхностного материала при образовании котловины. При этом не осталось сколько-нибудь заметного углубления на месте самой котловины, а также валов и хребтов на ее периферии, подобных тем, которые образовались на поверхностях Луны, Меркурия, Марса. Вместо них сохранились концентрические кольца, представляющие собой следы ударных волн. Подобные конфигурации не сохранились на небесных телах с силикатной корой. Эти обстоятельства явно указывают на то, что поверхность Каллисто сложена легкоплавким веществом, быстро заполнившим углубление и «заморозившим» процесс распространения колебаний. Да и в целом поверхность Каллисто достаточно гладкая, глубина кратеров небольшая. Все это позволяет предположить, что верхний слой Каллисто, подобно Ганимеду и Европе, также состоит из льда. Слабые признаки ледяного поглощения в спектрах Каллисто, как и очень низкое альbedo этого спутника (лишь вдвое большее, чем у Луны), можно объяснить тем, что поверхность состоит из «грязный» лед, возможно, с примесями силикатного вещества и к тому же покрытый слоем метеорной пыли. Первопричиной всего этого, очевидно, является отсутствие активных эндогенных процессов, что сохранило поверхность Каллисто в «первозданном» виде с момента завершения заключительного этапа интенсивной бомбардировки около 4 млрд лет назад, за исключением котловин, образовавшихся позднее.



Рис. 41. Фрагмент поверхности Каллисто с разрешением около 7 км.
Справа – котловина в обнажениях льда поперечником 600 км

Ближайшим собратом Каллисто с этой точки зрения является Амальтея. Открытая американским астрономом Э. Барнардом в 1892 г., т. е. почти три столетия спустя после открытия галилеевых спутников Юпитера, она выглядит как астероид с наибольшим и наименьшим размерами – 270·150 километров (рис. 42), что почти на порядок превышает размеры Фобоса.

Однако, по сравнению с галилеевыми спутниками, это тело очень маленькое, хотя оно и оказалось примерно вдвое больше, чем предполагалось по наземным наблюдениям. Объясняется это тем, что обнаружение Амальтеи, обращающейся по орбите на среднем расстоянии менее 200 тыс. км от яркого диска Юпитера, представляет для астрономов чрезвычайно трудную задачу.

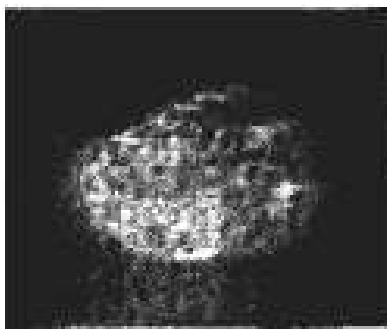


Рис. 42. Спутник Юпитера Амальтея, ее размеры 270·170·150 км. Своей неправильной формой и низкой отражательной способностью напоминает астероид; (снимок «Вояджера-1»)

Ее поверхность преимущественно красного и частично черного цвета, в целом очень темная (альбедо от 4 до 6%), сильно кратерированная. Ни по цвету, ни по отражательной способности она не похожа на поверхности галилеевых спутников. При сравнительно небольших размерах Амальтея обладает очень крупными кратерами правильной чашеобразной формы. Крупнейшие кратеры, названные Пан (диаметр 90 км, глубина 8–10 км) и Гея (диаметр 75 км, глубина 10–20 км), по-видимому, следует отнести к самым большим чашеобразным

кратерам в Солнечной системе. Почти такие же кратеры обнаружены на поверхности Фивы (рис. 43).

Интересно, что Амальтея в сильной степени испытывает на себе воздействие мощной магнитосферы Юпитера. Это проявляется в том, что ее поверхность неожиданно оказалась теплее, чем получалось при расчетах радиационного баланса. Таким дополнительным источником ее нагрева могут служить энергичные заряженные частицы и выделение джоулева тепла. Вряд ли приходится сомневаться в том, что, подобно спутникам Марса, это тело представляет собой захваченный астероид; значительно менее вероятно, что это реликт стадии формирования системы Юпитера.

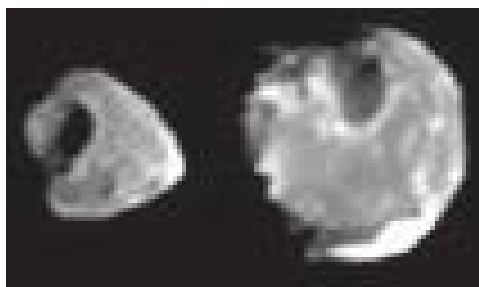


Рис. 43. Фива и Амальтея с крупными чашеобразными кратерами

4.3.4. Поверхности спутников Сатурна

Сатурн имеет 62 естественных спутника с подтвержденной орбитой, 53 из которых имеют собственные названия. Большая часть спутников имеет небольшие размеры и состоит из горных пород и льда, что подтверждает их главную особенность – высокую способность к отражению солнечного света. 23 спутника Сатурна – регулярные, остальные 38 – нерегулярные. Нерегулярные спутники были классифицированы по характеристикам своих орбит на три группы: инуитскую, норвежскую и гальскую.

Самый большой спутник – Титан, диаметр которого более 5 100 км, он является вторым по величине после Ганимеда спутником в Солнечной системе. Титан – единственный спутник, обладающий очень плотной атмосферой, в 1,5 раза плотнее земной и состоящей на 98% из азота, с умеренным содержанием метана. Ученые предполагают, что условия на этом спутнике Сатурна схожи с теми, которые существовали на нашей планете 4 миллиарда лет назад, когда на Земле только зарождалась жизнь.



Рис. 44. Система спутников Сатурна

Спутники Сатурна так же, как и Юпитера, образуют многочисленное семейство (табл. 2, приложение и рис. 44), отдельные члены которого находятся в динамическом взаимодействии друг с другом и с кольцами планеты. На поверхностях сравнительно крупных тел сферической формы запечатлены следы ряда геологических процессов.

Шесть вновь открытых спутников, в свою очередь, составили уникальную коллекцию небольших астероидоподобных тел неправильной формы с несколько различающимися свойствами поверхности.

Все крупные спутники Сатурна, исключая Титан и Фебу, имеют ледяные поверхности. Низкие средние плотности свидетельствуют о том, что эти тела почти целиком водно-ледяные; среди них несколько большее относительное содержание скальных пород у Мимаса, Дионы и Реи (рис. 45). Тем не менее на спутниках Сатурна обнаружены проявления эндогенной активности.

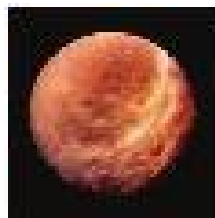
Самый яркий не только в семействе Сатурна, но, возможно, вообще в Солнечной системе – Энцелад (рис. 46), имеющий альбедо, близкое к 1 (как у свежеевыпавшего снега), с чем связан ряд его замечательных особенностей. Поперечник самых крупных кратеров не превышает 35 км. Значительная часть поверхности несет на себе следы активных тектонических процессов (хребты, разломы), свидетельствующих о возможно продолжающейся активности недр. Отсутствие кратеров на этих участках говорит о молодости коры спутника, возраст которой не превышает 100 млн лет.



Мимас



Диона



Рея

Рис. 45. Спутники Сатурна, с повышенным содержанием скальных пород

В то же время Феба имеет альбедо всего 0,05 и едва различима на темном фоне космического пространства (рис. 47).

Из всех крупных спутников Сатурна только Гиперион имеет неправильную форму (рис. 48), несмотря на свои большие размеры (460·260·220 км), сравнимые с размерами Энцелада и Мимаса. Высказывается предположение, что это остаток более массивного тела, разрушенного в результате катастрофического соударения с другим телом. Красноватый оттенок его поверхности в сочетании с довольно низким альбедо не исключает присутствия водяного



Рис. 46. Спутник Сатурна Энцелад. Разрешение на снимке около 2 км. Снимок «Вояджера-2»



Рис. 47. Феба

льда. Возможно, он целиком состоит из льда, но его поверхность сильно загрязнена темным материалом типа углистых хондритов, из которых предположительно сложена Феба.

Феба могла бы быть источником темного материала для Гипериона и Япета, чем можно было бы объяснить странную асимметрию в отражательных свойствах Япета. Ледяная поверхность этого спутника имеет своего рода темный нанос на полусфере, об-

ращенной в сторону движения по орбите, так что ее альbedo уменьшается на порядок (рис. 49). Предполагалось, что частицы, теряемые Фебой при бомбардировке ее метеоритами, должны по спирали постепенно дрейфовать внутрь системы Сатурна, попадая в зону орбит соседних с Фебой спутников, осаждаясь на передней их полусфере.

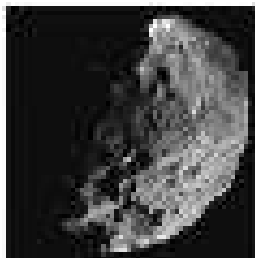


Рис. 48. Гиперион



Рис. 49. Япет

Однако спектральные характеристики материала поверхности Фебы и темного покрытия на Япете имеют существенные различия, т. е. их природа неодинакова. Кроме того, поверхность Япета на светлой стороне испещрена кратерами, дно которых имеет такое же темное покрытие (рис. 49). Поэтому как более вероятное рассматривают предположение о собственном внутреннем источнике темного материала на Япете вследствие геологической активности, которую, в частности, связывают с метановыми извержениями из его недр. Данная модель не дает объяснения причины преимущественного выноса глубинного материала только на одну половину этого спутника Сатурна.

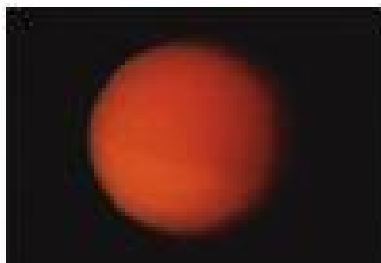


Рис. 50. Титан

Самый большой спутник Сатурна – Титан, один из величайших спутников в Солнечной системе – по размерам превосходит планету Меркурий. Титан состоит из равных количеств камня и водяного льда. Но самым замечательным представляется тот факт, что у Титана есть толстый слой атмосферы, с давлением у поверхности $\sim 1,6$ атм. и температурой 94 К,

что означает отсутствие парникового эффекта. На 90% атмосфера со-

стоит из азота и, вероятно, содержит также до 10% первичного аргона, относительное содержание метана всего около 1%, есть также немного аммиака, цианистый водород, этан, этилен и ацетилен. Облака и аэрозольная дымка, расположенная над ними, плотной пеленой закрывают поверхность Титана. Облака состоят целиком из капелек жидкого метана. Интересно, что при сопоставимых значениях поверхностного давления атмосфера Титана почти вдесятеро массивнее земной. Это объясняется различием ускорений силы тяжести на этих телах. В атмосфере Титана различают несколько слоев: 1) метановые облака вблизи поверхности; 2) аэрозоль – до высоты 200 км; 3) плотную дымку; 4) слой интенсивного поглощения в ультрафиолетовой области спектра. Плотная азотная атмосфера Титана сближает его с Землей, а метан мог играть на Титане ту же роль, что вода на Земле: находясь на поверхности в жидком состоянии, метан, испаряясь и вновь конденсируясь в атмосфере, образует облака, из которых выпадает метановый дождь. Такой круговорот метана должен был бы во многом определять своеобразие этого небесного тела, но эта красивая гипотеза не была подтверждена анализом измеренных высотных профилей температуры, так как не было обнаружено заметных отклонений от сухоадиабатического градиента в подоблачной атмосфере, а это означает, что никакой конденсации метана не происходит.

В рамках атмосферной модели достаточно реалистичным кажется представление о циклическом метановом обмене между поверхностью спутника и атмосферой. Значение температуры поверхности не противоречит гипотезе о существовании на ней обширных бассейнов жидкого метана или этана, в который легко превращается метан в результате фотохимических реакций. В этаново-метановом океане могут быть растворены другие компоненты атмосферы, в первую очередь – азот, а на дне могут накапливаться в виде осадков более тяжелые органические соединения, которые, по мнению некоторых исследователей, можно считать «замороженными» аналогами первичных органических комплексов на Земле. Однако все эти предположения могут получить подтверждение лишь с помощью прямого эксперимента.

У пяти крупных спутников внутри орбиты Титана есть много общего, но имеются и свои специфические черты. Рея по своему размеру близка к Япету (поперечник – 1500 км), в то время как Тефия и Диона имеют диаметры около 1000 км, а Мимас и Энцелад – всего 400–500 км. Вместе с тем на Рее, например, меньше признаков геологической активности,

чем на некоторых ее менее массивных компаньонах. Поверхности всех спутников, за исключением отдельных областей, густо усеяны кратерами, от самых мелких до 50 км и более. Но и плотность кратерирования, и распределение крупных и мелких кратеров даже на старых участках поверхностей неодинаковы. Это привело к предположению о том, что бомбардировка тел в системе Сатурна включала в себя два основных одновременных этапа:

- 1) очень древний, относящийся к периоду формирования планеты и ее спутников;
- 2) значительно более поздний, связанный либо с разрушением одного из ранее существовавших спутников и выпадением его осколков на другие тела, либо с интенсивным периодом кометной активности в районе орбиты Сатурна.



Рис. 51. Диона

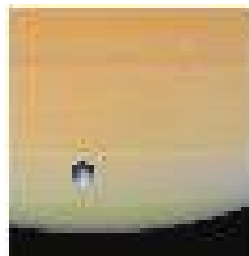


Рис. 52. Диона на фоне Сатурна

На рис. 51 показано полушарие Дионы, обращенное в сторону, обратную направлению движения по орбите. Оно более темное, чем противоположное, и на нем резко выделяются светлые полосы. По-видимому, это обнажения свежего льда, возникшие на сравнительно ранней стадии внутренней активности спутника и не замаскированные последующими отложениями. Один из возможных сценариев образования этих конфигураций включает в себя первичное образование желобов или трещин, по которым в дальнейшем в процессе дегазации недр на поверхность изливалась вода (возможно, вместе с метаном). Протяженные желоба, не заполненные свежим льдом, встречаются также на поверхности светлого полушария Дионы, как это хорошо видно на рис. 45.

Громадный желоб, или, скорее, разлом, получивший название Итака, протянулся почти на три четверти периметра Тефии (рис. 53). Его шири-

на около 100 км, а глубина достигает нескольких километров. В целом же поверхность Тефии древнее, поскольку она сильнее насыщена кратерами. Поперечник самого крупного кратера Одиссеи достигает размера Мимаса!

Мимас по плотности кратерирования можно сопоставить с Тефией, хотя кратеры на его поверхности в большей степени маскируются отложениями сравнительно мелкого материала (рис. 54). Этот факт можно объяснить, если учесть, что ускорение силы тяжести на Мимасе всего $6,4 \text{ см/с}^2$, поэтому осколки, образующиеся при соударении с ним метеоритов, могли легко покидать его поле тяготения, распределяясь вдоль орбиты. В дальнейшем они, вероятно, постепенно осаждались на поверхность, покрывая ее более равномерно, чем в случае локальных выбросов на более массивных телах.

Самым впечатляющим образованием на Мимасе, конечно, является кратер Артур диаметром 130 км, что равно трети размера самого спутника (рис. 45). Его глубина почти 10 км, высота центральной горки 6 км, а гребень вала, возникшего при ударе, выходит за контуры сферической формы спутника. Обусловлено это, очевидно, тем, что кратер образовался

в период, когда Мимас уже потерял свою первоначальную пластичность. Поэтому силы тяжести не хватило для того, чтобы, в отличие от кратера Одиссей на Тефии, очертания Артура стали более сглаженными, не создающими отклонения спутника от сферы. Вероятно, образовавший этот кратер метеорит по своим размерам (около 10 км) был предельным; от соударения с более крупным телом Мимас развалился бы на части. С этим событием, возможно, связаны желоба или

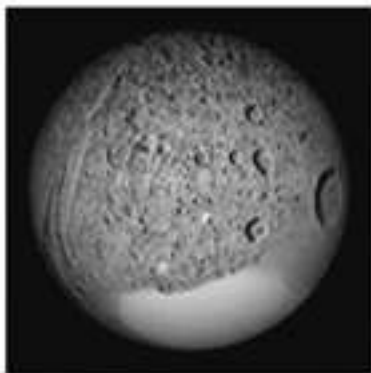


Рис. 53. Тефия

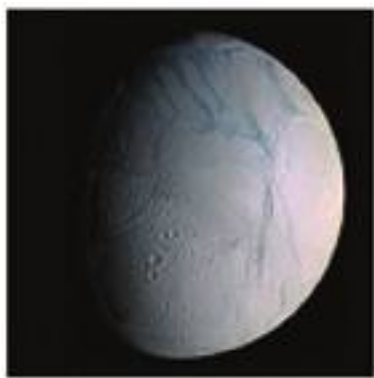


Рис. 54. Энцелад

трещины на поверхности длиной около сотни, шириной примерно десять и глубиной до двух километров. Другой причиной могут быть древние тектонические процессы.

Мимас и Энцелад – близнецы, но Энцелад гораздо активнее, более того, он самый активный из всех спутников Сатурна. На его поверхности есть области с ярко выраженными следами тектонических процессов. В этом смысле Энцелад является аналогом Ио. Возраст кратеров на его поверхности не превышает несколько десятков миллионов лет, что в геологическом масштабе считается ничтожным возрастом. Деформации коры связывают с движениями в пластичной или даже жидкой мантии. Возможно, что и на этом спутнике еще совсем недавно действовали, или даже продолжают действовать, своеобразные вулканы – извержения жидкой воды из недр. Многочисленные хребты и извилистые желоба на лишенных кратеров участках говорят о возможных излияниях больших масс воды на поверхность.



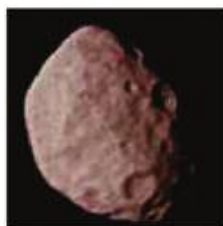
Эпимет



Прометей



Елена



Янус

Рис. 55. Малые внутренние спутники

Своеобразие вновь открытых маленьких спутников Сатурна состоит не столько в свойствах поверхностей, сколько в динамических особенностях орбит, иллюстрирующих ряд небесно-механических закономерностей.

стей. Все малые спутники, как и Гиперион, неправильной формы с хорошо заметными следами кратерирования на их поверхностях (рис. 55). По своему составу они, по-видимому, являются ледяными и представляют собой осколки более крупных тел, разрушенных при соударениях на ранних этапах формирования системы Сатурна. Часть их, вероятно, генетически связана с еще более мелкими фрагментами, из которых образованы кольца Сатурна.

4.3.5. Спутники Урана

Известно 27 естественных спутников Урана. Все они получили названия в честь персонажей из произведений Уильяма Шекспира и Александра Поупа. Титанию и Оберон в 1787 году открыл Уильям Гершель. Ариэль и Умбриэль были открыты в 1851 году Уильямом Ласселом. В 1948 Джерард Койпер открыл Миранду. Остальные спутники были открыты после 1985 года, во время миссии «Вояджера-2», или с помощью усовершенствованных наземных телескопов.

Внутренние спутники – это небольшие, темные объекты (альбедо не превышает 10%), имеющие сходные характеристики и происхождение с кольцами планеты. Их орбиты лежат за внутренней стороной орбиты Миранды. Все внутренние луны глубоко связаны с кольцами Урана, которые, возможно, представляют из себя результат распада одной или нескольких маленьких внутренних лун.

