

Министерство образования и науки Российской Федерации
Амурский государственный университет

Г.Г. Охотникова, Т.А. Родина

КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Часть III

Концепции астрономии и геологии

Учебное пособие

(Издание второе)

Благовещенск
Издательство АмГУ
2011

ББК 20 я 73

О 92

*Рекомендовано
учебно-методическим советом университета*

Рецензенты:

*Т.Г. Решетнева, начальник отдела систематизированного учета земельных
ресурсов управления по контролю за использованием земельных ресурсов*

Минприродлесхозимущества Амурской области,

канд. геол.-минер. наук, доцент;

М.А. Мельникова, доцент кафедры химии и естествознания АмГУ,

канд. техн. наук

Охотникова, Г.Г., Родина, Т.А.

О 92 Концепции современного естествознания. Часть III. Концепции астрономии и геологии: учебное пособие / Охотникова Г.Г., Родина Т.А.– 2-е изд., испр. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2011. – 160 с.

Пособие включает две главы из курса «Концепции современного естествознания»: элементы современной астрономической и геологической естественно-научной картины мира. Рассматриваются строение, состав и гипотезы происхождения Солнечной системы и планеты Земля, происхождения и эволюция Вселенной, эволюция и характеристики звезд, основные вопросы космологии, а также основные понятия геологии, строение Земли, ее оболочки и описание основных геологических процессов.

Пособие предназначено для студентов всех специальностей и направлений подготовки, изучающих дисциплину «Концепции современного естествознания», преимущественно рассчитано на самостоятельное изучение ряда вопросов по курсу, и может быть использовано в качестве дополнительного материала при подготовке к семинарским занятиям и работе над рефератами.

ББК 20 я 73

В авторской редакции

©Амурский государственный университет, 2011
© Охотникова, Г.Г., Родина, Т.А., 2011

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	6
АСТРОНОМИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА	8
1. Развитие астрономических знаний	8
1.1 Геоцентрическая система Птолемея И гелиоцентрическая система Аристарха	10
1.2 Становление нового мировоззрения	15
Вопросы для самоконтроля	18
2. Солнечная система	19
2.1 Общие сведения о строении Солнечной системы	19
2.2 Солнце	19
2.3 Планеты и астероиды	26
2.4 Метеориты. Кометы	29
2.5 Облако Оорта и пояс Койпера	31
Вопросы для самоконтроля	34
3. Гипотезы происхождения Солнечной системы	35
3.1 Гипотеза Канта – Лапласа	36
3.2 Гипотеза Джинса и ее развитие	38
3.3 Гипотеза О.Ю. Шмидта	40
3.4 Гипотеза В.Г. Фесенкова	41
3.5 Гипотеза Камерона	42
3.6 Современные представления о формировании планетной системы	43
Вопросы для самоконтроля	47
4 Происхождение и эволюция Вселенной	48
4.1 Классическая космология и ее развитие. Модели Вселенной	48

4.2	Гипотеза Большого Взрыва. Рождение Вселенной и ее эволюция	51
4.3	Экспериментальные основания гипотезы Горячей Вселенной	59
4.4	Модели будущего Вселенной	65
	Вопросы для самоконтроля	67
5	Эволюция звезд	68
5.1	Основные характеристики звезд	68
5.2	Этапы эволюции звезд	69
	Вопросы для самоконтроля	83
6	Структурная иерархия Вселенной	84
	Вопросы для самоконтроля	91
	ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА	92
7	Содержание геологии как науки	92
	Вопросы для самоконтроля	98
8	Исторический очерк развития геологии	99
	Вопросы для самоконтроля	105
9	История формирования Земли. Модели Земли	106
9.1	Гомогенная аккумуляция. Гипотеза О.Ю. Шмидта и его сторонников	106
9.2	Гетерогенная аккумуляция	107
9.3	Частичная гетерогенная аккумуляция	107
9.4	Гипотеза образования Земли как океан – планеты	109
9.5	Модели Земли	110
	Вопросы для самоконтроля	112
10	Внутреннее строение Земли	113
10.1	Ядро	114
10.2	Мантия	115
10.3	Земная кора	118

10.4	Плотность Земли и химический состав земной коры	119
	Вопросы для самоконтроля	122
11	Возраст и виды горных пород	123
11.1	Осадочные горные породы	123
11.2	Магматические горные породы	124
11.3	Метаморфические горные породы	125
11.4	Возраст горных пород	127
	Вопросы для самоконтроля	128
12	Процессы изменения земной коры и модели развития Земли	129
12.1	Эндогенные процессы	130
12.2	Геосинклинальная теория	134
12.3	Дрейф континентов (теория мобилизма)	136
12.4	Экзогенные процессы	138
12.5	Основные процессы образования горных пород	140
	Вопросы для самоконтроля	141
13	Оболочки Земли и их функции	142
13.1	Магнитосфера	142
13.2	Атмосфера	143
13.3	Гидросфера	144
13.4	Геосфера и литосфера	146
13.5	Биосфера	147
	Вопросы для самоконтроля	148
	Библиографический список	150
	Приложения	153

ВВЕДЕНИЕ

Человек образованный и разносторонне развитый должен демонстрировать не только высокий профессиональный уровень знаний в избранной им области деятельности. Университетское образование подразумевает наличие фундаментальных знаний по множеству вопросов в различных отраслях культуры. Одной из таких отраслей является естествознание – совокупность наук о природе, включающая множество направлений. Основными среди них являются физика, химия, биология, геология, астрономия.

Предмет «Концепции современного естествознания» изучается студентами высших учебных заведений дневной, вечерней, заочной и сокращенной форм обучения. В рамках этой дисциплины рассматривается широкий спектр вопросов, решаемых и уже решенных перечисленными ранее отраслями науки, история развития естественно-научных представлений, основные понятия и законы, формирующие наше представление об окружающем мире.

В современной обстановке специалист должен не только многое уметь, но еще больше ЗНАТЬ. Знать, чтобы его деятельность была направлена во благо окружающим, независимо от целей, которых он старается достичь.

Незнание – плохое средство избавиться от беды

– так говорил римский философ Сенека еще в I в. нашей эры.

Сложно предугадать, с какими проблемами придется столкнуться в своей профессиональной деятельности тем, кто сегодня получает образование на экономическом, юридическом, филологическом, социальном или другом факультете ВУЗа. Но чем шире кругозор специалиста любого профиля, тем легче будет ему решить любую поставленную задачу. И знания в области естественных наук не будут лишними, ведь лишних знаний не бывает! С помощью естественно-научных знаний можно решить многие проблемы на Земле. И проблемы эти – экологические и экономические кризисы, демографические проблемы и развитие высоких технологий, повышение благосостояния населения – являются общими для всего человечества.

Данное учебное пособие является частью серии учебников полного курса «Концепции современного естествознания», в котором максимально подробно изложены все вопросы этой обширной отрасли науки.

Пособие может быть использовано при изучении дисциплины «Концепции современного естествознания» и выполнении контрольной работы (реферата) студентами дневной, заочной и сокращенной формы обучения различных специальностей. Представленный в нем материал предназначен, в основном, для самостоятельно изучения ряда разделов естествознания.

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

1. РАЗВИТИЕ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ

Всю свою многовековую историю человек стремился познать окружающий его мир на практике и в теории. Обобщая полученные опытным путем знания, наблюдая повторяющиеся явления, люди от практики постепенно переходили к теории, пытаясь предсказать поведение известных им объектов или исследованных явлений. На основании теории и практики формировались цели и задачи дальнейших исследований в любой области человеческой жизни. Таков весь путь развития естествознания, и астрономия не является исключением.

Наблюдения за видимыми космическими объектами позволили установить закономерности их движения, а потом привели к попыткам объяснения их происхождения. Но такой интерес был вызван не жадой познания, а жизненной необходимостью.

Всем известно, что животные не могут постоянно обитать на одном и том же месте – они мигрируют. Чтобы успешно охотиться, нашим далеким предкам необходимо было представлять себе характер этой миграции. Развитие человека требовало, чтобы он успешно ориентировался в окружающем мире: сезонные изменения в природе вносили свои коррективы в трудовую деятельность человека, направленную в те далекие времена на поддержание жизненных сил.

Движение космических объектов по дневному, а особенно, по ночному небосклону в конечном итоге позволило составить календарь, без которого ни один современный человек уже не обходится.

Успешное получение знаний в этой области привело к увеличению интереса к поведению космических объектов и к продолжению исследований в данной области. Современные археологические находки позволяют сделать об этом вполне определенные выводы. Мегалитические сооружения наших далеких предков вполне серьезно претендуют сегодня на роль первых обсерваторий.