Две самые внутренние луны (Корделия и Офелия) служат кольцу «пастухами», а небольшая луна Маб, возможно, источник наиболее удаленного кольца μ . Пак кружит на орбите между Пердитой и Мабом, и, возможно, представляет собой нечто вроде переходного объекта между внутренними лунами и крупными спутниками Урана.



Рис. 56. Сравнительные размеры шести самых известных спутников Урана. Слева направо: Пак, Миранда, Ариэль, Умбриэль, Титания и Оберон

Расчеты показывают, что внутренние спутники выступают в роли возмущающих факторов друг для друга в случае, если их орбиты пересекаются; в конечном счете это может привести к столкновениям между ними. Дездемона может столкнуться с Крессидой или Джульеттой в следующие 100 миллионов лет.

Все крупные спутники Урана – Миранда, Ариэль, Умбриэль, Титания, и Оберон – состоят наполовину из льда и горных пород, за исключением Миранды, состоящей преимущественно из льда. Составляющими льда могут являться аммиак и углекислый газ.

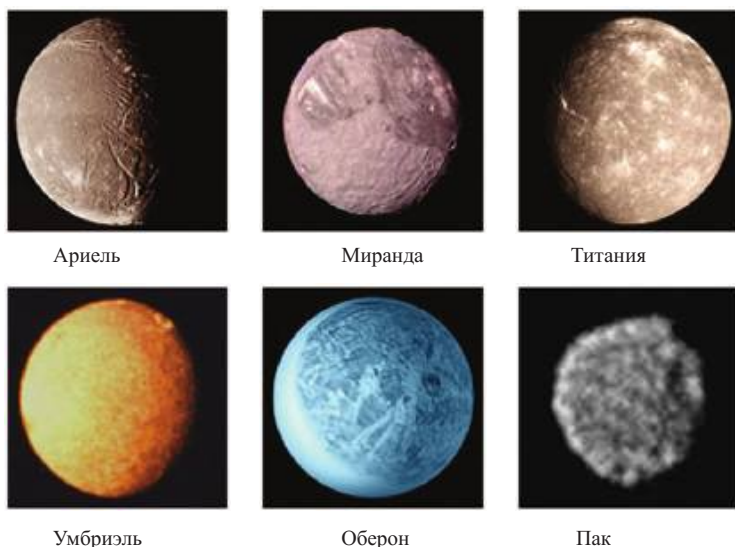


Рис. 57. Крупные спутники Урана

Их поверхность испещрена кратерами, но все они (за исключением Умбриеля) демонстрируют признаки «обновления» поверхности, выражающиеся в форме образования каньонов и, в случае с Мирандой, яйцевидными, похожими на гоночные треки, структурами, называемыми коронами. За образование «корон» ответственны резкие поднятия диапиров. Поверхность Ариэля, возможно, самая молодая, с наименьшим количеством кратеров. Поверхность Умбриэля же кажется самой старой.

Имевшие место в прошлом резонансы 3:1 между Мирандой и Умбриэлем и 4:1 между Ариэлем и Титанией ответственны за нагревание, кото-

рое вызвало существенную эндогенную активность на Миранде и Ариэле. К такому выводу приводит наличие у Миранды высокого орбитального наклонения, не свойственного для столь близкого к планете тела. Крупнейшие спутники Урана состоят из ядра из горных пород в центре и ледяного покрова снаружи. Титания и Оберон могут иметь океан из жидкой воды на границе ядра/мантии. Нерегулярные спутники Урана имеют эллиптические и сильно наклоненные (в большинстве своем ретроградные) орбиты на большом расстоянии от планеты.

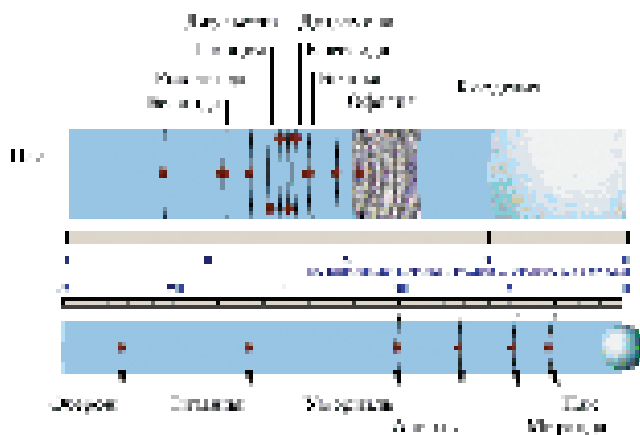


Рис. 58. Система спутников Урана

До 1997 г. система Урана казалась самой упорядоченной (рис. 58). Не было известно ни одного нерегулярного спутника. Сейчас их открыто восемь на расстояниях от 4 до 20 млн км. Первые два внешних спутника Урана Калибан и Сикоракса были открыты в 1997 г. в Паломарской обсерватории. В 1999 г. стало известно о существовании трех далеких спутников Урана – Просперо, Сетевос, Стефано. В 2001 г. открыты еще три далеких спутника – Тринкуло, S/2001 U2 и U3. Все внешние спутники Урана движутся по вытянутым, сильно наклоненным орбитам с обратным движением. Кроме того, орбиты спутников пересекаются друг с другом, и существует вероятность близкого взаимного прохождения. В 2003 г. интересные открытия в области внутренних спутников Урана были совершены с помощью телескопа Хаббла. Один спутник S/2003 U1 диаметром

16 км был открыт между орбитами Пака и Миранды на расстоянии 97700 км от центра Урана. Второй спутник S/2003 U2 (12 км) находится внутри орбиты Белинды на расстоянии 74800 км от центра планеты. Также с помощью телескопа Хаббла произошло переоткрытие спутника S/1986 U10 (40 км), впервые обнаруженного в 1999 г. по фотографиям, полученным космическим аппаратом «Вояджер» в 1986 г., то есть через 13 лет после получения снимков. Его расстояние от Урана составляет в среднем 76400 км. Третий спутник S/2003 U3 (11 км), открытый в 2003 г., принадлежит к внешним спутникам, находится на расстоянии 14 млн км от Урана и единственный из далеких спутников движется в прямом направлении.

4.3.6. Спутники Нептуна

В настоящее время известно 13 естественных спутников Нептуна, их можно разделить на три явно выраженные группы. Первая – это внутренние спутники: Наяда, Таласса, Деспина, Галатея, Ларисса, Протеус, вторая – Тритон и Нереида, и третья – 5 внешних спутников S/2002 N1, S/2002 N2, S/2002 N3, S/2002 N4, S/2003 N1.

Все внутренние спутники Нептуна – темные (альbedo менее 10%) глыбы неправильной формы размером 100–200 км, вращающиеся в прямом направлении по круговым орбитам практически в плоскости экватора Нептуна. Пять из них имеют периоды обращения меньше периода вращения планеты, и поэтому на непунианском небе восходят на западе и заходят на востоке; это также означает, что из-за гравитационного трения они рано или поздно упадут на Нептун.



Рис. 59. Протей

Самый крупный из этих спутников Протей имеет неправильную форму, средний диаметр около 420 км, один оборот делает за 1,12 суток (рис. 59). Он темнее Нереиды и отражает всего 6% падающего света. Протей имеет серый цвет; на его поверхности видны кратероподобные образования и трещины. Спутник Ларисса – темный объект неправильной формы, размером 210·180 км, отражающий 5% света. На его поверхности несколько кратеров размерами 30–50 км. Неправильная

форма Протея и Лариссы указывает на то, что на протяжении всей своей истории они оставались холодными глыбами льда. Галатея и Деспина находятся в области колец и, возможно, являются источником материала, пополняющего кольца.

Тритон – самый крупный спутник Нептуна и один из крупнейших спутников в Солнечной системе (рис. 60). Его диаметр составляет 2707 км, по размерам он больше Плутона. Он вращается вокруг Нептуна в обратном направлении по круговой орбите, наклоненной к экватору планеты на 23 градуса, и делает один оборот примерно за 6 дней. Совершенно очевидно, что Тритон не мог образоваться вместе с Нептуном из протопланетного облака и, вероятнее всего, является телом, захваченным из пояса Койпера. Под действием приливных сил он медленно приближается к планете и, в конце концов, упадет на Нептун или будет разорван приливными силами в яркое кольцо. Поверхность Тритона очень холодная (температура поверхности 37 К), яркая (альбедо 76%) и в геологическом смысле молодая (т. е. почти лишенная ударных кратеров). Тритон покрыт азотным инеем и имеет разреженную атмосферу.

Подобно Земле, Тритон имеет азотную атмосферу, а состоит он на семь десятых из твердой породы и на три десятых из воды. Вблизи южного полюса Тритона «Вояджер-2» сделал снимки красного льда, а на экваторе он сфотографировал голубой лед из замершего метана. На Тритоне имеются громадные скалы, изрезанные водяным льдом, а также бесчисленное количество кратеров. Нептун изменяет направление движения комет, попадающих в Солнечную систему извне. Возможно, некоторые из них сталкивались с Тритоном, и в результате этих соударений возникли его кратеры. На Тритоне есть темные полосы вулканического происхождения. Ученые полагают, что лед, состоящий из замерзшей воды, метана и азота, был извергнут из глубин Тритона через вулканы.

Нереида – еще один реликт давнего катастрофического события в системе Нептуна, когда был захвачен Тритон и потеряны спутники, вра-

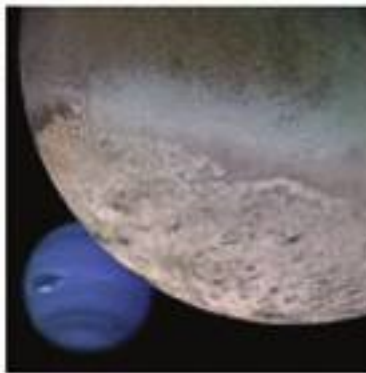


Рис. 60. Тритон на фоне Нептуна

щавшиеся на расстоянии нескольких сотен тысяч километров от планеты. Эксцентриситет ее орбиты превышает 0,75, это самый высокий эксцентриситет у планет и спутников в Солнечной системе. Она облетает Нептун за 360 суток – всего на 5 дней меньше земного года! Ее альbedo выше, чем альbedo внутренних спутников, но значительно меньше альbedo Тритона.

Пять еще безымянных спутников вращаются на самом краю системы Нептуна на расстоянии в десятки миллионов километров от планеты. Судя по эксцентричным орбитам, сильному наклону к плоскости экватора и (у самых дальних спутников) обратному движению, эти небольшие темные глыбы являются захваченными объектами пояса Койпера аналогично внешним спутникам Юпитера. Самый удаленный из них делает один оборот вокруг Нептуна за 25 лет.

4.3.7. Кольца планет

К характерным реликтам стадии формирования в семействе спутников относятся кольца планет, которые обнаружены к настоящему времени у всех планет-гигантов, кроме Нептуна. Однако открытие знаменитых колец Сатурна Г. Галилеем в 1610 г. и колец Юпитера и Урана уже в наши дни разделяет период свыше 350 лет. К тому же следует вспомнить, что Галилей думал, что наблюдает спутники планеты, и лишь знаменитый нидерландский физик Х. Гюйгенс (открывший в 1655 г. крупнейший спутник Сатурна Титан) описал их 50 лет спустя как кольца. Прошло еще около 200 лет, прежде чем в результате теоретических исследований выдающегося ученого XIX столетия английского физика Дж. Максвелла было доказано, что это не сплошные твердые или жидкие образования вокруг планеты, а совокупность отдельных небольших тел или частиц. Иначе они были бы разрушены гравитационными возмущениями, поскольку сплошное образование противоречит условию устойчивости кольца на относительно небольшом расстоянии от планеты. Этот вывод был вскоре экспериментально подтвержден русским астрономом А. А. Белопольским, который первым указал на дифференциальное вращение колец, а также независимо проводившимися наблюдениями в американских и французских обсерваториях. Было установлено, что внутренняя часть системы колец обладает большей скоростью вращения, чем внешние, что соответствует требуемому различию в значениях первой космической

(круговой) скорости, которая обратно пропорциональна $r^{1/2}$, где r – расстояние спутника от планеты.

Кольцо Юпитера было открыто в 1979 г. при пролете «Вояджеров» (рис. 59). Правда предположение о его существовании было высказано в 1960 г. советским астрономом С. К. Всехсвятским, а в 1976 г. на такую возможность более определенно указали американские физики М. Экуна и Н. Несс, которые проанализировали характер распределения вблизи Юпитера заряженных частиц, измерявшихся космическим аппаратом «Пионер-11». Как и все его спутники, кольцо Юпитера расположено в экваториальной плоскости на расстоянии 55 000 км от видимой верхней границы облаков, что составляет около $3/4$ радиуса планеты и примерно вдвое меньше расстояния до Амальтеи. Ширина кольца 6000 км, а толщина около 1 км. К тому же оно образовано очень темными частицами, поэтому его блеск на 11 звездных величин (т. е. более чем в 10 тысяч раз) слабее по сравнению, например, с кольцами Сатурна. Естественно, его исключительно трудно наблюдать с Земли, и лишь вскоре после открытия это удалось сделать астрономам обсерватории Мауна-Кеа, использовавшим телескоп с зеркалом диаметром 224 см и чувствительный приемник излучения в ближней инфракрасной области спектра (на длине волны 2,2 мкм).



Рис. 61. Кольца Юпитера (схема)

Природа частиц кольца неизвестна, однако можно предполагать, что по своему составу они не сильно отличаются от вещества, слагающего Амальтею. Размеры частиц оцениваются в пределах от нескольких микрометров до нескольких метров. На присутствие мелких частиц определенно указывает, в частности, наибольшая яркость кольца при наблюдении с

антисолнечной стороны, из конуса тени, при затмении Юпитером Солнца (рис. 61). Дело в том, что при освещении мелких частиц (~10 мкм) максимальная яркость создается в направлении, противоположном направлению на источник (индикатриса рассеяния сильно вытянута вперед). Это и объясняет столь четкое выделение кольца на темном фоне космоса. По-видимому, кольцо представляет собой несформировавшийся спутник на ближайшем расстоянии от Юпитера, в пределах которого вследствие разрушающего действия приливных сил существование спутника теоретически невозможно. Если бы такой спутник образовался, то по своим размерам он оказался бы приблизительно вдвое больше Амальтеи, как показали оценки общего содержания частиц в кольце. Этому ограничению не противоречит обнаружение 14-го спутника Юпитера поперечником 30–40 км, представляющего собой астероидоподобное тело, орбита которого лежит у внешнего края кольца, т.е. на расстоянии 1,8 радиуса Юпитера.

Как показал еще в 40-х годах нашего столетия известный английский астроном и геофизик Г. Джеффрис, необходимые для разрушения твердого спутника внутренние напряжения могут возникнуть лишь при достаточно больших его размерах. Например, катастрофическим оказалось бы сильное сближение с Юпитером тела диаметром свыше 500 км.

В отличие от кольца Юпитера знаменитые **кольца Сатурна** хорошо наблюдаются с Земли благодаря тому, что образующие их частицы обладают высоким альбедо в видимой области спектра, а сами кольца значительно более протяженные. Угол между плоскостью колец и направлением на Землю изменяется в пределах от 0° до 28°, поэтому земной наблюдатель видит их под разными углами (говорят о различном «раскрытии» колец). Одновременно с этим меняется и блеск Сатурна. Выделяются три основных кольца (рис. 62): А (внешнее), В (среднее) и С (внутреннее). Среди них самое яркое – кольцо В, а кольцо С очень слабое, трудно наблюдаемое; из-за низкой яркости его иногда называют креповым. Позднее было сообщено о существовании еще двух очень слабых колец: одного внутри кольца С и другого за кольцом А, которым Международный астрономический союз присвоил обозначения соответственно D и E. Кольцо D не было, однако, вначале обнаружено при пролете около Сатурна «Пионера-11», но те же измерения подтвердили наличие повышенной плотности частиц за пределами кольца А; ближайшая к нему зона была названа кольцом F.

Частицы колец в основном состоят из водяного, а не аммиачного (как раньше предполагалось) льда. Это особенно отчетливо выявилось по результатам отождествления с лабораторными спектрами данных измерений на длине волны 2,25 мкм. Исследования вариаций яркости в зависимости от фазового угла привели к выводу о наличии как очень мелких пылевых частиц, так и частиц с эффективными размерами от единиц до десятков сантиметров. По своим оптическим свойствам эти частицы отличаются от частиц кольца Юпитера, рассеивая падающий на них свет преимущественно назад, или, как говорят, в заднюю полусферу.

Наиболее яркое кольцо В представляет собой монослой глыб размером порядка 15 метров, который «погружен» в более толстый слой частиц размером около 10 см. В то же время в рассеянии света наиболее эффективна фракция значительно более мелких частиц, очевидно, образующихся в результате столкновения и дробления крупных глыб. Эти процессы должны компенсировать выметание пыли вследствие радиационного торможения, обусловленного эффектом Пойнтинга – Робертсона. Соотношение популяций и их плотность в кольцах различна, и это объясняет большие различия в оптической толщине.

Высококачественные изображения колец, переданные «Вояджерами» (рис. 63, 64) и дополненные другими измерениями, существенно прояснили многие вопросы общей морфологии внутренней структуры и природы колец, представив всю эту систему как чрезвычайно динамичное образование, чем обусловлен ряд его интереснейших особенностей.

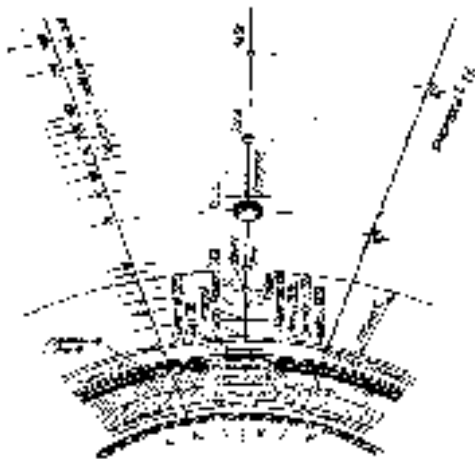


Рис. 62. Схема расположения колец и спутников Сатурна. Расстояния от центра планеты указаны в радиусах Сатурна R_e и в километрах. Буквой S с номерами обозначены недавно открытые спутники

Прежде всего было уточнено пространственное расположение всех колец (рис. 62), включая самое близкое к планете слабое кольцо D, находящееся всего в 7000 км от границы облачного слоя. За очень узким кольцом F находятся еще более слабые кольца G и самое внешнее – E, оптическая толщина которых не превышает всего 10^{-5} - 10^{-6} . Кольцо E занимает огромную зону от трех до восьми радиусов Сатурна. В центре этой зоны проходит орбита Энцелада. Видимо, кольцо и спутник как-то связаны друг с другом; не исключено, что происхождение частиц кольца E обусловлено вулканическими извержениями на Энцеладе. Сами кольца E и G достаточно однородные, внутри них не наблюдается каких-либо деталей. В отличие от них основные кольца A, B и C обладают чрезвычайно сложной внутренней структурой. Оказалось, что каждое из основных колец состоит из тысяч (а возможно десятков тысяч) отдельных узких колечек, образованных частицами, движущимися по своим орбитам (рис. 63).

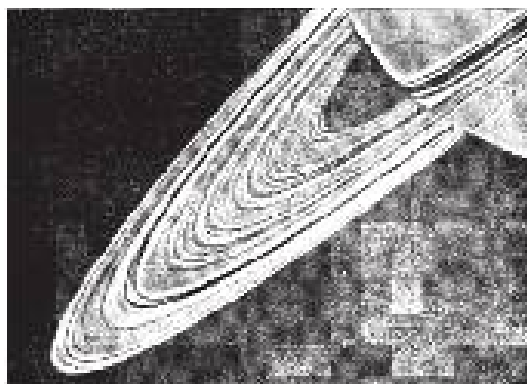


Рис. 63. Кольца Сатурна, состоящие из большого числа (не менее 100) индивидуальных колечек (снимки «Вояджера-1» с расстояния 5 млн км)

Некоторые из этих орбит заметно отличаются от круговых. Объясняется это тем, что сильнее, чем предполагалось, проявляются резонансные явления из-за взаимодействия частиц не только с крупными, но и с малыми спутниками Сатурна, находящимися вблизи колец. Ширина колечек не превышает нескольких десятков, а скорее единиц километров. Между ними, однако, тоже находятся частицы, просто их существенно меньше. Всю эту сложную конфигурацию можно объяснить, предполагая периодические воздействия приливных возмущений на материал колец. В ре-

зультате возникают волны плотности, распространяющиеся по спирали в радиальном направлении. Другими словами, кольца представляют собой динамическую систему, находящуюся в резонансе, которую по виду можно уподобить дорожкам на граммофонной пластинке. Подкачка энергии, поддерживающей состояние резонанса, происходит, вероятно, как за счет спутников, так и за счет фигуры самого Сатурна (ее некоторого отклонения от равновесной), что может быть связано с динамическими процессами в его недрах. К таким процессам американский ученый Р. Смолуховский относит, например, дрейф гелия в глубину и его фазовые изменения при взаимодействии с металлическим водородом.

Большим событием стало открытие в 1977 г. по изменению блеска слабой звезды, при ее покрытии Ураном, наличия колец и у этой планеты. Подобно кольцу Юпитера, отражательная способность **колец Урана** очень слабая (альбедо менее 5%), поэтому, чтобы их наблюдать, требуются совершенные астрономические инструменты и высокое мастерство. Вначале было выделено пять колец, получивших обозначения α , β , γ , δ , ϵ в направлении удаления от центра планеты. Радиус наружной границы составляет около 2,2 радиуса Урана. В 1978 г. было открыто еще четыре кольца, более слабых, чем остальные: η между α и γ и три кольца, лежащие внутри α и обозначенные номерами 6, 5, 4. Таким образом, всего у Урана сейчас известно девять колец.

Интереснейшим свойством колец Урана оказалось то, что их ширина, возможно, переменна, т. е. у них есть заметный эксцентриситет. Предпринимались попытки объяснить необычную структуру колец Урана существованием у него шестого спутника, находящегося на расстоянии 68000 км (2,68 R_U) от центра. Однако обнаружить его не удалось.

О природе частиц колец есть лишь предположения, что образующие их темные частицы, скорее всего, являются не ледяными, а возможно — облаками газа. Но такие облака должны быстро рассеиваться в пространство, если нет какого-то постоянного источника поступления газа, чтобы компенсировать это рассеяние.

У Нептуна известно 5 колец: два ярких и три более слабых. Самое внешнее и яркое называется кольцом Адамса, оно расположено на расстоянии 63 тыс. км от центра Нептуна, его ширина всего около 50 км. Яркость этого кольца неравномерна: на тонком «ободке» лежат три яркие дуги протяженностью от 1000 до 10000 км, называемые «Свобода», «Равенство» и «Братство».

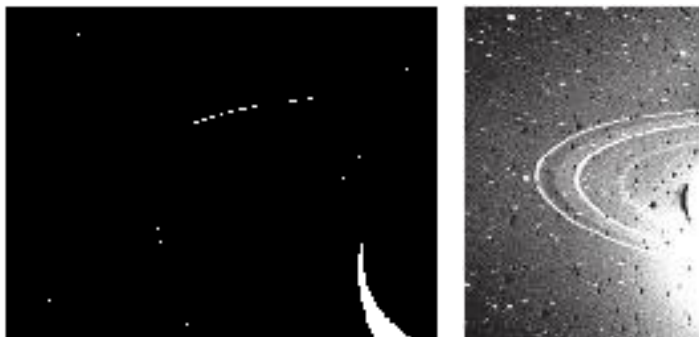


Рис. 64. Кольца Нептуна

На расстоянии 53 тыс. км от центра Нептуна лежит кольцо Леверье шириной около 100 км, еще ближе (на расстоянии 42 тыс. км) – размытое кольцо Галле. Еще одно слабое безымянное кольцо шириной около 500 км проходит по орбите Галатеи и, возможно, состоит из вещества, выбитого из ее поверхности.

Альbedo всех колец очень низкое (меньше 10%). Кольца не отражают радиоволны и выглядят значительно ярче в рассеянном, нежели в отраженном свете, а значит, состоят преимущественно из мелких пылевых частиц.

4.4. Астероиды

Астероиды – малые планеты. Это глыбы неправильной формы (шаровой, сигарообразной, напоминающей картофелину и т. д.), которые, вероятно, образовались в результате дробления при столкновении более крупных тел. Астероиды имеют большие различия в составе поверхности, что подтверждается их отражательной способностью: у одних астероидов коэффициент отражения лишь 3% (как у свежеспаханного чернозема), у других – около 50% (как у меловых отложений). Астероиды лишены атмосферы. Все астероиды вращаются вокруг оси, их периоды вращения составляют от нескольких часов до нескольких суток.

Размеры астероидов колеблются от сотен километров (Церера – 960 км, Паллада – 550 км, Веста – 530 км, Хигея – 380 км, Психея – 240 км и др.) до нескольких метров (1991 ВА – 9 м, 99942 Апофиз – 320 м и т. д.).

Для сравнения можно указать, что диаметр Меркурия (4878 км) в 5 раз превосходит поперечник Цереры, а массы их различаются в десятки сотен раз. Их плотности варьируют в пределах 2–8 г/см³.

Полагают, что насчитывается до полумиллиона астероидов с диаметром более полутора километров. Однако общая масса всех астероидов меньше одной тысячной массы Земли. Большинство орбит астероидов сконцентрировано в поясе астероидов между орбитами Марса и Юпитера на расстояниях от 2,0 до 3,3 а. е. от Солнца. Их движение вокруг Солнца происходит по эллиптическим орбитам, более вытянутым (средний эксцентриситет орбит у них 0,51), чем у больших планет, и наклон орбитальных плоскостей к эклиптике тоже больше, чем у больших планет (средний угол 9,54°).

Внутри пояса имеются как области концентрации орбит, которые соответствуют группам и семействам астероидов, так и области, в которых астероидов практически нет (пробелы Кирквуда). Пропорции различных типов астероидов в различных частях пояса заметно меняются. На внутреннем краю 60% астероидов составляют кремнистые, а 10% – углистые; на внешнем крае ситуация другая – 80% углистых и только 15% кремнистых. Пояс астероидов разделяет внутреннюю и внешнюю части Солнечной системы.

Пробелы Кирквуда – ненаселенные области в радиальном распределении астероидов, возникающие из-за соизмеримости и резонансов их периодов обращения с периодом обращения Юпитера. В распределении астероидов имеются заметные пустоты, соответствующие отношениям периодов 4:1, 3:1, 5:2, 7:3 и 2:1. Любые астероиды, находившиеся ранее на таких орбитах, подверглись бы регулярным возмущениям из-за гравитационного взаимодействия с Юпитером. Объяснение этого факта было дано Д. Кирквудом в 1857 г. Однако на расстояниях больше 3 а. е. от Солнца подобные резонансы (в отношениях 3:2, 4:3 и 1:1) соответствуют уже не пустым промежуткам, а изолированным группам астероидов. Причины этого до сих пор полностью не поняты.

Одной из наиболее распространенных гипотез происхождения тел пояса астероидов является представление о разрушении мифической планеты Фэтон. Сама по себе идея о существовании планеты поддерживается многими учеными, и даже как будто подкреплена математическими расчетами. Однако необъяснимой остается причина разрушения этой планеты. Одни исследователи считают, что разрушение Фэтона произошло

вследствие столкновения его с каким-то крупным телом. По мнению других, причинами распада планеты были взрывные процессы в ее недрах.

Астероиды встречаются не только между орбитами Марса и Юпитера. Ближе к Солнцу располагаются орбиты группы Амура, группы Аполлона и группы Атена. Кроме того, имеются и более далекие группы типа центавров. На орбите Юпитера находятся «троянцы», которых открыто уже более 1560 (первый открыт в 1906 году). 21 августа 2001 года был открыт маленький астероид 2001 QR322 на орбите Нептуна. Через год стало ясно, что это первый «троянец» газового гиганта.

Астероиды могут быть классифицированы по спектру отраженного солнечного света: 75% из них очень темные углистые астероиды типа С, 15% – сероватые кремнистые астероиды типа S, а оставшиеся 10% включают астероиды типа М (металлические) и ряд других редких типов. Классы астероидов связаны с известными типами метеоритов. Имеется много доказательств, что астероиды и метеориты имеют сходный состав, так что астероиды могут быть теми телами, из которых образуются метеориты. Самые темные астероиды отражают 3–4% падающего на них солнечного света, а самые яркие – до 40%. Многие астероиды регулярно меняют яркость при вращении.

Самые маленькие астероиды вращаются наиболее быстро и очень сильно различаются по форме. Космический аппарат «Галилео» при полете к Юпитеру прошел мимо двух астероидов Гаспра (29 октября 1991 г.) и Ида (28 августа 1993 г.). Полученные детальные изображения позволили увидеть их твердую поверхность, изъеденную многочисленными кратерами, а также то, что Ида имеет небольшой спутник. В последующие годы спутники были открыты у многих астероидов.

Среди малых планет выделяется своеобразная группа тел, орбиты которых пересекаются с орбитой Земли, а, следовательно, имеется потенциальная возможность столкновения с ними. Впервые о существовании так называемых Apollo стало известно с 30-х годов предыдущего столетия. В 1932 г. был обнаружен первый астероид Apollo 1932 HA. Но он не возбуждал особого интереса, хотя его название стало нарицательным для всех астероидов, пересекающих земную орбиту.

В 1937 г. космическое тело с поперечником приблизительно в 1 км прошло в 800 тыс. км от Земли и в двукратном расстоянии от Луны. Впоследствии его называли Гермес. На сегодняшний день выявлено 31 такое тело, и каждое из них получило собственное название. Размеры их по-

перечников колеблются от 1 до 8 км, а наклон орбитальных плоскостей к эклиптике находится в пределах от 1 до 68°. Пять из них вращаются на орбитах между Землей и Марсом, а остальные 26 – между Марсом и Юпитером. Полагают, что из 40 тыс. малых планет астероидного пояса с поперечником более 1 км может оказаться несколько сот Apollo. Поэтому столкновение таких небесных тел с Землей вполне вероятно, но через весьма длительные интервалы времени.

Можно полагать, что раз в столетие одно из таких космических тел может пройти вблизи Земли на расстоянии меньше, чем от нас до Луны, а раз за 250 тыс. лет может произойти столкновение его с нашей планетой. Удар такого тела выделяет энергию, приблизительно равную 10 тыс. водородных бомб, каждая мощностью 10 Мт. При этом должен образоваться кратер диаметром около 20 км. Но такие случаи человечеству неизвестны. Гермес относится к астероидам III класса, а ведь много аналогичных тел и более крупного размера – II и I классов. Удар при столкновении их с Землей, естественно, будет еще более значительным.

В 1951 г. голландско-американский ученый в области планетологии Герард Койпер предсказал существование пояса небольших ледяных тел, по размерам близких к астероидам, занимающих кольцеобразную область в плоскости Солнечной системы, простирающуюся от орбиты Нептуна (30 а. е. от Солнца) до расстояний, возможно, в 100 или даже 150 а. е., основываясь на теории происхождения планетарных систем. Однако ирландский теоретик Кеннет Эджворт выдвигал подобные аргументы еще в 1943 и 1949 гг. С учетом этого обстоятельства пояс иногда называют поясом Койпера–Эджворта (рис. 65).

Население пояса Койпера очень разнообразно. Члены его описываются как «объекты пояса Койпера», «транснептунианские объекты» (Trans Neptunian Objects, TNO) или просто как «ледяные карлики». По некоторым предположениям пояс является источником короткопериодических комет. Первый объект, входящий в пояс Койпера, был открыт 30 августа 1992 года на расстоянии около 50 а. е. от Солнца, находящегося на квазикруговой орбите. В дальнейшем количество малых планет, расположенных за пределами орбиты Нептуна, стало быстро увеличиваться.

Общее число объектов в поясе Койпера оценивается в десятки и сотни тысяч. Предполагается, что Плутон один из самых больших членов пояса Койпера. В отличие от спутников планет-гигантов, у Плутона отождествлены спектральные признаки метанового конденсата. Этот факт служит

довольно сильным аргументом в пользу наличия метана. Обнаружение метанового льда на Плутоне меняет существовавшие до недавнего времени представления о его поверхности, образованной скальными породами, в сторону более реальных предположений о покрывающем ее протяженном ледяном слое.

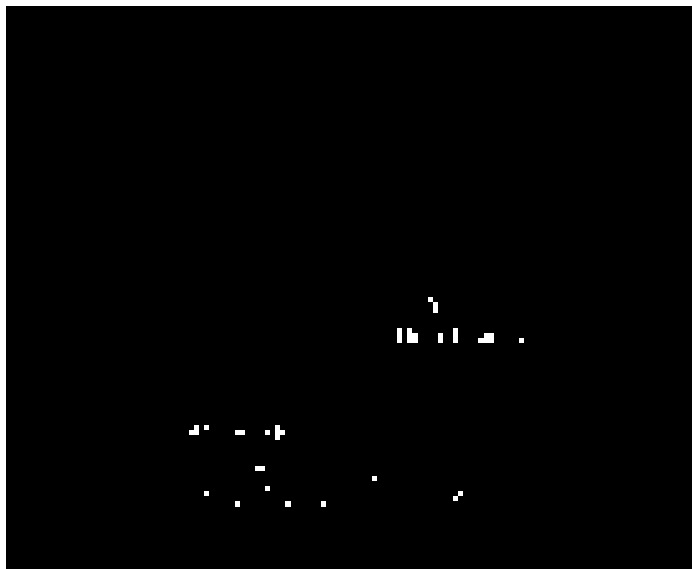


Рис. 65. Пояс Койпера–Эджворта

Исследование процесса формирования спутников у объектов пояса Койпера (КВО, Kuiper Belt Object), число которых уже составляет более 500, показало, что во многих случаях спутники КВО по своим размерам вполне сравнимы с центральным объектом. Стандартная модель формирования крупных спутников (двойные системы) предполагает, что они образуются в результате столкновения родительского объекта с крупным объектом. Подобная модель позволяет удовлетворительно объяснить формирование двойных астероидов, системы Плутон–Харон, а также может быть непосредственно применена к объяснению процесса формирования системы Земля–Луна.

В 2000 году астрономы открыли очередную комету, получившую обозначение 2000 CR105, размером более 400 км, имеющую сильно вытяну-

тую эллиптическую орбиту и являющуюся одним из 70 тысяч объектов, относящихся к классу транснептуниевых. В настоящее время комета находится на удалении в 53 а. е. от Солнца. Комета движется не так, как должна бы, а немного отклоняется в сторону. Подобные погрешности позволяют предположить наличие за орбитой Нептуна еще одной планеты, гравитационное поле которой влияет на движение 2000 CR105, заставляя ее отклоняться от прогнозируемой траектории. Размеры неизвестной планеты оцениваются в пределах от размеров Луны до размеров Марса. Удаление этой планеты от Солнца по расчетам составляет около 10 миллиардов километров.

В начале третьего тысячелетия с помощью инфракрасного телескопа у звезды дзета-Зайца был обнаружен диск необычно теплой пыли. Дальнейшие исследования показали, что, скорее всего, в этой пыли идет образование астероидов или планет, подобно тому, как это происходило в нашей собственной Солнечной системе. Также вполне возможно, что этот теплый пылевой диск скрывает пояс астероидов. Звезда дзета-Зайца находится по космическим понятиям совсем рядом от нас – на расстоянии 70 световых лет. Ее масса вдвое превышает массу нашего Солнца. Известно также, что это очень молодая звезда, ей всего лишь 100 миллионов лет. По сравнению с ней наше Солнце очень древнее. Температура пылевых частиц, окружающих дзета-Зайца, составляет около 77°C. А масса содержимого этого диска сравнима с массой Земли, то есть в 1000 раз больше, чем масса астероидного пояса в нашей Солнечной системе. Однако самой большой неожиданностью для астрономов стало то, что пылевой диск с такими параметрами вообще не должен был бы находиться в этом месте. Он располагается так близко к самой звезде, что, по идее, все составляющие его частицы и частички материи должны были бы давно упасть на звезду дзета-Зайца под действием силы гравитационного притяжения. Значит, существует какой-то источник пополнения материи в пылевом диске.

4.5. Кометы

Кометы (от греч. *Kometes* – звезда с хвостом) – это своеобразные тела межпланетного пространства Солнечной системы, имеющие вид туманного сгущения со светящимся ядром и хвостом (рис. 66). Комету замеча-

ют на небе, когда она уже приблизилась к Солнцу на сравнительно небольшое расстояние (меньше 4–5 астрономических единиц).

Ледяное тело кометы, движущееся по орбите в Солнечной системе, частично испаряется при приближении к Солнцу, в результате чего возникает диффузная оболочка из пыли и газа, а также один или несколько хвостов.

Наблюдения многих комет и результаты исследований кометы Галлея с помощью космических аппаратов в 1986 г. подтвердили гипотезу Ф. Уиппла (1949 г.) о том, что ядра комет представляют собой что-то вроде «грязных снежков», имеющих несколько километров в поперечнике. Они состоят из замерзших воды, двуокиси углерода, метана и аммиака с вмержшей в лед пылью и каменистым веществом. При приближении кометы к Солнцу лед под действием солнечного тепла начинает испаряться, а улетающий газ образует вокруг ядра диффузную светящуюся сферу, называемую комой. Кома может достигать в поперечнике миллиона километров. Само по себе ядро слишком мало, чтобы его можно было увидеть, но наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне спектра показали, что кометы окружены огромными облаками водорода, размером во много миллионов километров. Водород получается в результате разложения молекул воды под действием солнечного излучения. В 1996 г. было обнаружено рентгеновское излучение кометы Хиякутаке, а впоследствии открыли, что и другие кометы являются источниками рентгеновского излучения.

В 2001 г. впервые была измерена температура заледенелого аммиака в ядре кометы, ее значение в 28 К позволяет предположить, что комета сформировалась между орбитами Сатурна и Урана. Это означает, что теперь астрономы могут не только определять условия, в которых формируются кометы, но и находить место их возникновения.