Первые цивилизации также внесли свой вклад в развитие астрономии: три жизненно важных цикла существовало в Древнем Египте, календарь которого основан на астрономических наблюдениях. От правильности определения начала этих циклов зависела жизнь всего населения страны! Велик вклад в развитие астрономии Шумерско-Вавилонской культуры, цивилизаций Центральной Америки, Древнего Китая.

Особое место в истории естествознания отводится античной философии. Именно в Древней Греции, используя полученные ранее знания, были созданы математические методы для их обработки. Полученные в античный период астрономические знания широко использовались сначала учеными арабского Востока, затем – в Европе.

Прошли века, накоплены были новые знания, требующие анализа, обобщения, выводов. Работы Коперника подняли астрономию на новый научный уровень. Наблюдения, гипотезы, теории, законы обращения небесных тел Иогана Кеплера и, наконец, – изобретение телескопа. Джордано Бруно, Тихо Браге, Галилео Галилей – сколько сил, знания и даже жизнью положено на алтарь астрономии, которая уже с XVI в. занимает прочное место в системе естественных наук! Свой вклад в развитие этой науки внес и Исаак Ньютон.

До России волна «астрономического интереса» докатилась в середине XVII в. Реформы Петра I привели к созданию Школы математических и навигацких наук, где преподавалась и астрономия. Немалый вклад в развитие этой науки внесли и русские ученые: Яков Брюс, Леонард Эйлер, Леонтий Магницкий, Михаил Васильевич Ломоносов, Николая Делиль.

В XVII – XVIII в.в. решается один из важнейших географических аспектов – составление карт и определение различных точек на этих картах. Возникает проблема определения географической долготы (определять широту научились еще в античный период). Решение проблемы приводит к созданию ряда обсерваторий, наиболее крупными из которых стали Парижская (1671) и Гринвичская (1676).

В XIX в. формируется одна из важнейших областей астрономии – астрофизика (введена И. Целлером), основой которой стал спектральный анализ. Большое значение в развитие астрономии этого времени сыграло также использование фотографии.

В первой половине XIX в. (1839) астрономической столицей мира становится Пулковская обсерватория, а ее основатель – Фридрих Георг Вильгельм (Василий Яковлевич) Струве – родоначальником династии ученых-астрономов.

1.1. Геоцентрическая система Птолемея и гелиоцентрическая система Аристарха

Путь к пониманию положения нашей планеты и живущего на ней человечества во Вселенной был очень непростым и подчас весьма драматичным. В древности было естественным считать, что Земля является неподвижной, плоской и находится в центре мира. Казалось, что вообще весь мир создан ради человека. Подобные представления получили название антропоцентризма (от греч. *antropos* – человек). Многие идеи и мысли, которые в дальнейшем отразились в современных научных представлениях о природе, в частности в астрономии, зародились в Древней Греции, еще за несколько веков до нашей эры. Трудно перечислить имена всех мыслителей и их гениальные догадки. Выдающийся математик Пифагор (VI в. до н. э.) был убежден, что «в мире правит число». Считается, что именно Пифагор первым высказал мысль о том, что Земля, как и все другие небесные тела, имеет шарообразную форму и находится во Вселенной без всякой опоры. Другой не менее известный ученый древности, Демокрит – основоположник представлений об атомах, живший за 400 лет до нашей эры, – считал, что Солнце во много раз больше Земли, что Луна сама не светится, а лишь отражает солнечный свет, а Млечный Путь состоит из огромного количества звезд. Обобщить знания, которые были накоплены к IV в. до н. э., смог выдающийся философ античного мира Аристотель (384 – 322 гг. до н. э.).