Пыль и газ покидают ядро кометы с выбросами, образующимися на стороне, обращенной к Солнцу, а затем уносятся в направлении от Солнца (рис. 66). Электрически заряженные ионизированные атомы отбрасываются магнитным полем солнечного ветра, образуя прямые ионные газовые хвосты (типа I). Небольшие нейтральные частицы пыли не уносятся солнечным ветром, но мягко «сдуваются» от Солнца давлением электромагнитного излучения, образуя пылевые хвосты (типа II), как правило, широкие и плоские.



Рис. 66. Положение хвоста кометы

У кометы Хейла–Боппа был обнаружен третий тип хвоста, состоящий из атомов нейтрального натрия (рис. 67). Всегда направленные в сторону от Солнца, хвосты растут по мере приближения кометы к Солнцу и могут достичь длины ста миллионов километров. Большие частицы пыли разбрасываются вдоль орбиты кометы, образуя метеорные потоки.



Рис. 67. Натриевый хвост кометы Хейла–Боппа (нижний)

Несмотря на свой внушительный вид, кометы содержат очень немного вещества, – возможно, всего одну миллиардную часть массы Земли. Их хвосты настолько разрежены, что за один проход вокруг Солнца теряется лишь пятисотая часть массы ядра.

Некоторые кометы являются короткопериодическими и движутся по эллиптическим орбитам, совершая полный оборот за период от 6 до 200 лет. Большинство же составляют долгопериодические кометы, орбиты которых настолько вытянуты, что период вращения вокруг Солнца может

измеряться многими тысячами лет. Орбиты короткопериодических комет лежат вблизи плоскости эклиптики, а орбиты длиннопериодических комет обычно не вписываются в основную плоскость Солнечной системы.

Признается, что число комет в Солнечной системе огромно – измеряется многими миллионами, но видимых среди них очень мало. Невидимые кометы находятся внутри орбиты Юпитера и за ним – в сторону Сатурна, Урана, Нептуна, т. е. дальше 5 астрономических единиц от Солнца. Формы орбит комет очень трудно вычислить, но многие из них обладают сильно вытянутыми эллипсоидными орбитами и, находясь в перигелии, почти «касаются» Солнца (приближаются на расстояние 0,5–1,0 радиуса Солнца). Из-за малых масс орбиты у комет неустойчивы: под влиянием других космических тел, прежде всего больших планет, они могут деформироваться и даже менять форму, превращаясь в гиперболы. Это означает, что они теряют управляемость Солнцем и планетами, и их движение направлено из Солнечной системы в межзвездное пространство.

О происхождении комет существуют противоречивые гипотезы. Обладая относительно небольшой массой, которую они непрерывно теряют, кометы живут не дольше сотни или тысячи периодов их обращения вокруг Солнца. Отсюда делается простой вывод: если кометы – кратковременные образования, а численность их огромна, то они не только гибнут, но и возникают вновь.

Согласно некоторым представлениям, кометы образуются в результате выбросов в межпланетное пространство материала вулканических извержений планет и их спутников. Но более популярной является гипотеза о возникновении комет из гигантского кометного облака Оорта.

Любопытно, что еще в 1950 году выдающийся голландский астроном Ян Оорт, анализируя орбиты 19 долгопериодических комет, высказал предположение о необходимости существования кометного пояса на периферии Солнечной системы. За прошедшие почти 60 лет список известных комет увеличился на порядок, а их траектории согласуются с представлениями о существовании кометного пояса, который теперь называют «облаком Оорта».

Облако Оорта простирается на тысячи а. е. от Солнца и образовалось в процессе формирования Солнечной системы, при выбрасывании на ее периферию мелких частиц гравитационным воздействием.

Предполагают, что общая масса Облака может составлять лишь несколько масс Земли.

Каждый год открывают около десяти новых комет, многие из которых рождаются в облаке Оорта, на расстоянии более 50000 а. е. Масса облака невелика – примерно 10% массы Земли приходится на сто миллиардов ядер комет. Отсюда легко определить массу «типичного» кометного ядра – около ста миллиардов тонн. В мире комет существуют как «карлики» (массой до миллиарда тонн), так и «гиганты» (до ста тысяч миллиардов тонн!). Они движутся по эллиптическим орбитам, в полном соответствии с законами механики и теории гравитации. Эти же законы предсказывают, что орбиты комет являются устойчивыми, т. е., подобно планетам, ядра комет совершают свой круговорот на периферии Солнечной системы в облаке Оорта. Другие кометы, по-видимому, происходят из пояса Койпера.

На данный момент обнаружено более 400 короткопериодических комет. Из них около 200 наблюдалось в более чем одном прохождении перигелия. Многие из них входят в так называемые семейства. Например, приблизительно 50 самых короткопериодических комет (их полный оборот вокруг Солнца длится 3–10 лет) образуют семейство Юпитера. Немного малочисленнее семейства Сатурна, Урана и Нептуна (к последнему, в частности, относится знаменитая комета Галлея).

Яркость комет очень сильно зависит от их расстояния до Солнца. Из всех комет только очень малая часть приближается к Солнцу и Земле настолько, чтобы их можно было увидеть невооруженным глазом. Самые заметные из них иногда называют «Большими кометами».

В 1986 г. комету Галлея исследовали космические аппараты «Вега-1» и «Вега-2» и европейский «Джотто». Оказалось, что ядро кометы Галлея состоит в основном из обычного льда (с небольшими включениями углекислых и метановых льдов), а также пылевых частиц.

Размеры ядра кометы Галлея равны нескольким километрам: 14 – в длину, 7,5 – в поперечнике; имеет неправильную форму и вращается вокруг оси, которая почти перпендикулярна плоскости орбиты кометы. Период вращения равен 53 часа.

4.6. Метеорное вещество. Метеориты

Под метеорным веществом понимается масса твердых тел различного размера – от огромных глыб до пылинок, носящихся в межпланетном пространстве. По фотографическим и радиолокационным наблюдениям

определены орбиты нескольких десятков тысяч метеорных тел. Подавляющее большинство их движется по эллиптическим орбитам вокруг Солнца. Но обнаружены метеорные тела с безусловно гиперболическими орбитами, т. е. пришедшие в окрестность Солнца из межзвездного пространства. Метеорное вещество концентрируется в плоскости эклиптики и имеет преимущественно прямое движение, т. е. то же направление, в котором движутся планеты. Движение метеорных тел определяется гравитационным притяжением Солнца и планет, а также негравитационными силами, возникающими в результате взаимодействия метеорных тел с электромагнитным и корпускулярным солнечным излучением (световое давление, эффект Пойнтинга–Робертсона и др.).

Эффект Пойнтинга–Робертсона впервые был описан в 1903 г. Джоном Генри Пойнтингом, который объяснил его в рамках эфирной теории электромагнетизма. Правильное объяснение эффекта с точки зрения общей теории относительности дал Говард Перси Робертсон в 1937 г. В звездной системе происходит постепенное уменьшение момента количества движения малого тела при движении его в поле тяготения звезды. Это происходит из-за торможения, вызываемого поглощением и переизлучением фотонов электромагнитного поля звезды, на которую пылевые частицы и малые тела, двигаясь по спирали, медленно падают.

Световое давление может выталкивать из Солнечной системы мельчайшие метеорные тела размерами менее 10^{-4} см. Более крупные метеоры под действием Пойнтинга–Робертсона эффекта постепенно уменьшают размеры и эксцентриситет орбит (тем быстрее, чем меньше метеорное тело и размеры орбиты), и метеорное тело по спирали приближается к Солнцу. На пути к Солнцу оно может быть захвачено планетами, особенно активен в этом отношении Юпитер. Через его «барьер» могут пройти только очень мелкие метеорные тела.

Если планета лишена атмосферы, то частицы падают непосредственно на ее поверхность с соответствующим эффектом удара – взрыва, образования кратера, разброса грунта, оплавления частиц и т.д. Если же планета обладает атмосферой, и притом плотной, то процесс встречи двух тел сильно усложняется. Например, на Земле это происходит следующим образом.

Метеорное тело, вторгшееся в земную атмосферу, может иметь скорость до 10–15 км/сек и более. Большая кинетическая энергия летящего тела вследствие сопротивления атмосферы частично (или полностью)

переходит в тепловую энергию, иногда со световым эффектом и звуком. Поверхностный слой метеорного тела и облегающий его слой воздуха нагреваются до нескольких тысяч градусов. Вещество тела вскипает, испаряется, частично разбрызгиваясь мельчайшими капельками, которые застывают и превращаются в шарики метеорной пыли, медленно осаждающейся на поверхность Земли. Выпадают и крупные куски не полностью расплавившегося тела, или оно в оплавленном виде падает на Землю. Эти падающие из космоса на Землю тела, частично потерявшие в атмосфере вещество, называются метеоритами. Ударный эффект падающего тела зависит от массы, скорости полета метеорита и ряда других условий (плотности и химического состава атмосферы, силы притяжения планеты).

Падая на поверхность безатмосферной планеты, метеорное тело сохраняет все свое вещество. Поэтому для таких планет понятия «метеорное тело» и «метеорит» совпадают.

Выпадение метеорных тел на поверхность планет, вне зависимости от того, безатмосферные ли они или имеют воздушную оболочку, называют метеоритной бомбардировкой.

Время жизни метеорных тел во внутренних областях Солнечной системы (внутри орбиты Юпитера) намного меньше возраста Солнечной системы, следовательно, метеорное вещество здесь должно постоянно пополняться. Источниками метеорного вещества в наши дни могут быть: распад комет, дробление малых планет, приток мелких тел с периферии Солнечной системы и др. Значительное большинство крупных метеорных тел имеет орбиты, сходные с орбитами комет (преимущественно короткопериодических), и, по-видимому, образуется при их разрушении.

Метеорное вещество в Солнечной системе представляется вполне упорядоченным. Целые рои метеорных тел движутся по общим орбитам, образуя более или менее мощные метеорные потоки. Эти потоки легко распознаются при наблюдении с Земли. В потоке метеоры движутся по взаимно параллельным путям, и наблюдателю кажется, что они вылетают из одной точки неба, называемой радиантом. Различают дневные и ночные метеорные потоки. Их названия происходят от созвездий, в которых они располагаются, например, Квадрантиды, Лириды, Персеиды, Ориониды, Геминиды, Дракониды и т. д. В России можно наблюдать все радианты северного полушария и часть радиантов южного полушария. Геоцентрическая скорость метеоров равна для Квадрантид $37,1 \pm 3,5$ км/сек, для Персеид – $60,1 \pm 4,0$ км/сек, для Геминиды – $35,9 \pm 4,6$ км/сек.

Метеорные потоки, для которых известны орбиты, можно разделить на три группы.

1. Потоки, афелии которых уходят далеко за пределы орбиты Юпитера. Они имеют сильно вытянутые орбиты, большие наклоны орбит к плоскости эклиптики под углами, иногда превышающими 90° (в случае обратного движения). Периоды обращения их вокруг Солнца исчисляются десятками лет. Таковы метеорные потоки Лириды, γ -Аквариды, Ориониды, Персеиды и Леониды.

2. Потоки, афелии орбит которых близки к орбите Юпитера. Они незначительно наклонены к плоскости эклиптики, постоянно подвергаются возмущениям со стороны Юпитера, образуя так называемое семейство Юпитера. Таковы Андромедиды, Боотиды, Драконида. Периоды обращения этих потоков составляют несколько лет.

3. Потоки, расположенные вблизи орбиты Земли. Метеоры этой группы движутся в том же направлении, что и Земля. Их орбиты незначительно наклонены к эклиптике. Периоды обращения составляют 1–3 года. К ним принадлежат Квадрантиды, Виргиниды, δ -Аквариды, Скорпиониды, Геминиды. Среди метеорных тел, обращающихся вблизи орбиты Земли, имеются и относительно крупные, дающие яркие болиды.

По распределению метеорного вещества вдоль орбиты все метеорные потоки можно разделить на два класса.

1. Метеорные потоки с резко выраженным скоплением метеоров в одном из участков орбиты. При ежегодной встрече Земли с разреженным участком поток проявляется слабо. При встрече с основным скоплением метеорных тел потока, в котором взаимное расстояние между частицами снижается до 30 и даже до 15 км, наблюдается чрезвычайно обильное появление метеоров, звездный, точнее, метеорный дождь. Например, поток Леониды, известный более 3770 лет, в XVIII и XIX веках давал периодические звездные дожди через каждые 33 года (1766, 1799, 1833, 1866), откуда был установлен период его обращения и найдена орбита. С конца XIX столетия орбита потока под действием планетных возмущений отделилась от орбиты Земли, и в настоящее время Леониды в эпоху их действия (10–18 ноября) очень бедны метеорами. К подобного рода потокам относятся также Лириды, Драконида, Андромедиды.

2. Метеорное вещество рассредоточено приблизительно равномерно вдоль всей орбиты, образуя своего рода «баранку», обращающуюся вокруг Солнца. Типичным примером такого рода метеорного потока явля-

ются Персеиды, ежегодно наблюдаемые в ночное время в августе примерно в одном и том же количестве (наблюдаются уже свыше 1100 лет).

В таких обильных потоках, как Персеиды или Геминиды, одна частица, дающая метеор, видимый невооруженным глазом, приходится в среднем на кубический объем пространства с ребром в 100–120 км.

Вопросы к главе 4

1. По каким признакам можно отличить на небе планету от звезды?
2. Какие созвездия называются зодиакальными и почему важно их знать?
3. Какие планеты относятся к нижним, какие к верхним?
4. Что такое элонгация?
5. Почему во время соединения планеты не перекрывают друг друга?
6. Что такое звездный период и от чего зависит его величина?
7. Какую скорость необходимо сообщить телу, чтобы превратить его в искусственный спутник?
8. При какой скорости тело покидает центр своего притяжения?
9. Какими законами описываются движения планет?
10. Какие типы вещества слагают тела Солнечной системы?
11. Для каких тел характерно «земное вещество», для каких – «солнечное» и для каких – «льды»?
12. Каково главное отличие внутреннего строения внутренних и внешних планет?
13. Что является источниками внутренней энергии на планетах?
14. В чем суть гравитационной дифференциации вещества планет?
15. Какие планеты и спутники являются тектонически активными в Солнечной системе?
16. Какие процессы участвуют в формировании форм поверхности планет и спутников?
17. Какие формы рельефа встречаются на поверхностях планет и спутников?
18. На каких планетах и в каком виде встречается вода?
19. Какие из внутренних планет имеют газовые оболочки и в чем их различие?
20. Чем объясняется температурный пик (мезопик) в атмосфере Земли?
21. Какие режимы общей циркуляции атмосферы существуют на планетах?

22. Как влияет на «климат» планет степень плотности атмосферы?
23. От каких факторов зависят глобальные изменения «климата»?
24. Почему планета может лишиться атмосферы?
25. Каково предполагаемое происхождение спутников Марса?
26. Чем объясняется необычайно большая высота вулканических выбросов на Ио, и какой химический элемент играет важнейшую роль в его эволюции?
27. Почему спутники Юпитера Европа и частично Ганимед и Каллисто обладают высоким альбедо и гладкой поверхностью?
28. С чем связаны предположительно мощные складки и многоугольные формы на поверхности Ганимеда?
29. Чем подтверждается отсутствие круговорота метана (аналогично круговороту воды) в атмосфере Титана?
30. В результате чего (предположительно) между поверхностью и атмосферой Титана происходит этано-метановый обмен?
31. Какой из спутников Сатурна является аналогом Ио и почему?
32. Какая форма рельефа поверхности спутников является наиболее встречаемой и почему?
33. У каких планет обнаружены кольца, и что они собой представляют?
34. Как астероиды различаются по составу?
35. Какую опасность таят астероиды группы Apollo и почему?
36. Какова вероятность и какими могут быть последствия столкновения Земли с астероидом?
37. На каком удалении от Солнца находится пояс Койпера–Эджворта?
38. Что представляют собой объекты пояса Койпера?
39. Как образуются спутники типа системы Плутон – Харон в поясе Койпера, какое значение имеют исследования пояса Койпера для системы типа Земля–Луна?
40. Что подтверждает существование облака Оорта?
41. Какие типы «хвостов» имеют кометы, и почему «хвост» направлен в сторону, противоположную Солнцу?
42. Какие размеры имеет комета Галлея?
43. Почему может измениться форма орбиты кометы?
44. Какое происхождение может иметь метеорное вещество Солнечной системы?
45. Что такое метеоритный дождь?
46. Какое значение имеет изучение метеоритов?

Глава 5

ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ И ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ

5.1. Факторы и фазы эволюции

Эволюция планет очень сложна, изменчива во времени и распадается на комплекс взаимосвязанных процессов. Чтобы познать природную обстановку на планетах, надо иметь в виду, что она формируется в неразрывной связи с глобальной эволюцией космического тела. Поэтому необходимо рассмотреть факторы и фазы эволюции, определяющие направление преобразований на планете.

Факторы эволюции. Любой природный процесс может функционировать лишь при условии снабжения его необходимой энергией. Потоки ее, а также сопутствующее ей вещество называют факторами эволюции, наиболее важными из которых являются следующие:

Солнечная энергия. На планеты солнечная энергия поступает в виде потоков электромагнитного излучения (солнечной радиации) и корпускулярного излучения (солнечного ветра).

Роль корпускулярного излучения в формировании природной обстановки на планетах не достаточно выяснена, поэтому оно здесь не рассматривается.

Солнечная радиация формирует на поверхности планет внутренней группы тепловое поле, которое возбуждает комплекс экзогенных процессов. Их количество и интенсивность зависят не столько от мощности поступающей на поверхность планеты энергии, сколько от поглощающей способности внешней области планет – воздушной и водной сред.

Например, Меркурий, наиболее близкая к светилу планета, облучается самым мощным потоком солнечной радиации, но, не имея атмосферы и воды, он не использует эту энергию и переизлучает ее обратно в космос. Марс, планета чуть ли не в 4 раза более удаленная от Солнца, чем Меркурий, получает на единицу площади примерно в 16 раз меньше солнечной энергии, чем приходится на аналогичную площадь поверхности Меркурия. И тем не менее действующие на Марсе экзогенные процессы во много раз интенсивнее, чем на Меркурии. Причина этого в том, что на Марсе имеются хорошо поглощающие солнечную энергию среды – воз-

душная оболочка и своеобразная гидросфера, хотя и без жидкой воды. Наиболее полно используется солнечная радиация на Земле, занимающей в Солнечной системе промежуточное место между Меркурием и Марсом, а потому и получающей средний по мощности поток энергии. Максимальному использованию Землей солнечной радиации способствует наличие плотной атмосферы и огромной массы воды, почти на 95% находящейся в самой активной жидкой фазе.

Метеоритная бомбардировка – фундаментальный космический процесс, представляет собой выпадение на планету различного размера космических тел – от пылинок до каменных глыб с поперечником в десятки километров. По существу, образование планет – это интенсивное непрерывное выпадение каменного материала.

В первые сотни миллионов лет существования планет этот фактор был важнейшим в их эволюции. В последующее время поток падающего на планеты каменного материала постепенно сокращался по мере концентрации его в растущих планетах.

На планетах с атмосферами и водной средой эффект метеоритной бомбардировки ослабевал и сам по себе, а особенно вследствие подавления его эндогенным и экзогенным факторами. Физическая сущность мгновенного удара заключается в быстром переходе огромного количества кинетической энергии в тепловую, что приводит не только к расплавлению части грунта, но и к его частичному испарению – превращению в пар. В результате получается эффект, аналогичный обычному взрыву пороха, динамита или другого подобного вещества, при котором мгновенно возникают огромные массы газов.

Дробление пород при ударе крупного метеорита о поверхность охватывает толщу мощностью до 10–25 км.

В структурном отношении метеоритная бомбардировка приводит как к образованию радиально-кольцевых структур планетной коры, так и к возникновению зоны дробления коренных пород. В результате действия метеоритной бомбардировки на поверхности образуются два слоя рыхлых пород – своеобразных ударных брекчий и реголита.

Покровные брекции могут иметь мощность от десятков метров до километра и более. Слагающий их материал претерпел сложные петрографические превращения и консолидировался в каменную породу.

Температурные условия их образования определяются приблизительно в 700°C , а температуры для возникновения вторичной кристаллической породы, вероятно, колебались в диапазоне $1000\text{--}1300^{\circ}\text{C}$.

Реголит. Плотные сцементированные породы покровных брекчий перекрываются слоем в основном тонкозернистого материала – реголита. Мощность его обычно колеблется в пределах нескольких метров. Реголит – это космическая кора выветривания, образованная в результате бомбардировки лунного грунта. Реголит представляет собой разномасштабный темно-серый, даже черный порошок, легко слипающийся в отдельные рыхлые комья. Зерна реголита оплавлены или округлены, похожи на стеклянные или металлические шарики, редко встречаются угловатые зерна, похожие на частицы магматических пород типа базальтов. Наиболее крупная фракция (с размером частиц более 1 мм) составляет не более 10%, а обычно – менее 5% общего количества.

Особенность реголита в том, что одновременно с процессами дробления и измельчения пород под влиянием микрометеоритной бомбардировки, а также температурных колебаний идет и процесс их консолидации.

В соответствии с изложенным метеоритную бомбардировку нельзя причислить ни к эндогенному, ни к экзогенному факторам, непосредственно связанных с самой планетой. Планетологи относят ее к фундаментальному космическому процессу.

Эндогенный фактор. В соответствии с массой вещества в недрах планеты за счет радиоактивных элементов и гравитационного сжатия генерируется внутренняя, эндогенная энергия.

Экзогенный фактор. Под влиянием солнечной энергии, формирующей тепловое поле поверхности планет, во внешних их сферах развивается сложный комплекс экзогенных процессов – перемещения и преобразования вещества. В геологическом и геоморфологическом аспектах они выступают как антиподы по отношению к эндогенным процессам. Это проявляется в том, что созданные эндогенным фактором морфологически выраженные тектонические структуры уничтожаются экзогенным фактором.

На безатмосферных и безводных планетах Луне и Меркурии экзогенные процессы, перечень которых крайне ограничен, протекают чрезвычайно слабо. Они не в состоянии уничтожить созданные тектоникой и метеоритной бомбардировкой морфоструктуры, наиболее крупные из которых существуют здесь в течение миллиардов лет. Необычайно высокая активность сложнейшего комплекса экзогенных процессов на Земле обусловлена наличием у нее огромных масс воды, находящейся в глобальном круговороте. В короткое время, измеряемое немногими миллионами лет,

экзогенные процессы на Земле полностью уничтожили созданные эндогенным фактором грандиозные горные сооружения.

Современный облик Марса запечатлел совокупный результат действующих факторов и относительную роль каждого из них в эволюции внешней зоны литосферы и ее поверхности. Это в основном эоловая деятельность, а в прошлом еще и роль водных потоков.

Фазы эволюции. Сопоставление данных об эволюции планет, полученных за последние два десятилетия в результате космических исследований, позволяет говорить об однотипности ранней истории планет земной группы. Но в последующее за ранней историей время развитие планет происходило неодинаково. У Земли темп эволюции был очень высоким. Основные причины высокой динамичности Земли – участие в эволюции, особенно внешней области, огромных масс воды и большая активность недр планеты. Показателем интенсивности действия на поверхности Земли разрушительных процессов может служить уничтожение на ней кратерного рельефа лунной фазы еще в начале геологической истории, т. е. 3,5 млрд лет назад. На Луне он существует уже 4 млрд лет, хотя и испытал значительные изменения.

Фаза аккреции (рождение планет). Фазу образования планет надо представлять себе как аккумуляцию первоначально крайне разреженного газопылевого материала протопланетного облака, или туманности. Это холодное облако вращалось и постепенно уплотнялось. В условиях вакуума космического пространства на сгущение твердых частиц, их соединение между собой в более крупные агрегаты существенное влияние оказывали газы первичной атмосферы.

Фаза расплавления. Первым общим этапом для всех планет внутренней группы после аккреции было сплошное расплавление их внешних сфер. Этот этап соответствовал концу фазы аккреции, когда на планеты выпадало наибольшее количество самых крупных метеорных тел – планетезималей и выделялось огромное количество тепловой энергии.

Фаза расплавления внешней сферы была впервые установлена для Луны. Слагающие ее с поверхности первичные породы оказались магматическими (анортозитами), т. е. образовавшимися в результате застывания и кристаллизации магматического расплава. Абсолютный возраст этих пород, определенный радиометрическим методом, – примерно 4,3–4,6 млрд лет. Поскольку расплавленные в раннюю стадию первичные поверхностные породы имеют сплошное распространение на Луне, можно

считать, что фаза расплавления внешней сферы характерна для всех планет рассматриваемой группы.

Дистанционное изучение поверхностных пород Меркурия, Марса и аналитическое изучение грунтов Марса и Венеры подтвердили такое заключение: эти планеты также пережили фазу расплавления. Лишь для Земли никаких конкретных данных о ранних фазах ее развития нет. И чтобы выявить ее раннюю историю, приходится пользоваться только сравнительными данными по другим планетам.

Учитывая тот факт, что к настоящему времени вещество всех планет земной группы продифференцировано (т. е. в соответствии со своим удельным весом и составом разделилось на более тяжелое ядро, мантию и кору), высказывается мнение о полном расплавлении планетного вещества уже в конце фазы аккреции или непосредственно вскоре после нее. Это касается прежде всего Луны и Меркурия. Обоснованию такой точки зрения служит следующее соображение.

Поскольку сам факт дифференциации планет на оболочки доказан и не вызывает сомнения, а в течение всего последующего времени за фазой расплавления не было благоприятных условий для такого расслоения недр, то, следовательно, оно произошло в эту же раннюю фазу.

В фазе расплавления внешней сферы планет происходило массовое выделение газов и воды, которая при очень высокой температуре поверхности находилась в виде пара.

В этой фазе все планеты внутренней группы – Меркурий, Венера, Земля, Луна и Марс – обладали атмосферами, которые одновременно содержали в себе в парообразном состоянии и всю гидросферу. Крупные планеты (Земля и Венера) **благодаря большой массе** и, соответственно, силе притяжения удержали выделявшиеся из недр газы и парообразную гидросферу, из которых в последующем могли сформироваться атмосфера и гидросфера.

Меньшие по размерам Луна и Меркурий из-за недостаточности у них силы притяжения имели неустойчивые атмосферы, водяные пары и газы из них непрерывно улетучивались в космос. Когда поступление газов из недр прекратилось, вся временная нестабильная атмосфера как Луны, так и Меркурия исчезла, и они превратились в безатмосферные планеты.

Марс как планета промежуточной массы (между Землей и Венерой, с одной стороны, и Меркурием и Луной – с другой) в фазу расплавления имел сравнительно плотную атмосферу. Но по мере прекращения посту-

плений из недр газов и паров воды и утечки их в космос атмосфера все сильнее разрежалась и продолжает разрежаться.

«Лунная» фаза. Все планеты внутренней группы, в том числе и Земля, пережили «лунную» фазу, обусловленную метеоритной бомбардировкой, являющейся в то время господствующим рельефообразующим процессом. Ударные кратерные формы составляли основной элемент лунного рельефа. Другими словами, в то время поверхность каждой планеты напоминала современный рельеф поверхности Луны, откуда и произошло название фазы. У Луны и Меркурия «лунная» фаза, начавшаяся примерно 4 млрд лет назад, продолжается и в современную эпоху. У Марса за это время произошла существенная перестройка рельефа за счет образования вулканических и экзогенных форм. Однако типичный лунный рельеф, сформировавшийся в ту далекую стадию ранней истории, сохранился до сих пор на древних участках поверхности. Что же касается Земли, то лунный рельеф на ней давно уже полностью уничтожен активно действующими экзогенными и эндогенными процессами.

Завершение фазы расплавления связано с охлаждением поверхности и переходом ее из жидкого состояния в твердое. Но температура ставшей уже твердой поверхности продолжала оставаться очень высокой, поэтому ни одной капли жидкой воды (а это касается лишь трех планет — Земли, Венеры и Марса) на ней не могло быть: в случае выпадения она мгновенно испарялась. Вся гидросфера планет, у которых она была, продолжала оставаться в атмосфере в виде пара. Так продолжалось до тех пор, пока температура поверхности планет не охладилась до 100°C.

С этого времени природная обстановка на планетах с гидросферами коренным образом изменилась — на поверхности появилась жидкая вода, сформировался сток, возникли водоемы.

Последующее время. Таким образом, температура 100°C является рубежом, после которого эволюционные пути планет земной группы разошлись.

Луна и Меркурий, лишенные атмосферы и гидросферы, эволюционировали относительно очень медленно, хотя и у них был период активного проявления вулканизма и тектонических движений. У Луны он приходится на интервал времени от 3,9 до 3,16 млрд лет назад. Но даже этот период не нарушил продолжающейся до настоящего времени «лунной» фазы. В таком же состоянии находится и Меркурий, у которого собственно планетные факторы — эндогенный и экзогенный — действуют слабо, и развитие поверхности определяет метеоритная бомбардировка.

Марс, по массе почти в 9 раз превосходящий Луну, – активная планета как по проявлению тектонических процессов и вулканизма, так и экзогенных, в основном эоловых (работа ветра) процессов. В прошлом на Марсе значительную роль играли и флювиальные (работа водотоков) процессы, но в современную эпоху жидкой воды на нем нет. Очень разреженная атмосфера (среднее ее давление составляет лишь 6,1 гПа) удерживает воду лишь в двух фазах – газообразной (водяной пар) и твердой (лед). В обеих фазах вода неактивна. Однако в прошлом жидкая вода участвовала в процессах изменения поверхности Марса. В результате действия флювиальных, а также эоловых процессов в сочетании с активной вулканической деятельностью лунный рельеф в ряде крупных регионов планеты был существенно и даже полностью переработан. Поэтому, несмотря на широкое распространение на поверхности Марса ударных кратеров, рельеф его в целом нельзя назвать лунным.

Венера еще плохо изучена, но предполагают, что по тектонической активности она должна походить на Землю, так как имеет сходную массу. Экзогенные процессы на поверхности Венеры протекают крайне медленно из-за отсутствия воды. Постоянная температура поверхности и нижней атмосферы не способствует активному проявлению термического выветривания.

На Венере, несмотря на очень плотную атмосферу, так же как на Луне и Марсе, широко распространены ударные кратеры. В настоящее время на планете проявляется вулканическая активность, но сказать определенно, в какой степени изменен первичный лунный рельеф, не представляется возможным.

В соответствии с системным подходом каждая планета рассматривается как открытая природная система, обладающая внутренними межкомпонентными связями и внешними связями, осуществляемыми через обмен веществом и энергией с космосом.

Открытыми системами, но более низкого ранга, признаются и все концентрические сферы и слои внутри планет. В планетах различают две подчиненные подсистемы – внутреннюю и внешнюю, которые, будучи тесно связанными между собой как части целого, в то же время резко различаются тепловыми полями и протекающими в них процессами.

Внешняя область питается, главным образом, солнечной энергией, внутренняя – эндогенной. Солнечная энергия возбуждает процессы не только во внешней области, но и во внутренней, хотя и в меньшей степе-

ни. Точно так же и эндогенная энергия передается во внешнюю область, где она участвует в формировании теплового поля, а также создает неравномерное гравитационное поле – необходимое условие функционирования экзогенных процессов.

Возбуждаемые во внешней области экзогенные процессы отличаются динамичностью, протекают в высоком темпе и подчиняются климатическим колебаниям – суточному и сезонному ритмам, годовой и многолетней периодичности. Во внутренней области процессы чрезвычайно замедлены, что объясняется большими масштабами вовлекаемых в движение масс планетного вещества. Цикличность процессов в ней подчинена не климатическим, а геологическим закономерностям.

Границей между внешней и внутренней областями служит горизонт постоянной температуры в планетной коре. Это нижний предел непосредственного проникновения вглубь литосферы солнечной энергии. Эта граница является в то же время подошвой зоны гипергенеза (выветривания).

В географическом аспекте сравнительной планетологии основной интерес представляет внешняя область планет, в которой формируется природная обстановка, являющаяся предметом исследования физической географии. Целью этих исследований является раскрытие закономерностей формирования, строения и функционирования природных условий планет.

5.2. Природная обстановка на внутренних планетах

Природной обстановкой называется состояние внешней области планеты, которая питается преимущественно солнечной энергией, формирующей тепловые поля поверхности планет. Тепловое поле – это энергетическая основа развития природы планет.

Применительно к Земле вместо терминов «природная обстановка», «природные условия» можно употреблять понятие «природная среда», подчеркивая тем самым ее способность к зарождению жизни и развитию органического мира, обеспечению условий существования человека и его деятельности. Хотя это и важнейшее свойство Земли, оно не может быть принято за основу сравнения с другими планетами, поскольку жизнь больше нигде пока не обнаружена. Для сравнительного анализа

необходимо выявить такие элементы и свойства природы, которые были бы присущи внутренним планетам на протяжении их истории.

Проведение сравнения этих космических тел на основе геологической истории не даст ответа на вопрос: «Почему природа планет земной группы столь различна?», – потому что геологические структуры планет и геологические процессы, в общем, однотипны, разница лишь в количестве внутренней энергии, изначально захваченной будущей планетой в процессе аккреции. Этим объясняется степень геологической активности планет: на Меркурии и Луне тектонические процессы практически прекращены, на Марсе – проявляются очень слабо, на Венере геологическая активность должна быть достаточно высокой, по аналогии с Землей, но об этом можно лишь предполагать, и только на Земле до настоящего времени интенсивно проявляются все геологические процессы: землетрясения, вулканизм, горообразование, дрейф континентов, поднятия и опускания земной коры.

Иначе обстоит дело с природой, являющейся результатом взаимодействия компонентов, набор которых и степень их проявления индивидуальны для каждой планеты и находятся в прямой зависимости от ее массы. На ранних этапах существования Земли ее физические условия и абиогенные процессы во внешней области не отличались от тех, что были на других планетах. Более того, несмотря на очень сильное усложнение структуры поверхности Земли в последующее время (появление органического мира), физическая основа ее сохранилась до настоящего времени. Это позволяет сравнивать природу планет по физическим условиям их внешней области.

Внешняя природа планет формировалась под влиянием так называемого «глобального климата», который в свою очередь формировался под влиянием «климатических факторов и процессов».

Термин «климат» определяется неодинаково в разных источниках. Так, в метеорологическом словаре С. П. Хромова и Л. И. Мамонтовой [1974: 205] сказано: «Климат есть статистический режим колебаний состояния атмосферы с короткими периодами (до года) и с длинными периодами (порядка десятилетий, столетий, тысячелетий)». В таком понимании термин «климат» можно применять для атмосферных планет – Земли, Венеры, Марса; для безатмосферных планет – Меркурия и Луны он неприменим. Более широкое и глубокое понимание термина «климат» дается в монографии А. С. Мониной и Ю. А. Шишкова [1979: 10]: «Кли-

мат – это статистический ансамбль состояний, которые проходит система океан – суша – атмосфера за периоды времени в несколько десятилетий». Хотя это определение может быть использовано только для Земли, из него можно вычленить выражение: «ансамбль состояний... суши», пригодное для сравнения климата внутренних планет.

В. В. Докучаев (1948), открывший закон природной зональности Земли, или географическую зональность, определяющим фактором в формировании природных зон признавал климат. Он показал, что все природные компоненты (почвы, растительность, животный мир и др.), а также все действующие экзогенные процессы обусловлены климатическим фактором.

Г. С. Голицин (1969) говорит о возможности сравнения погоды на планетах земной группы – Венере, Марсе и Меркурии.

Под погодой здесь понимается физическая обстановка на планетах как с атмосферами и гидросферами, так и на безатмосферных и безводных.

Итак, на всех планетах земной группы существуют климатические условия, существенно различающиеся между собой, но тем не менее обеспечивающие формирование природы, соответствующей этим условиям.

5.2.1. Климатообразующие факторы

Поверхность планет – важнейшая контактная поверхность физических сред – литосферы, атмосферы, гидросферы и вакуума межпланетного пространства, это энергетический фокус внешней области планет, куда поступают потоки внутренней и внешней энергии и где происходит их отражение и переизлучение в межпланетное пространство. Поверхность планеты – сфера зарождения комплекса природных процессов.

Энергия и ее источники. На поверхность планет энергия поступает от разных источников: от Солнца – в виде электромагнитного и корпускулярного излучения, из космоса – в форме кинетической энергии падающих метеоритов, из недр Земли – тепловой поток и гравитационная энергия, являющаяся потенциальной энергией силы тяжести, перемещаемых тектоническими процессами масс горных пород. На поверхности планет гравитационная энергия лишь частично переходит в тепло, участвуя в формировании теплового поля. Но большая часть ее тратится на перемещение продуктов разрушения горных пород с повышенных участков в понижения.

Кинетическая энергия падающих метеоритов со временем ослабевала, уступая первое место солнечной радиации.

Собственная электромагнитная энергия планет и других космических тел незначительна и ее не берут во внимание.

Таким образом, основным источником формирования теплового поля планет является солнечная радиация. Мощность потока солнечной радиации у верхней границы атмосферы называется **солнечной постоянной**. У Земли ее осредненное значение определяется в $1,98 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$. Но эта величина непрерывно изменяется под действием других факторов: периода обращения планеты, периода вращения, эксцентриситета орбиты, наклона оси к плоскости орбиты, наклона орбитальной плоскости к эклиптике. Влияние этих второстепенных факторов сказывается как на мощности приходящего к планете потока солнечной радиации, так и на ее режиме. Отмеченная нестабильность потока солнечной радиации передается тепловому полю поверхности – его напряженности и режиму, а соответственно, и стимулируемым солнечной энергией экзогенным процессам.

Период обращения планет вокруг Солнца обуславливает продолжительность годовых циклов изменчивости температурно-го поля поверхности и хода экзогенных процессов.

В Солнечной системе длительность года планет изменяется от 58 дней у Меркурия до 164,8 земных лет у Нептуна. С увеличением продолжительности года постепенно изменяются температуры поверхности планеты.

Период осевого вращения планет определяет продолжительность планетных «суток», а значит, и ритм температурных колебаний поверхности. Самые короткие сутки у планет-гигантов: чем крупнее планета, тем за более короткий период она совершает полный оборот вокруг своей оси. Юпитеру требуется 9 часов 50 минут и 30 секунд, чтобы совершить оборот, Сатурну – 10 часов 14 минут, Венере – 247 земных суток.