Его деятельность охватывала все естественные науки: сведения о небе и Земле, о закономерностях движения тел, о животных и растениях и т. д. Главной заслугой Аристотеля как ученого – энциклопедиста было создание единой системы научных знаний. На протяжении почти двух тысячелетий его мнение по многим вопросам не подвергалось сомнению. Согласно Аристотелю, все тяжелое стремится к центру Вселенной, где скапливается и образует шарообразную массу – Землю. Планеты размещены на особых сферах, которые вращаются вокруг Земли. Такая система мира получила название геоцентрической (от греческого названия Земли – Гея). Аристотель не случайно предложил считать Землю неподвижным центром мира. Если бы Земля перемещалась, то, по справедливому мнению Аристотеля, было бы заметно регулярное изменение взаимного расположения звезд на небесной сфере. Но ничего подобного никто из астрономов не наблюдал. Только в начале XIX в. было наконец-то обнаружено и измерено смещение звезд (параллакс), происходящее вследствие движения Земли вокруг Солнца. Многие обобщения Аристотеля были основаны на таких умозаключениях, которые в то время не могли быть проверены опытом. Так, он утверждал, что движение тела не может происходить, если на него не действует сила. Эти представления были опровергнуты только в XVII в. во времена Галилея и Ньютона.

Интенсивное развитие наблюдательной астрономии началось в V в. до н.э. Было обнаружено неравенство четырех времен года; измерен наклон эклиптики (круг, вдоль которого движутся Солнце, Луна и планеты) к небесному экватору ($\sim 24^\circ$); создан лунно-солнечный календарь; установлено, что планеты движутся по небу по необычайно сложным траекториям, которые включают в себя нерегулярные колебательные движения, попятное петлеобразное движение и др. Одновременно в недрах математики и философии вызревали теоретические предпосылки моделирования астрономических явлений, создания математических моделей Вселенной. Основателей теоретической астрономии можно в основном разделить на две соперничавшие школы. Представители первой школы, возглавляемой Аристотелем, строили свои



Рис. 1. Геоцентрическая система мира по Птолемею.

НЫМ СВОДОМ.

Считая Землю шарообразной, а размеры ее ничтожными по сравнению с расстоянием до планет и тем более звезд, Птолемей, однако, вслед за Аристотелем утверждал, что Земля – неподвижный центр Вселенной. Вокруг Земли, по Птолемею, движутся (в порядке удаленности от Земли) Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн, звезды. Но если движение Луны, Солнца, звезд круговое, то движение планет гораздо сложнее. Каждая из планет, по мнению Птолемея, движется не вокруг Земли, а вокруг некоторой точки. Точка эта в свою очередь движется по кругу, в центре которого находится Земля. Круг, описываемый планетой вокруг движущейся точки, Птолемей назвал эпициклом, а круг, по которому движется точка около Земли, – деферентом.

Трудно представить, чтобы в природе совершались такие запутанные движения, да еще вокруг воображаемых точек. Такое искусственное построение потребовалось Птолемею для того, чтобы, основываясь на ложном

представления об окружающем мире на основе общеприятных принципов. Наивысшим достижением этой школы стало сочинение Клавдия Птолемея «Математический трактат по астрономии» (оно более известно как «Альмагест»), опубликованный в 150 г. Клавдий Птолемей – это выдающийся математик, географ, астролог и астроном. Он обобщил ранние работы греческих астрономов, дополнил своими наблюдениями и создал фундаментальный труд по астрономии. В нем он обосновал геоцентрическую систему мира – в центре системы помещалась Земля, а планеты и звездные светила обращались вокруг нее, поддерживаемые небес-

представлении о неподвижности Земли, расположенной в центре Вселенной, объяснить видимую сложность движения планет. Птолемей был блестящим для своего времени математиком. Но он разделял взгляд Аристотеля, который считал, что Земля неподвижна и только она может быть центром Вселенной. Система мира Аристотеля – Птолемея казалась современникам правдоподобной. Она давала возможность заранее вычислять движение планет на будущее время, – это было необходимо для ориентировки в пути во время путешествий и для календаря. Эту систему признавали почти полторы тысячи лет. Также эту систему признавало христианство, в основе миропонимания которого Земля являлась «сосредоточием» Вселенной, а небесные светила созданы для того, чтобы освещать Землю и украшать небесный свод. Всякое отступление от этих взглядов христианство беспощадно преследовало. Система мира Аристотеля – Птолемея, ставившая Землю в центр мироздания, как нельзя лучше отвечала христианскому вероучению. Таблицы, составленные Птолемеем, позволяли определять положение планет на небе с весьма высокой по тем временам точностью – до 10'. Но с течением времени астрономы обнаружили расхождение наблюдаемых положений планет с предвычисленными. На протяжении веков думали, что система мира Птолемея просто недостаточно совершенна и, пытаясь усовершенствовать ее, вводили для каждой планеты новые и новые комбинации круговых движений. Все это усложняло систему Птолемея, делая ее излишне громоздкой и неудобной для практических расчетов.