В соответствии с быстротой вращения планет вокруг оси находится экваториальная скорость движения поверхности. Например, у Юпитера экваториальная скорость наибольшая, она составляет 43 000 км/час. Если такую экваториальную скорость придать Земле, то наша планета делала бы полный оборот вокруг оси не за 24 часа, а всего за 56 минут. У планет внутренней группы – Меркурия, Венеры, Земли, Марса и Луны – скорости вращения значительно меньше, и установить какую-либо закономерность в их вращении не удастся. Правда, Земля –

самое крупное тело из внутренних планет – по сравнению с Юпитером вращается с меньшей скоростью (более чем в 25 раз медленнее его), но значительно быстрее других планет внутренней группы. Почти равная Земле по величине планета Венера, наоборот, имеет минимальную скорость вращения. Полный оборот вокруг оси она делает за 247 земных суток, в то время как на облет Солнца ей требуется около 225 суток. Это означает, что ее год длится меньше ее же суток. Марс во много раз меньше Венеры, но вращается вокруг оси в 100 раз быстрее. Меркурий почти в два раза меньше Марса, а вращается более чем в 50 раз медленнее. На полный оборот вокруг оси Меркурий затрачивает 58,65 земных суток, а год у него продолжается 88 суток. Следовательно, продолжительность периода вращения соответствует $\frac{2}{3}$ времени облета планеты вокруг Солнца. Каждая точка экваториальной зоны Меркурия за длинный день (продолжительностью 88 земных суток) может нагреться почти до 500°C при перпендикулярном падении солнечных лучей. Но когда эта точка окажется в полночь в диаметрально противоположном положении, то может охладиться до -180°C . Таким образом, максимальная амплитуда колебания температуры на поверхности Меркурия – примерно 700° , что является своеобразным рекордом.

Со скоростью вращения планеты связана ее объемная форма. Чем медленнее вращается планета, тем ее форма больше приближается к шару, тем меньше выражено у нее сжатие, под которым понимается отношение разности экваториального и полярного радиусов планеты к экваториальному радиусу. У очень медленно вращающихся планет – Меркурия и Венеры – объемную форму приближенно можно считать шарообразной, а не эллипсоидной, как у других планет. Рекорд сжатия принадлежит Сатурну, для которого эта величина представлена отношением 1:10; у Земли сжатие в 30 раз меньше – 1:298,2. С формой планеты связана специфика распределения по ее поверхности приходящей солнечной радиации.

Эксцентриситет орбиты. Планеты обращаются вокруг Солнца не по круговым орбитам, а по эллиптическим. Следовательно, расстояние их от светила все время меняется, а потому изменяется и мощность потока солнечной радиации, достигающей планеты. Чем больше у планеты эксцентриситет орбиты, тем большему изменению подвержен поток солнечной радиации.

На температурный режим поверхности планет также оказывает влияние величина наклона оси вращения к орбитальной плоскости. У одних планет оси располагаются почти перпендикулярно к орбитальным плоскостям (Меркурий, Юпитер). Следствием такого положения

осей является однообразие в течение всего года погодных и природных условий – отсутствие сезонов.

У планет с большим наклоном оси вращения резко выражены сезоны года. Тепловое поле их поверхности в значительной степени отражает сезонный ритм солнечной радиации.

Наклон орбитальной плоскости к эклиптике влияет на поток солнечной радиации, усиливая или ослабляя его.

Наличие других факторов формирования теплового поля атмосферы и гидросферы напрямую зависит от массы планеты.

5.2.2. Климатообразующие процессы

Атмосфера и гидросфера играют огромную роль в отражении, поглощении и трансформации солнечной энергии, в возбуждении комплекса экзогенных процессов.

Энергия сама по себе «не работает», т. е. не возбуждает природных процессов, если не переходит в другие виды энергии. В соответствии с этим ее свойством наблюдается такой кажущийся парадокс – активность возбуждаемых на планете экзогенных процессов зависит не от обилия поступающей солнечной радиации, а только от той ее части, которая трансформируется в другие виды энергии. Например, электромагнитная энергия Солнца переходит в скрытую теплоту парообразования, химическую энергию, гравитационную и т. д. Именно при таких превращениях она и стимулирует экзогенные процессы, формируя природную обстановку.

Однако для того чтобы электромагнитная энергия Солнца могла быть трансформирована в другие виды, необходимо наличие благоприятных сред для ее поглощения и последующего преобразования. Такими средами в первую очередь являются атмосфера и гидросфера.

Безатмосферные и безводные планеты с абсолютно сухой поверхностью (грунтом), как, например, Луна, солнечную энергию почти не используют. В зависимости от величины альбедо планеты часть радиации отражается в космическое пространство, а остальная идет на формирование теплового поля поверхности и грунта. Его напряжение и режим находятся в полном соответствии с мощностью потока приходящей радиации. Так создается идеальный «соллярный климат». Поверхность Луны лишь нагревается и, будучи нагретой, в свою очередь излучает в космическое пространство электромагнитные волны, но уже не в коротком диапазоне волн, а в длинном – тепловом. При такой перестройке длин волн одного и

того же вида энергии процессы не возбуждаются, и поверхность остается консервативной.

Совершенно иная обстановка складывается во внешней области планет при наличии у них атмосферы и гидросферы. Обе сферы всегда находятся на планетах совместно и в тесной связи. Гидросфера в виде газового компонента (пара) входит в состав атмосферы Венеры и Марса. Жидкой воды на этих планетах нет. Либо из-за очень высокой температуры (Венера), либо из-за слишком разреженной атмосферы (Марс).

Поток солнечной радиации, испытав влияние космических факторов на свою напряженность и режим, начинает взаимодействовать с планетой. Атмосфера сильно изменяет поток солнечной энергии – солнечную постоянную. К поверхности планеты из-за потерь доходит только часть энергии, притом не только уменьшенная по сравнению со своей первоначальной мощностью, но и с измененным режимом. Важнейшая часть солнечной радиации отражается обратно в космос (альбедо). Отражательная способность безатмосферных планет незначительна: у Луны и Меркурия альбедо равно 0,07, у планет же с атмосферами оно значительно больше: у Земли – 0,35, а у Венеры – даже 0,76, т. е. 3/4 солнечной радиации, поступающей к Венере, отражается обратно в космическое пространство.

Таким образом, атмосферы в зависимости от своих параметров – химического состава, плотности и др. – ослабляют поток солнечной радиации, поступающей на поверхность планеты. Но если бы влияние атмосфер на поток солнечной радиации выражалось только ее потерями, то поверхность планеты была бы переохлаждена, в действительности же она перегревается. В этом сказывается влияние такого фактора, как парниковый (оранжерейный) эффект атмосферы. При отсутствии атмосферы средняя температура поверхности Земли, так называемая равновесная температура, составляла бы -23°C , а фактически за счет парникового эффекта она на 38°C выше, т. е. равняется $+15^{\circ}\text{C}$.

Оранжерейный эффект разреженной атмосферы Марса повышает его температуру всего на 4° при равновесной температуре -57°C . Фактическая же средняя температура марсианской поверхности -53°C . Но самый большой оранжерейный эффект у Венеры. Ее плотная атмосфера и густой облачный покров обуславливают перегрев нижних слоев воздуха и поверхности литосферы на 524°C . Вместо равновесной в -44°C действительная средняя температура поверхности Венеры $+480^{\circ}\text{C}$.

Еще большее влияние на формирование теплового поля поверхности планет оказывает гидросфера.

Наиболее резкий контраст природной обстановки наблюдается у Луны и Земли.

Обе планеты находятся на одинаковом расстоянии от Солнца, поэтому солнечная постоянная у них одна и та же – $1,98 \text{ кал/см}^2\cdot\text{мин}$. Но Луна не имеет активно поглощающих солнечную энергию сред – воздушной и водной. Земля же обладает атмосферой, отличающейся сложностью состава и большой плотностью, и еще более мощной гидросферой. Важно то, что 95% гидросферы находится в жидкой фазе – в наиболее активном состоянии по сравнению с твердой и газообразной. Особенно существенным фактором формирования и функционирования природной среды на Земле является глобальный круговорот вещества и энергии, в который вовлечены частные круговороты: литосферный, атмосферный, гидросферный и других природных компонентов, взаимодействующих между собой. Это взаимодействие осуществляется через сложнейший комплекс экзогенных процессов, подчиняющихся глобальному процессу.

Благодаря стечению ряда обстоятельств (наличию атмосферы и огромных масс жидкой воды, обладающей высокой химической активностью и теплоемкостью при устойчивых умеренных температурах) создалась среда, обеспечивающая необходимые условия для зарождения жизни. Ее длительное направленное развитие привело к образованию нового компонента – биосферы, которая к настоящему времени превратилась в могучий фактор развития природы. Но феноменальным явлением на общем природном фоне Земли было появление и быстрое развитие мыслящего существа – человека.

В отличие от Земли, обладающей богатой динамичной природой, насыщенной жизнью и разумными существами, с активно развивающимися в недрах тектоническими процессами и вулканизмом, Луна – планета «мертвая». Внутренние процессы у Луны проявлялись весьма активно на ранних стадиях ее существования, затем они оживлялись в период от 3,9 до 3,16 млрд лет назад, но к настоящему времени – почти угасли. Внешняя область Луны, сухая, каменистая, с необычайно консервативными формами рельефа, в сочетании с приходящими на поверхность лучами коротковолновой радиации Солнца и космическими лучами, создает условия, невозможные для зарождения и функционирования жизни.

Из приведенного сопоставления становится ясно, что масса планеты определяет количество и роль компонентов природной среды и действующих факторов и, в конечном счете, – индивидуальность природной об-

становки. Выявленные закономерности позволяют провести некоторое географическое сравнение планет и более отчетливо представить общие и специфические особенности Земли, Венеры и Марса, имеющих атмосферы (а Марс и Земля обладают еще и гидросферой), но различие параметров этих компонентов резко сказывается на особенностях природных условий.

Для безатмосферных поверхностей Луны и Меркурия действительны только два климатообразующих фактора – солнечная радиация и подстилающая поверхность. У планет с атмосферами важным фактором является химический состав и другие параметры воздушной среды, а также ее циркуляция, на которую в свою очередь влияет фактор осевого вращения (закон Кориолиса). Таким образом, на атмосферных планетах действует уже более полный набор климатообразующих факторов, но наиболее полно они представлены на Земле. Помимо всех названных – на Земле действует мощный круговорот воды.

5.3. Формирование климата на планетах земной группы

Проблема формирования климата и его изменения даже для Земли остается сложной и актуальной уже длительное время. Ученые не находят однозначного ответа на многие вопросы, связанные с причинами оледенений на Земле, не выявлена роль тех или иных факторов, влияющих на потепление или похолодание. Моделирование прошлых и будущих климатических процессов требует учета огромного числа переменных величин, но всего все равно учесть невозможно. Еще большую сложность представляют построения климатических процессов на атмосферных планетах земной группы, в основу которых положены данные, полученные дистанционно или с космических аппаратов. В связи с этим разрабатываемые теории и модели формирования и развития климатов на планетах всегда имеют уязвимые места, но они являются хотя бы попыткой дать объяснение сегодняшнего состояния природной обстановки и ответить на вопрос: «Почему на Марсе слишком холодно, чтобы там существовала жизнь, на Венере слишком жарко, а на Земле в самый раз?» На первый взгляд ответ на этот вопрос может показаться простым. Здравый смысл подсказывает, что Земля с ее пригодной для жизни средней

температурой 15°C образовалась на подходящем расстоянии от Солнца, а Марс (-60°C) и Венера (+460°C) – нет; в результате только на поверхности Земли есть необходимая для жизни вода в жидком состоянии.

Однако особенности происхождения «земных», или «каменных» планет не объясняют полностью их климата. Три «соседки» были когда-то во многих отношениях похожи. Они состояли из одинаковых пород, имели атмосферы с примерно одинаковым газовым составом (углекислый газ и водяной пар) и были достаточно массивными, чтобы удерживать воду на большей части своей поверхности. Принципиально различный климат возник на них в основном из-за различий в круговороте углекислого газа (CO_2) – обмене им между корой планеты и атмосферой. Углекислый газ, подобно водяному пару и некоторым другим компонентам атмосферы, является «парниковым» газом: он пропускает солнечный свет, но поглощает инфракрасное излучение (тепло) планеты и переизлучает часть этого тепла назад к ее поверхности (рис. 68).



Рис. 68. Парниковый эффект

Чтобы разобраться в сегодняшнем состоянии атмосфер и поверхностей Венеры, Земли и Марса, необходимо рассмотреть некоторые модели, рисующие картину давно минувших событий.

5.3.1. Высыхание Венеры

В то время, как Земля и Марс имеют огромные запасы воды, Венера сегодня почти полностью обезвожена. Лишь немного влаги осталось на ней

в виде водяного пара в атмосфере или в качестве компонента плотных облаков, состоящих в основном из капелек серной кислоты, плотным слоем окружающих планету. Климатологи построили две основные теории, объясняющие пути потери воды Венерой, – это теория разгоняющегося парникового эффекта и теория влажного парника.

Возможно, первоначально Венера имела достаточно воды, но потеряла ее, когда вода нашла путь в верхние слои атмосферы. Там, под действием солнечного света молекулы воды распадаются, и освобождающиеся атомы водорода улетучиваются в космос. Источником этого водорода служит лишь вода в верхней атмосфере; на низких высотах легкие атомы водорода задерживаются плотными слоями углекислого газа.

Классическое объяснение – теория разгоняющегося парникового эффекта – предполагает, что на поверхности Венеры воды никогда не было, потому что, если поток солнечного света, падающего на планету, превышает некоторую критическую величину, вода на поверхности не может оставаться жидкой. Теоретически поток солнечного излучения, необходимый для «запуска» на некоторой планете механизма разгоняющегося парникового эффекта, должен примерно в 1,4 раза превышать поток, падающий сейчас на Землю (при условии, что планета имеет полностью насыщенную водяным паром атмосферу, в которой нет облаков). Однако если в атмосфере этой планеты имелись облака, отражавшие часть приходящего солнечного света, то она на самом раннем этапе своей истории могла избежать катастрофы и иметь на своей поверхности океаны.

Для орбиты Венеры этот поток солнечной радиации с самого начала мог иметь сверхкритическое значение, и вся вода, которая высвобождалась из недр планеты, должна была сразу испаряться. По крайней мере, в нижнем, наиболее теплом слое атмосферы водяной пар не мог конденсироваться и выпадать в виде дождей.

Что препятствовало конденсации водяного пара на Венере? Высокие температуры делали атмосферу горячей и влажной на большом протяжении, и нагретый у поверхности Венеры воздух по мере своего подъема охлаждался очень медленно, сдвигая вверх до высоты около 100 км уровень конденсации или, так называемую, холодную ловушку. Холодная ловушка – это слой, в котором температура достигает точки росы, то есть воздух насыщается паром и происходит его конденсация.

В современной земной атмосфере холодная ловушка находится на гораздо меньших высотах (между 9 и 17 км) – вблизи границы тропосферы

и стратосферы. Когда водяной пар из нижних слоев поднимается к холодной ловушке, он почти весь успевает сконденсироваться, образовать облака и выпасть в виде осадков на поверхность; в результате наша стратосфера оказывается исключительно сухой, и в космос ускользает мало водорода.

В нормальных условиях относительная концентрация водяного пара, то есть доля элементарного объема воздуха, занятого водяным паром, в холодной ловушке намного меньше, чем в атмосфере под ней, поэтому водяной пар конденсируется здесь вместо того, чтобы подниматься дальше. Однако в приподнятой холодной ловушке, где атмосфера имеет гораздо меньшую плотность, относительная концентрация влаги должна быть примерно такой же, как и в слоях атмосферы, расположенных ближе к поверхности. Поэтому холодная ловушка позволяет значительному количеству влаги уходить в более высокие области, где молекулы H_2O подвергаются «фотодиссоциации», и водород ускользает в космос. В ходе этого процесса менее чем за 30 млн лет может исчезнуть целый океан.

Альтернативой теории разгоняющегося парникового эффекта является теория влажного парника, предполагающая, что Венера когда-то имела океаны, но лишилась их, потому что ее атмосфера у поверхности была чересчур горячей и влажной, а именно: относительная концентрация водяного пара составляла больше 20% по объему. В земных условиях при давлении атмосферы у поверхности в 1 бар такая концентрация может быть достигнута, если температура поверхности поднимается выше 70°C (на Земле максимальная концентрация пара может достигать лишь 4%).

Результаты расчетов показывают, что на Венере имелись все условия для возникновения влажного парника: сверхкритическая интенсивность солнечного излучения, проходящего сквозь атмосферу, свободную от облаков, и 20%-я концентрация водяного пара у поверхности планеты. В таких условиях адиабатически поднимающийся воздух при конденсации выделяет огромное количество тепла, приводящего к значительному дополнительному нагреву атмосферы. В результате этого уровень достижения точки росы сдвигается вверх, то есть, как в случае разгоняющегося парникового эффекта, происходит подъем холодной ловушки. Таким образом, и в этой модели вода получает условия для конденсации только на очень больших высотах, где вместо конденсации происходит ее диссоциация.

Независимо от того, находилась ли ранняя атмосфера Венеры в состоянии разгоняющегося или влажного парника, она обязательно долж-

на была прийти к современному горячему и сухому состоянию. После исчезновения океанов, если они были, прекратилось формирование карбонатов, и углекислый газ начал накапливаться в атмосфере. В итоге давление в 93 бар в современной атмосфере планеты обеспечивается в основном углекислым газом. Газообразные соединения серы, которые первоначально были редки, поскольку они легко растворяются в воде, также накапливались и образовывали облака из капелек серной кислоты, которые сейчас являются одной из отличительных черт Венеры.

Именно углекислый газ, а не расстояние от Венеры до Солнца определяет сегодняшнюю высокую температуру ее поверхности. К Венере приходит в 1,9 раз больше солнечной радиации, чем к Земле, но ее кислотные облака отражают около 80% солнечного света, так что поглощает солнечной энергии Венера значительно меньше, чем Земля. В отсутствие парникового эффекта Венера была бы холоднее Земли и лишь ненамного теплее Марса.

5.3.2 Охлаждение Марса

В современной атмосфере Марса углекислый газ создает давление лишь в 0,006 бар и обеспечивает парниковый эффект с величиной всего 6°C. Возможно, изначально Марс не был холодным, но за прошедшие 4,6 млрд лет его климат испытывал значительные колебания.

Фотографии, сделанные с космических аппаратов *Mariner* и *Viking*, показывают, что поверхность Марса изрезана множеством каналов, большинство из которых могли быть созданы потоками воды. Некоторые из каналов могли образоваться и в холодном климате в результате выходов воды с больших глубин, но сети долин, пересекающих в разных направлениях древнейшие участки поверхности Марса, могли возникнуть, скорее всего, только при более высоких температурах. Скорость эрозии на планете в течение первого миллиарда лет ее истории была гораздо выше, чем сейчас. Этот факт лишний раз свидетельствует в пользу предположения, что когда-то Марс был достаточно теплым для того, чтобы на его поверхности вода оставалась жидкой.

Геологи не знают, насколько горячим был Марс, но его поверхность могла бы нагреваться благодаря парниковому эффекту плотной атмосферы, состоящей из углекислого газа. Расчеты показывают, что количество углекислого газа, создающее давление в 1–5 бар, могло бы сохранить

часть марсианской поверхности от замерзания на раннем этапе истории планеты. Нижний предел относится к условиям на марсианском экваторе и к тому моменту, когда планета приближается к Солнцу; верхний – к средним условиям на планете.

Возможно, когда-то атмосфера Марса действительно содержала количество углекислого газа, в 150–800 раз превышающее нынешнее его содержание. Если бы в атмосфере Марса, масса которого составляет примерно одну десятую от массы Земли, находилось такое же относительное количество углекислого газа, он бы создавал давление 10 бар. Чтобы получить эту оценку, необходимо учесть меньшую площадь поверхности и меньшее ускорение силы тяжести на Марсе по сравнению с Землей.

Марс имел достаточные запасы CO_2 , но остыл, поскольку там ослаб круговорот CO_2 . В противном случае эрозия пород могла бы привести к тому, что углекислый газ был бы удален из атмосферы примерно за 10 млн лет, а, как известно, атмосфера оставалась богатой углекислым газом значительно дольше. Ключ к отгадке дают сети каналов: возраст тех из них, что расположены на древнейших возвышенностях, может быть определен по количеству покрывающих их метеоритных кратеров. Используя эту идею, ученые пришли к выводу, что указанные сети каналов уже существовали, когда окончилась самая мощная метеоритная бомбардировка – около 3,8 млрд лет назад.

Система круговорота, возможно, выводила CO_2 из атмосферы благодаря тем же процессам эрозии, что и на Земле. Однако механизм, который возвращал газ в окружающую среду, мог быть существенно иным, поскольку на такой маленькой планете, как Марс, вероятно, отсутствовала ярко выраженная тектоника плит.

Одна из возможностей состоит в том, что вулканическая лава покрывала карбонатные осадки, которые под этой тяжестью погружались на глубины, где под воздействием давления и тепла выделялся CO_2 в газообразном виде. Численные модели показывают, что такой процесс мог обеспечивать круговорот углекислого газа в течение первого миллиарда лет после образования планеты.

Марс, очевидно, охлаждался не потому, что получал меньше солнечного света, чем Земля, а потому, что сам был меньше. Марс обладал меньшими запасами внутреннего тепла уже во время своего формирования, а из-за большего отношения площади поверхности к объему он к тому же быстрее терял это тепло. В конце концов, его недра стали настоль-

ко холодными, что потеряли способность высвобождать углекислый газ из карбонатных пород. Весь CO_2 , вымываемый из атмосферы, оставался заключенным в грунте. Марсианская атмосфера становилась все «тоньше», и климат приближался к нынешнему холодному состоянию. Если бы Марс был сравним по размерам с Землей, то его внутреннего тепла могло бы оказаться достаточно для «воспроизводства» углекислого газа и компенсации нехватки солнечного тепла.

Приведенные рассуждения указывают на то, что в коре Марса должно находиться достаточно большое количество карбонатных пород. Однако до сих пор они не обнаружены ни спектроскопическими измерениями, ведущимися с Земли, ни космическими аппаратами, доставившими образцы марсианского грунта на Землю.

5.3.3. Развитие климата Земли

Умеренный климат, всегда существовавший на Земле, в первую очередь обязан своим происхождением особенностям механизма газообмена на нашей планете. Марс сейчас «заморожен», поскольку он потерял способность возвращать газ в атмосферу, а на Венере – пекло, поскольку там, наоборот, отсутствует механизм выведения углекислого газа из атмосферы. На Земле действуют несколько механизмов, регулирующих содержание углекислого газа в атмосфере: карбонатно-силикатный цикл, биологический круговорот CO_2 , обмен CO_2 в системе океан–атмосфера.

1. Карбонатно-силикатный геохимический цикл, примерной продолжительностью свыше 500 тыс. лет, отвечает за 80% обмена углекислым газом между планетой и ее атмосферой. Цикл начинается с образования угольной кислоты (H_2CO_3) в атмосфере, когда содержащийся в ней углекислый газ растворяется в капельках воды, выпадающей затем в виде дождевых осадков на земную поверхность. Угольная кислота вступает в реакцию с кальциево-силикатными минералами (соединения кальция, кремния и кислорода), находящимися на поверхности, и высвобождает ионы кальция и бикарбоната (Ca^{++} и HCO_3^-), которые поступают в грунтовые и поверхностные воды и в конечном счете попадают в океан.

В океанах и морях ионы кальция и бикарбоната извлекаются морскими организмами для строительства своих скелетов, покровов, оболочек, а затем, после отмирания организма, на дне водоемов формируются карбонатные осадочные породы.

Согласно теории литосферных плит, объясняющей движение отдельных блоков литосферы, рано или поздно осадочные породы океанического дна должны погрузиться в недра Земли. Здесь в условиях высокой температуры и давления происходит карбонатный метаморфизм – карбонат кальция соединяется с кремнием (кварцем), образуя силикатные породы и выделяя газообразный CO_2 , возвращающийся в атмосферу через вулканы, срединно-океанические хребты, рифтовые зоны.



Рис. 69. Карбонатно-силикатный геохимический цикл

Сущность теории литосферных плит состоит в том, что тепло, образующееся в недрах Земли за счет радиоактивного распада долгоживущих ядер, физико-химических процессов, приливного трения и других источников, из-за больших размеров планеты не может быть отведено только за счет теплопроводности. Поэтому оно отводится за счет очень медленной циркуляции относительно пластичных пород в недрах Земли, то есть, тепловая энергия недр переходит в механическую энергию движущихся литосферных плит. Конвективные процессы в мантии, сопровождающиеся подъемами и опусканиями материала (восходящий и нисходящий ток), приводят к растрескиванию вышележащей толщи литосферы на отдельные блоки, отделяющиеся друг от друга глубинными разломами – рифтами. Взаимодействие между плитами осуществляется различными способами.

Спрединг – раздвигание, когда одна плита по рифту отдалается от другой поднимающимся из недр веществом мантии, при этом может про-

исходить расширение морского дна (Атлантической океан), удаление одного участка суши от другого (полуостров Калифорния, Красное море).

Субдукция – надвигание одной плиты на другую. Типичным местом субдукции являются островные дуги в западной части Тихого океана (Японские острова, Филиппинские, Марианские, многие другие острова Океании), Карибские острова, горные системы Кордильер, Гималаев.

Коллизия – жесткие деформации возникают, когда движение плиты ограничено в силу каких-либо причин. Пограничные участки плит трутся друг о друга, крошатся, вызывая на поверхности Земли разломы, провоцируя землетрясения и другие тектонические проявления. Такое взаимодействие наблюдается на суше (озеро Байкал, Восточно-Африканский разлом, горные узлы Армянского нагорья, Кавказ).

Карбонатно-силикатный цикл будет происходить до тех пор, пока в недрах Земли выделяется тепло. Если Земля остынет настолько, что движение плит прекратится, то это станет началом конца жизни на Земле.

2. Поскольку живые организмы играют важную роль в круговороте углекислого газа, так как важнейшим звеном карбонатно-силикатного цикла являются морские организмы, можно предположить, что биота несет главную ответственность за изменения климата Земли. Уменьшение содержания CO_2 в атмосфере в течение всей геологической истории Земли было прямым следствием биологического «вмешательства», без живых организмов развитие земного климата, возможно, могло пойти по другому пути.

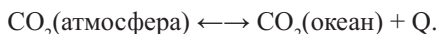
Углекислый газ, который не участвует в карбонатно-силикатном цикле (около 20%), поглощается фотосинтезирующими растениями и таким образом выводится из атмосферы. Когда растения умирают, входящий в их состав углерод либо откладывается в осадочных породах и далее становится участником карбонатно-силикатного цикла, либо после разложения органики (детритизации) вновь возвращается в атмосферу. Часть CO_2 может накапливаться в почве.

Несмотря на все сказанное, предполагается, что на уровень содержания CO_2 в атмосфере большее влияние оказывают физические, а не биологические процессы. Можно утверждать, что, если бы даже раковинные организмы, переносящие в конечном счете карбонат кальция на дно моря, не существовали, концентрация ионов кальция и бикарбоната в морской воде все равно возрастала бы. По достижении определенного уровня концентрации карбонат кальция мог бы формироваться и без участия живых

организмов, что, видимо, и происходило более 600 млн лет назад, когда появились первые раковинные организмы.

Расчеты показывают, что если бы произошло уменьшение вымывания силикатов, вызванное полным исчезновением наземной растительности, то оно могло бы быть полностью компенсировано повышением температуры среды на 10°C. Температура может повыситься только потому, что концентрация неиспользуемого растениями углекислого газа возрастет и усилит парниковый эффект. Это, в свою очередь, повлечет увеличение испарения с поверхности Земли, а поступающий в атмосферу водяной пар также приведет к дополнительному усилению парникового эффекта. Одновременно увеличится количество выпадающих осадков, и далее по схеме карбонатно-силикатного цикла: образование в атмосфере угольной кислоты, выпадение подкисленных осадков, их взаимодействие с карбонатно-силикатными минералами, усиленный снос ионов кальция и бикарбоната в океан, где, при их повышенной концентрации, бикарбонат кальция сможет образовываться без участия биоты.

3. В отличие от Марса и Венеры, Земля обладает уникальным механизмом регуляции углекислого газа в атмосфере, ставшим возможным благодаря наличию огромных масс жидкой воды. В океанических водах растворено углекислого газа почти в 59–60 раз больше, чем его содержится в атмосфере, что связано со способностью газов растворяться в воде и покидать эту среду. Согласно закону Генри, между парциальным давлением газа в атмосфере и его концентрацией в гидросфере устанавливается динамическое равновесие, которое можно представить следующим образом:



Существует отрицательная температурная зависимость растворимости CO_2 в океанических водах. При растворении CO_2 в воде выделяется теплота, а при выделении газа из воды (при дегазации) теплота поглощается. В соответствии с принципом Ле-Шателье, увеличение температуры смещает равновесие влево (в сторону эндотермического процесса). Следовательно, увеличение температуры приводит к увеличению концентрации CO_2 в атмосфере, понижение – к увеличению концентрации газа в океане.

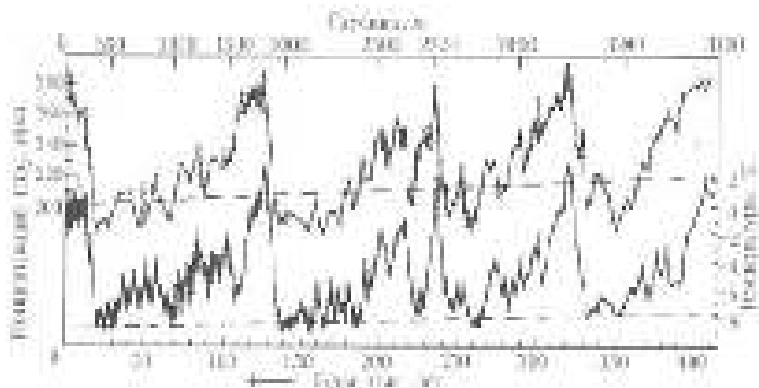


Рис. 70. Корреляция изменений концентраций углекислого газа с колебаниями температуры воздуха

Поскольку равновесие не устанавливается мгновенно, ход температурной кривой опережает изменения CO_2 . Сначала происходит изменение температуры, и только после полного перемешивания вод Мирового океана (время порядка тысячи лет) устанавливается равновесная концентрация CO_2 в атмосфере, при этом общее количество (масса) углекислого газа в системе океан – атмосфера не изменяется.

Такие выводы подтверждаются данными, полученными на станции «Восток», по керну антарктического льда из скважины, пробуренной до глубины 3623 м, который позволяет проследить изменения температуры и содержания CO_2 в атмосфере за последние 420 тыс. лет (рис. 70). Как видно, тренд температурной кривой (штриховые линии) отмечает общее похолодание климата (время направлено справа налево), хотя размах локальных колебаний температуры между ледниковыми эпохами и межледниковыми стадиями может достигать 10°C . Ход температурной кривой опережает изменения CO_2 приблизительно на 600 лет. Запаздывание кривой CO_2 при похолодании климата еще выше и заметно даже на глаз. Повидимому, в настоящее время мы живем в эпоху снижения температуры и повышения или стабилизации концентрации CO_2 в атмосфере.

Рассмотренные выше механизмы регулирования содержания углекислого газа в атмосфере Земли имеют принципиальные различия: карбонатно-силикатный цикл и биологический круговорот CO_2 действуют по принципу отрицательной обратной связи, а газообмен в системе океан

– атмосфера построен на прямой связи. Отрицательная обратная связь характерна для саморегулируемых систем, которые способны длительное время функционировать, поддерживая систему в состоянии динамического равновесия. Что касается третьего механизма, то прямая зависимость концентрации CO_2 в атмосфере от температуры поверхности может приводить к значительным отклонениям системы от состояния равновесия, результатом этих отклонений на протяжении геологической истории Земли были ледниковые периоды и периоды потепления, своего рода экологические кризисы, изменяющие направление и интенсивность экзогенных процессов, заставляющие биосферу Земли перестраиваться или адаптироваться к новым условиям.

Несмотря ни на что, Земля всегда оставалась обитаемой. В этом заслуга совместного действия всех трех механизмов регуляции содержания CO_2 в различных средах и в атмосфере в первую очередь, а также наличия океанов, которые, в случае повышения температуры, испаряют больше влаги. Атмосферные осадки не только вымывают углекислый газ из атмосферы, понижая парниковый эффект, но пары воды, конденсируясь в свободной атмосфере, создают облачный покров, усиливающий альбедо Земли, а также усиленно питают центры оледенений в полярных областях и в горах, в результате чего площадь оледенения увеличивается, воздух над ледниками охлаждается, и, благодаря циркуляции атмосферы, средняя температура атмосферы понижается.

Как бы ни была велика роль водяного пара, который дает сегодня наибольший вклад в парниковый эффект (78%), ответственность за сохранение умеренного климата планеты на протяжении ее истории лежит не на нем.

Чтобы объяснить тот факт, что, несмотря на увеличение светимости Солнца, температура земной поверхности в прошлом не росла неуклонно, а оставалась в допустимых для существования жизни пределах, необходимо опираться на предположение, что основную роль в этом играло изменение содержания углекислого газа в атмосфере.

Снижение содержания CO_2 со скоростью, точно компенсирующей возрастание светимости Солнца, объяснило бы тот факт, что температура на Земле менялась незначительно. Такая компенсирующая скорость была рассчитана с большой точностью, причем малейшие отклонения в изменении состава атмосферы делали планету непригодной для жизни: слишком медленное убывание содержания CO_2 превращало Землю в пекло, слишком быстрое – приводило к замерзанию океанов.

Еще одно объяснение сохранения умеренного климата состоит в том, что в отдаленном прошлом парниковый эффект был сильнее благодаря аммиаку (NH_3) – эффективному поглотителю инфракрасного излучения. Но под действием солнечного света аммиак быстро превращается в газы, не создающие парниковый эффект – азот и водород, но, возможно, для самого раннего этапа развития планеты его было достаточно для того, чтобы вместе с вымывающимся из атмосферы углекислым газом оберегать Землю от замерзания.

Углекислый газ – не так легко разрушается солнечным светом. На Земле его запасов, сосредоточенных в карбонатных осадочных породах, достаточно для создания атмосферного давления в 60 бар. В современной атмосфере углекислый газ создает давление 0,0003 бар. Если бы в первоначальной атмосфере Земли присутствовало количество углекислого газа, соответствующее давлению хотя бы в несколько десятых долей бара, создаваемый им дополнительный парниковый нагрев мог бы компенсировать нехватку солнечного тепла.

Все эти рассуждения о роли химического состава земной атмосферы имеют значение при моделировании климатических изменений уже состоявшегося факта: «Земля имеет умеренный климат, пригодный для жизни». Главная причина формирования умеренного климата планеты, как показали расчеты, заключается в следующем. Если бы Земля образовалась на 5% а. е. ближе к Солнцу, то атмосфера стала бы настолько горячей, что океаны испарились бы (такой процесс известен как разгоняющийся парниковый эффект). Напротив, если бы планета сформировалась всего на 1% а. е. дальше от Солнца, она попала бы в условия разгоняющегося оледенения. Только возникнув в относительно узком поясе орбит – между 0,95 и 1,01 а. е., Земля получила исключительные преимущества, чтобы избежать судьбы Марса или Венеры. Эта узкая полоса орбит была названа «непрерывно обитаемой зоной» (НОЗ).

5.4. Непрерывно обитаемая зона

Вывод, что планета, на которую падает поток солнечной энергии, в 1,1 раз больший, чем на Землю, должна потерять содержащуюся на ней воду в результате фотодиссоциации молекул водяного пара, согласуется с расчетами, составляющими для внутренней границы непрерывно оби-

таемой зоны значение около 0,95 а. е. Конечно, планета на внутренней границе НОЗ не может быть обитаемой долго. Светимость Солнца постоянно возрастает (на 1% каждые 100 млн лет). Следовательно, примерно через миллиард лет на Земле могут возникнуть условия, угрожающие сохранению воды на планете. Эта опасность может быть отсрочена на некоторое время благодаря уменьшению количества атмосферного углекислого газа, обусловленному карбонатно-силикатным циклом. Однако такое уменьшение может стать губительным для биоты, поскольку многие растения не в состоянии осуществлять фотосинтез, если получают значительно меньше углекислого газа, чем сейчас.

Внешняя граница НОЗ должна располагаться значительно дальше, возможно, на расстоянии 1,5 а. е. от Солнца, т. е. где-то в районе орбиты Марса.

Многие из тех механизмов отрицательной обратной связи, которые способствовали стабилизации земного климата на протяжении 4,5 млрд лет, возможно, действовали бы и на другой планете такого же размера, расположенной дальше от Солнца.

Единственная причина, почему замерз Марс, состоит в том, что он слишком мал для существования на нем круговорота углекислого газа. Планета размером с Землю на орбите Марса должна, теоретически, иметь атмосферу с давлением CO_2 в несколько бар и средней температурой у поверхности выше точки замерзания воды. Такая атмосфера была бы непригодной для человеческого существования, но вполне приемлемой для некоторых иных форм жизни.

Когда впервые было выдвинуто утверждение, что непрерывно обитаемая зона заключена в чрезвычайно узкой полосе, то возникло предположение, что, если вокруг других звезд и существуют планетные системы, шансы обнаружить похожие на Землю планеты очень малы. Но дальнейшие расчеты приводят к противоположному выводу. Если другие планетные системы существуют, то имеется большая вероятность найти в них планеты, пригодные для жизни. Являются ли какие-нибудь из них обитаемыми в действительности? – этот вопрос остается открытым, но он не может больше отвергаться на основании предположения о климатической уникальности Земли.