Тем не менее, астрономические наблюдения Птолемея и их толкование по своей точности и полноте оставались непревзойденными на протяжении 14 веков, вплоть до появления работ Тихо Браге и Иоганна Кеплера. Построение геоцентрической системы Птолемеем завершило становление первой естественнонаучной картины мира. В течение длительного времени эта система выступала не только как высшее достижение теоретической астрономии, но и как ядро античной картины мира и астрономической основой антропоцентрического мировоззрения.

Представители второй школы – пифагорейцы, считали, что в основе всех явлений лежат математические закономерности. Наивысшим достижением пифагорейцев стала гелиоцентрическая модель, созданная Аристархом с острова Самос в III в. до н.э. Знаменитый астроном пришел к заключению, что радиус Луны в 3 раза меньше радиуса Земли, а радиус Солнца в 6,5 раз больше земного. Аристарх также вычислил, что расстояние до Луны составляет 74 земных радиуса, а до Солнца – 1400. Полученные результаты ставили под сомнение геоцентризм Аристотеля, и Аристарх Самосский пришел к выводу, что все проблемы, связанные с движением планет устраняются, если допустить вращение Земли и других планет вокруг Солнца. Так были заложены основы гелиоцентризма, хотя теория не была признана. В наши дни Аристарха Самосского стали называть «Коперником античного мира». К сожалению, труды этого замечательного ученого до нас практически не дошли, и более полутора тысяч лет человечество было уверено, что Земля – это неподвижный центр мира. Пифагорейцы поставили под сомнение представление о вращающейся прозрачной сфере, в которую вкраплены звезды. Предполагалось, что звезды покоятся, а наблюдаемые перемещения Солнца, Луны и планет обусловлены движением самой Земли. Аристарх создал модель планетной системы, которая позволила ему из астрономических наблюдений определить радиусы орбит пяти планет, а также периоды их обращения в годах. Выдающийся успех Аристарха не произвел большого впечатления на его братьев – астрономов, и его идеи не были восприняты. Однако создание гелиоцентрической системы ознаменовало новый этап в развитии не только астрономии, но и всего естествознания.

1.2. Становление нового мировоззрения

Спор между двумя школами был разрешен только в середине XVI в. Великий польский астроном Николай Коперник (1473 – 1543 гг.) возродил гелиоцентрическую модель. Свою систему мира он изложил в книге «О вращениях небесных сфер», вышедшей в год его смерти. Коперник представил Вселенную в виде сферы, в центре которой находится Солнце, объяснил суточное перемещение Солнца вращением Земли вокруг своей оси и рассматривал Землю, как планету, вокруг которой вращается Луна. После тридцати лет упорнейшего труда, долгих размышлений и сложных математических вычислений он показал, что Земля – только одна из планет, а все планеты обращаются вокруг Солнца.

Николай Коперник утверждал, что именно движением Земли вокруг Солнца и ее суточным вращением вокруг своей оси объясняется видимое движение Солнца, странная запутанность в движении планет и видимое вращение небесного свода. Гениально просто Коперник объяснил, что мы воспринимаем движение далеких небесных тел так же, как и перемещение различных предметов на Земле, когда сами находимся в движении. Мы скользим в лодке по спокойно текущей реке, и нам кажется, что лодка и мы в ней неподвижны, а берега «плывут» в обратном направлении. Точно так же нам только кажется, что Солнце движется вокруг Земли. На самом же деле Земля со всем, что на ней находится, движется вокруг Солнца и в течение года совершает полный оборот по своей орбите. И точно так же, когда Земля в своем движении вокруг Солнца обгоняет другую планету, нам кажется, что планета движется назад, описывая петлю на небе. В действительности планеты движутся вокруг Солнца по орбитам правильной, хотя и не идеально круговой формы, не делая никаких петель. Коперник, как и древнегреческие ученые, считал, что орбиты, по которым движутся планеты, могут быть только круговыми. Звезды Коперник считал неподвижными и утверждал, что они находятся на невообразимо огромных расстояниях. Поэтому ничтожные смещения их не могут быть замечены. Действительно, расстояния от нас даже до

ближайших звезд оказались настолько большими, что только спустя три века после Коперника они поддались точному определению.