5.5. Заключение. Антропный принцип

Земля – одна из основных стихий мироздания, наряду с огнем, воздухом и водой. Значительная часть сюжетов космогонических мифов с участием обожествленной Земли рассказывает о первоначальной божественной паре – Небе и Земле, союз которых послужил началом жизни во Вселенной, и от которого произошли остальные боги. Персонифицированная в образе богини – супруги Неба – Земля фигурирует в мифологиях почти всех народов.

Идеи появления на Земле жизни и мыслящего наблюдателя за глобальными свойствами Вселенной выдвигали А.Л. Зельманов и Дж. Уилкер, С. Хокинг и П. Девис, что связано с высокой чувствительностью Вселенной к численным значениям целого ряда фундаментальных физических констант, даже незначительное изменение которых могло бы иметь последствия, ставившие под сомнение само существование и Вселенной, и тем более жизни в ней.

До Эйнштейна Вселенную представляли в виде пространства-ящика, внутри которого перемещаются, взаимодействуя, различные материальные объекты. Общая теория относительности показала, что свойства пространства и материи неразрывно связаны друг с другом и пространство может менять свои характеристики под воздействием материи и энергии. Оказалось, что сама Вселенная – ее размеры и скорость расширения, а также ее будущее развитие – зависит от образующей ее материи.

Самым животрепещущим вопросом всех времен остается вопрос о происхождении жизни на Земле (жизнь пока больше нигде не обнаружена).

Сопоставление свойств мира с возможностью существования жизни стали именовать антропным принципом с середины XX века. Если вольно трактовать антропный принцип, то он утверждает, что мир создан для того, чтобы в нем мог появиться человек. Этот принцип начал широко обсуждаться после выхода книги Б. Картера «Совпадение больших чисел и антропологический принцип в космологии», в которой антропный принцип объясняется следующим образом: «...то, что мы ожидаем наблюдать, должно быть ограничено условиями, необходимыми для нашего существования как наблюдателей» или «Вселенная должна быть такой, чтобы в ней на некотором этапе эволюции допускалось существование наблюдателей».

Другими словами, антропный принцип говорит о том, что свойства Вселенной приспособлены для возникновения разумной жизни, поскольку в ней присутствуем мы, наблюдатели, способные задаться вопросом о свойствах Вселенной. При других ее параметрах невозможны сложные структуры и существование разумных наблюдателей.

В толковании антропного принципа пока нет единого мнения, как и в научном диспуте о существовании других вселенных. Голоса разделяются на категоричные – «это не наука», на равнодушные – «мне нет до этого дела, я изучаю конкретный физический процесс в нашей Вселенной, а информация о других вселенных все равно недоступна» и, наконец, восторженные – о возможных взаимосвязях бесконечного множества вселенных.

В статьях, посвященных рождению и развитию разного рода вселенных, обычно не обсуждается вопрос о том, где все эти вселенные находятся, как они сосуществуют и могут ли взаимодействовать между собой. Авторы научных работ сосредотачивают основное внимание на допустимых свойствах гипотетических миров. Возможно, вселенные находятся на колоссальных расстояниях друг от друга, многократно превышающих размер видимой нами части Вселенной. Как считают ученые, весь мир, возникший после Большого взрыва, во много раз превышает ту его часть, которую мы можем увидеть в телескопы. Она составляет всего 10^{28} см, а вся Вселенная имеет к настоящему моменту размер $10^{1\,000\,000\,000\,000}$ см, благодаря Большому взрыву и последующему инфляционному расширению.

Вопросы к 5 главе

1. Чем обусловлена эффективность поглощения солнечной радиации поверхностью планет?
2. Значение и роль какого фактора эволюции убывает с течением времени?
3. Чем объясняется разница в интенсивности экзогенных процессов на Меркурии и на Марсе?
4. В чем сущность метеоритного удара?
5. Что способствует сглаживанию эффекта метеоритной бомбардировки на планетах, имеющих внешние оболочки?
6. Какие формы рельефа возникают на поверхности планет в результате падения метеоритов?
7. Какие петрографические изменения претерпевает поверхность грунта планеты в результате метеоритной бомбардировки?

8. Почему метеоритную бомбардировку относят к фундаментальному космическому процессу?
9. Какие процессы обеспечивает эндогенная энергия?
10. В чем сущность борьбы эндогенных и экзогенных процессов?
11. Какие фазы эволюции являются общими для всех планет земной группы?
12. Почему дифференциация вещества планет была возможна на самых ранних стадиях эволюции?
13. Почему при достижении температуры 100°C, в процессе остывания, наступил переломный момент в дальнейшей эволюции планет?
14. Что стало причиной утери внешних оболочек (атмосферы, гидросферы) некоторыми внутренними планетами?
15. Какие планеты и почему в одних случаях сохранили «лунный рельеф», а другие полностью или частично его утратили?
16. Чем объяснить отсутствие жидкой воды на Марсе?
17. Какие экзогенные процессы уничтожили «лунный рельеф» на Марсе?
18. От чего зависит величина солнечной постоянной?
19. На что влияют периоды осевого и орбитального вращения планет?
20. От чего зависит величина поглощения планетой солнечной энергии?
21. Что такое парниковый эффект и от чего зависит его величина?
22. Какие теории объясняют потерю воды Венерой?
23. Какой фактор сыграл решающую роль в замерзании Марса?
24. Какие механизмы контролируют содержание углекислого газа в атмосфере Земли?
25. Какова продолжительность карбонатно-силикатного цикла, и как долго он может происходить на Земле?
26. Как зависит растворимость газов в воде от температуры?
27. Как связаны между собой температурные изменения атмосферы и содержание в ней CO_2 ? Приведите доказательства.
28. Что такое НОЗ?
29. Что нового в понимание мира внесла общая теория относительности?
30. Что такое «антропный принцип»?

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В. В., Зайцев С. И., Лямин М. Я., Киселева С. В.* Физика атмосферы и океана // Изв. АН СССР. 1987. № 10. Т. 23. С. 1055–1059.
2. *Бакулин П. И., Кононович Э. В., Мороз В. И.* Курс общей астрономии: учебник. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 500 с.
3. *Вегенер А.* Возникновение материков и океанов. М.: ГИЗ, 1925. 145 с.
4. *Голицин Г. С.* Введение в динамику планетных атмосфер. М.: Гидрометеониздат, 1973. 104 с.
5. *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975. 736 с.
6. *Криволацкий А. Е.* Голубая планета: (Земля среди планет. Геогр. аспект). М.: Мысль, 1985. 335 с., ил.
7. *Маров М. Я.* Планеты Солнечной системы. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1986. 320 с.
8. *Монин А. С., Шишков Ю. А.* История климата. Гидрометеониздат, Л., 1979. 406 с.
9. *Мусатов Ю. Е.* Антропный принцип и геотектоническая эволюция Земли // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 2008. Вып. 1. С. 55–61.
10. Новая глобальная тектоника (тектоника плит). М.: Мир, 1974. 471 с.
11. *Рускол Е. Л.* Происхождение планет и спутников // Земля и Вселенная. 2002. № 2. С. 38.
12. *Сафронов В. С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
13. *Сорохтин О. Г.* Парниковый эффект: миф и реальность // Вестник РАЕН. 2001. Т. 1. № 1. С. 6–21.
14. *Хаин В. Е.* Современная геодинамика: достижения и проблемы // Природа. 2002. № 1. С. 52–59.
15. *Хокинг С.* Краткая история времени. От Большого взрыва до черных дыр. СПб.: Амфора, 2001. 268 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Основные характеристики планет

Параметры	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Среднее расстояние от Солнца, а. е.	0,387	0,723	1,000	1,524	5,20	9,54	19,18	30,07	39,44
Сидерический период обращения	88,0 сут.	224,7 сут.	365,3 сут.	687,0 сут.	11,86 лет	29,46 лет	84,01 лет	164,8 лет	247,7 лет
Синодический период обращения, сут.	115,9	583,9		779,9	398,9	378,1	369,7	367,5	366,7
Эксцентриситет орбиты	0,2066	0,0067	0,0167	0,0934	0,0484	0,0557	0,0471	0,0087	0,247
Наклонение орбиты к эклиптике	7°01'	3°24'		1°51'	1°17'	2°29'	0°46'	1°46'	17°08'
Экваториальный радиус, км	2439	6051	6378	3393	71400	60400	24300	25050	1500(?)
Сжатие	0,000	0,000	0,0034	0,0052	0,062	0,103	0,006	0,02	(?)
Масса, г	3,28 10 ²⁶	4,88 10 ²⁷	5,98 10 ²⁷	6,40 10 ²⁶	1,90 10 ³⁰	5,68 10 ²⁹	8,70 10 ²⁸	1,03 10 ²⁹	1,0 10 ²⁵
Масса (в единицах земной массы)	0,005	0,816	1,000	0,107	318	95,1	14,6	17,2	0,0017
Средняя плотность, г/см ³	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,6	1,7	0,7(?)
Ускорение силы тяжести на экваторе, см·с ⁻²	370	887	981	371	2500	1100	950	1150	7,5
Параболическая скорость, км/с	4,3	10,4	11,2	5,0	6,1	36	22	24	0,7
Период вращения	58,8 сут.	243 сут.	23 ^h 56 ^m 4,1 ^s	24 ^h 37 ^m 22,6 ^s	9 ^h 50,5 ^m	10 ^h 14 ^m	10 ^h 49 ^m	15 ^h 40 ^m	6 ^h 16 ^m
Наклон экватора к плоскости орбиты	7°	3°24'	23°27'	25°12'	3°07'	26°45'	82°	29°	(?)
Визуальная звездная величина*	-0,2	-4,1		-1,9	-2,4	+0,8	+5,8	+7,6	+14,7
Сферическое альbedo**	0,006	0,75	0,36	0,24	0,50	0,76	0,62	0,50	0,09

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Солнечная постоянная, Втм ⁻²	13600	2600	1360	586	50,3	15,0	3,70	1,50	0,87
Средняя эффективная температура, К	440	231	249	210	134	97	54(?)	56(?)	43(?)
Температура поверхности, К***	750(100)	735	288	300(147)					
Атмосферное давление у поверхности, атм.	<10 ⁻¹⁰	90	1,0	0,006					
Число известных спутников (естественных)	0	0	1	2	15	16	5	2	1

* Меркурий и Венера в квадратуре, остальные в противостоянии.

** Для Венеры, Земли, Марса и Юпитера – интегральное, для других планет – визуальное.

*** Для Меркурия и Марса первая цифра – максимальная температура (полдень, экватор), вторая – минимальная, для Земли и Венеры дано среднее значение температуры.

Характеристика Плутона оставлена в таблице для сравнения.

Таблица 2

Основные параметры атмосфер планет

Параметры	Земля	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер
Химический состав (объемные % по отношению к средней плотности ρ)	N ₂ 78; O ₂ 21; Ar 0,93; H ₂ O 0,1–1; CO ₂ 0,03; CO 10 ⁻⁵ ; CH ₄ 10 ⁻⁴ ; H ₂ 5·10 ⁻⁵ ; Ne 2·10 ⁻³ ; He 10 ⁻⁴ ; Kr 10 ⁻⁴ ; Xe 10 ⁻⁶	He ≤ 20 H ₂ ≤ 18 Ne ≤ 40–60 Ar ≤ 2 CO ₂ ≤ 2	CO ₂ 95; N ₂ 2–3; Ar 0,01; H ₂ O 0,01–0,1; CO 3·10 ⁻³ ; HCl 4·10 ⁻⁵ ; HF 10 ⁻⁶ ; O ₂ < 2·10 ⁻⁴ ; SO ₂ 10 ⁻² ; O ₃ ; CH ₄ 10 ⁻⁴ ; H ₂ S 8·10 ⁻³ ; Ne 10 ⁻³ ; Kr 4·10 ⁻³ ; Xe 10 ⁻⁶	CO ₂ 95; N ₂ 2–3; Ar 1–2; H ₂ O 10 ⁻³ –10 ⁻² ; CO 4·10 ⁻³ ; O ₂ < 0,1– ² ; NH ₃ 2·10 ⁻² ; HCN 10 ⁻⁵ ; HF 10 ⁻⁶ ; O ₂ < 2·10 ⁻⁴ ; 0,4; Ne < 10 ⁻³ ; Kr < 2·10 ⁻³ ; Xe < 10 ⁻³	H ₂ 87; He 12,8; H ₂ O 10 ⁻⁴ ; CH ₄ 7·10 ⁻² ; NH ₃ 2·10 ⁻² ; HCN 10 ⁻⁵ ; CO ₂ H ₆ 4·10 ⁻² ; C ₂ H ₂ 8·10 ⁻³ ; PH ₃ 4·10 ⁻⁵ ; CO 2·10 ⁻⁷
Средняя молекулярная масса	28,97		43,2	43,5	2,25
Температура у поверхности (К) T _{max} –T _{min}	310–240	500–110	740	270–200	135
Среднее давление у поверхности P (атм)	1	< 2·10 ⁻¹⁴	95	6·10 ⁻³	0,5
Средняя плотность у поверхности (ρ) г/см ³	1,27·10 ⁻³	< 10 ⁻¹⁷	61·10 ⁻³	1,2·10 ⁻⁵	10 ⁻⁴

Параметры орбиты и физические характеристики спутников

Спутник	Сидерический период обращения в земных сутках	Синодический период обращения	Эксцентриситет	Наклон к экватору планеты	Радиус, км	Масса в единицах массы планеты
1	2	3	4	5	6	7
Луна	27.321661	29d 12h 44m 03s	0.0549	18.3-28.6°	1738	0.01230
Фобос	0.318910	07 39 27	0.015	1.02	14 x 10	1.82·10 ⁻⁸
Деймос	1.262441	1 06 21 16	0.00052	0.9-2.7	8 x 6	2.14·10 ⁻⁹
Метидя	0.2948	–	< 0.004	ок.0	ок. 20	ок.3·10 ⁻¹¹
Адрастея	0.2983	–	ок.0.0	ок.0	12x8	ок.3·10 ⁻¹¹
Амальтея	0.4981	11 57 28	0.003	0.4	135x75	ок.10 ⁻⁸
Фива	0.6745	–	0.015	ок.0.8	ок. 50	ок.3·10 ⁻¹⁰
Ио	1.7691	–	0.0041	0.04	1815	4.70·10 ⁻⁵
Европа	3.551	3 13 17 54	0.0101	0.470	1569	2.57·10 ⁻⁵
Ганимед	7.155	7 03 59 36	0.0006	0.195	2631	7.84·10 ⁻⁵
Каллисто	16.689	16 18 05 07	0.007	0.281	2400	5.60·10 ⁻⁵
Леда	238.72	–	0.148	27	ок. 8	ок.5·10 ⁻¹³
Гималия	250.57	260 00	0.158	28	ок. 90	ок.3·10 ⁻⁹
Лиситея	259.22	276	0.107	29.0	ок. 20	ок.4·10 ⁻¹²
Элара	259.65	276 10	0.207	28	ок. 40	ок.3·10 ⁻¹⁰
Ананке	631	540	0.169	147	ок. 15	ок.4·10 ⁻¹²

1	2	3	4	5	6	7
Карме	692	599	0.207	163	ок. 22	ок. 10^{-11}
Пасифе	735	633	0.38	147	ок. 35	ок. $3 \cdot 10^{-11}$
Синопе	758	629	0.28	153	ок. 20	ок. 10^{-11}
Атлас	0.602	–	ок. 0.0	ок. 0.0	20x15	–
Прометей	0.613	–	0.003	ок. 0.0	70x40	–
Пандора	0.629	–	0.004	ок. 0.0	55x35	–
Эпиметей	0.694	–	0.009	0.34	70x50	–
Янус	0.695	–	0.007	0.14	110x80	–
Мимас	0.942	22 37 12	0.0202	1.53	195	$6.50 \cdot 10^{-8}$
Энцелад	1.370	1 08 53 22	0.0045	0.02	250	$1.48 \cdot 10^{-7}$
Тетфия	1.888	1 21 18 55	0.000	1.09	525	$1.09 \cdot 10^{-6}$
Телесто	1.888	–	ок. 0	ок. 0	ок. 12	–
Калипсо	1.888	–	ок. 0	ок. 0	15x10	–
Диона	2.737	2 17 42 10	0.0022	0.02	560	$2.04 \cdot 10^{-6}$
Елена	2.7369	–	0.005	0.2	18x15	–
Рея	4.518	4 12 27 56	0.0010	0.35	765	–
Титан	15.945	15 23 15 25	0.0292	0.33	2575	$2.46 \cdot 10^{-4}$
Гиперион	21.277	21 07 39 06	0.1042	0.43	175x100	–
Япет	79.331	79 22 04 56	0.0283	14.72	720	–
Феба	550.48	536 16	0.163	175.3	110	–
Корделия	0.33503	-	< 0.001	ок. 0.14	ок. 15	-

1	2	3	4	5	6	7
Офелия	0.37641	–	0.01	ок.0.09	ок. 15	–
Бианка	0.435	–	<0.001	ок.0.16	ок. 20	–
Крессида	0.46357	–	<0.001	ок.0.04	ок. 35	–
Дездемона	0.47355	–	<0.001	ок.0.16	ок. 30	–
Джульетта	0.4931	–	<0.001	ок.0.06	ок. 40	–
Порция	0.5132	–	<0.001	ок.0.09	ок. 55	–
Розалинда	0.5585	–	<0.001	ок.0.28	ок. 30	–
Белинда	0.62352	–	<0.001	ок.0.03	ок. 35	–
Пак	0.76183	–	<0.001	ок.0.31	75	–
Миранда	1.41348	–	0.0027	3.40	235	$1.0 \cdot 10^{-7}$
Ариэль	2.52038	2 12	0.0034	0.00	580	$1.1 \cdot 10^{-5}$
Умбриэль	4.14418	4 03	0.0050	0.00	585	$1.1 \cdot 10^{-5}$
Титания	8.70587	–	0.0022	0.00	790	$3.2 \cdot 10^{-5}$
Оберон	13.46324	13 11	0.0008	0.00	760	$3.4 \cdot 10^{-5}$
Наяда	0.296	–	–	ок.0	ок. 25	–
Таласса	0.312	–	–	ок.4.5	ок. 40	–
Деспина	0.333	–	–	ок.0	ок. 90	–
Галатея	0.429	–	–	ок.0	ок. 75	–
Ларисса	0.554	–	–	ок.0	ок. 95	–
Протей	1.121	–	–	ок.0	ок. 200	–
Тритон	5.87785	5 21	<0.0003	157	1350	$2.2 \cdot 10^{-4}$
Нереида	360.16	-	0.75	29	ок. 170	$5.0 \cdot 10^{-5}$
Харон	6.387217	-	0	98.8	595	$6.4 \cdot 10^{-2}$

Учебное издание

Деляра Иосифовна Тебиева

ПЛАНЕТОЛОГИЯ

Учебное пособие

Редактор **Л. Х. Тургиева**

Компьютерная верстка **Е. В. Осипова**

Подписано в печать 28.02.2015. Лицензия ЛР № 020218.

Формат бумаги 60×84¹/₁₆. Бум. офс. Гарнитура шрифта «Times».

Печать на ризографе. Усл.п.л. 14,5. Уч.-изд.л. 13,48.

Тираж 100 экз. Заказ № 7. С 3.

Издательство Северо-Осетинского государственного университета
имени К. Л. Хетагурова, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 46.