Гелиоцентрическая система в варианте Коперника может быть сформулирована в семи утверждениях:

- Орбиты и небесные сферы не имеют общего центра.
- Центр Земли – не центр Вселенной, но только центр масс и орбиты Луны.
- Все планеты движутся по орбитам, центром которых является Солнце, и поэтому Солнце является центром мира.
- Расстояние между Землей и Солнцем очень мало по сравнению с расстоянием между Землей и неподвижными звездами.
- Суточное движение Солнца – воображаемо, и вызвано эффектом вращения Земли, которая поворачивается вокруг своей оси один раз за 24 часа, причем ось всегда остается параллельной самой себе.
- Земля (вместе с Луной, как и другие планеты), вращается вокруг Солнца, и поэтому те перемещения, которые, как кажется, делает Солнце (суточное движение, а также годичное движение, когда Солнце перемещается по Зодиаку) – не более чем эффект движения Земли.
- Движение Земли и других планет объясняет их расположение и конкретные характеристики движения планет.

Эти утверждения полностью противоречили господствовавшей на тот момент геоцентрической системе.

Гелиоцентрическая система мира, обоснованная, но не доказанная Коперником, получила свое подтверждение и развитие в трудах таких выдающихся ученых, как Галилео Галилей и Иоганн Кеплер. Галилей (1564–1642), одним из первых направивший телескоп на небо, истолковал сделанные при этом открытия как доводы в пользу теории Коперника. Открыв смену фаз Венеры, он пришел к выводу, что такая их последовательность может наблюдаться только в случае обращения этой планеты вокруг Солнца. Обнаруженные им четыре спутника планеты Юпитер также опровергали представления о том, что Земля является единственным в мире центром, вокруг

которого может происходить вращение других тел. Галилей не только увидел горы на Луне, но даже измерил их высоту. Наряду с несколькими другими учеными он также наблюдал пятна на Солнце и заметил их перемещение по солнечному диску. На этом основании он заключил, что Солнце вращается и, следовательно, имеет такое движение, которое Коперник приписывал нашей планете. Так был сделан вывод о том, что Солнце и Луна имеют определенное сходство с Землей. Наконец, наблюдая в Млечном Пути и вне его множество слабых звезд, недоступных невооруженному глазу, Галилей сделал вывод о том, что расстояния до звезд различны и никакой «сферы неподвижных звезд» не существует. Все эти открытия стали новым этапом в осознании положения Земли во Вселенной.

Астрономическая революция, начатая Коперником, была завершена в работах И. Кеплера (1571 – 1630), который, основываясь на результатах необычайно обширных и точных наблюдений, проведенных великим датским астрономом Тихо Браге, приступил к созданию своей гелиоцентрической модели. Он усовершенствовал модель Аристарха, установил законы движения планет. Кеплер поместил орбиты планет в разные плоскости, проходящие через Солнце, заменил круговые орбиты на эллиптические. Кеплер не только был убежден, что планеты движутся вокруг Солнца, но и полагал, что Солнце является причиной этого движения, т.е. его астрономия была не только гелиоцентрической, но и гелиоиерархической. Известно 3 закона Кеплера:

1. Каждая планета обращается вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.
2. Радиус-вектор планеты за одинаковые промежутки времени описывает равные площади.
3. Квадраты звездных периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит ($T_1^2/T_2^2 = R_1^3/R_2^3$).

В конце концов, Кеплеру удалось построить модель Солнечной системы, которая, за малым исключением, описывала движения планет и их спутников в пределах точности наблюдений. Таким образом, восторжествовали

идеи пифагорейской школы, чему способствовали открытия Тихо Браге, Галилея, Гюйгенса и др.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем изначально было вызвано развитие астрономии?
2. Почему создание обсерваторий является важным шагом в развитии астрономии?
3. Путь развития астрономических теорий: антропоцентризм – геоцентризм – гелиоцентризм. Дайте краткую характеристику каждому направлению.
4. Каков вклад Аристотеля в развитие астрономии?
5. Проанализируйте, как геоцентрическая система Клавдия Птолемея отличается от геоцентризма Аристотеля? В чем заключается сходство?
6. Почему гелиоцентризм Аристарха Самосского не был признан современниками?
7. В чем заключается гелиоцентрическая система Н. Коперника?
8. Как развивались астрономические знания после XV в.?
9. Вклад И. Кеплера в развитие астрономии.

2. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

2.1. Общие сведения о строении Солнечной системы

Общая структура Солнечной системы была раскрыта Н. Коперником (середина XVI в.), который обосновал представление о движении Земли и других планет вокруг Солнца. Гелиоцентрическая система Коперника впервые дала возможность определить относительные расстояния планет от Солнца, а, следовательно, и от Земли. И. Кеплер открыл (начало XVII в.) законы движения планет, а И. Ньютон сформулировал (конец XVII в.) закон Всемирного тяготения. Эти законы легли в основу небесной механики, исследующей движение тел Солнечной системы. Изучение физических характеристик космических тел, входящих в Солнечную систему, стало возможным только после изобретения Г. Галилеем телескопа: в 1609 г. Галилей впервые направил изготовленный им маленький телескоп на Луну, Венеру, Юпитер и Сатурн и сделал ряд поразительных для его эпохи открытий. Наблюдая солнечные пятна, Галилей обнаружил вращения Солнца вокруг своей оси.

Солнечная система – система небесных тел (Солнце, планеты, спутники планет, кометы, метеорные тела, космическая пыль), двигающихся в области преобладающего гравитационного влияния Солнца. Наблюдаемые размеры Солнечной системы определяются орбитой Плутона, которая составляет около 40 а.е. (а.е. – *астрономическая единица*, или среднее расстояние от Земли до Солнца; 1 а.е. = 150 000 000 км). Однако сфера, в пределах которой возможно устойчивое движение небесных тел вокруг Солнца, простирается почти до ближайших звезд (230 000 а. е.).

2.2. Солнце

Практически вся масса Солнечной системы сосредоточена в Солнце. На долю всех планет приходится немногим более 0,1% массы Солнца. Оно в 333 тысячи раз массивнее Земли, имеет наибольшую силу притяжения и поэтому управляет движением всех тел Солнечной системы.

По диаметру Солнце в 109 раз больше Земли. На Землю падает всего $1/2\ 000\ 000\ 000$ доля излучаемой Солнцем энергии. Зная это и измерив энергию, падающую на $1\ \text{см}^2$ земной поверхности за 1 мин, можно вычислить полную мощность излучения Солнца. **Солнечной постоянной** называется количество энергии Солнца, падающей за минуту на $1\ \text{см}^2$ поверхности, перпендикулярной к солнечным лучам, при среднем расстоянии Земли от Солнца. Солнечная постоянная равна $2\ \text{кал/см}^2\cdot\text{мин}$ или $0,14\ \text{Вт/см}^2$. Умножив это значение на величину поверхности шара с радиусом, равным расстоянию от Земли до Солнца, получим мощность излучения Солнца $4\cdot 10^{33}$ эрг/сек (масса Солнца равна $2\cdot 10^{33}$ г). За 1 сек $1\ \text{см}^2$ поверхности Солнца излучает $6,2\cdot 10^{10}$ эрг энергии.

К нам приходит излучение из разных слоев Солнца, отличающихся по температуре. **Эффективной температурой** Солнца $T_e = 6000^\circ$ называется температура тела таких же размеров, как Солнце, посылающего такую же суммарную энергию, как и оно. Эффективную температуру вычисляют по найденной из измерений величине солнечной постоянной.

Средняя плотность Солнца $1,4\ \text{г/см}^3$ и, тем не менее, вследствие высокой температуры, Солнце целиком газообразно. Наружные слои Солнца гораздо разреженнее земного воздуха, а плотность недр, вследствие громадного давления, очень велика.

Солнце – источник света, тепла и жизни в Солнечной системе, и вместе с тем это – ближайшая к нам звезда. Изучение Солнца помогает нам лучше понять природу звезд, хотя многие из них сильно отличаются от Солнца.

Видимая поверхность Солнца называется **фотосферой**. Она излучает почти всю приходящую к нам энергию и имеет непрерывный спектр. Солнце наблюдают либо через темное стекло, либо проецируя его изображение, даваемое телескопом или биноклем, на белый экран. Толщина фотосферы как слоя около 300 км, что в 2000 раз меньше радиуса Солнца. Плотность вещества в ней $(0,01—0,05)\cdot 10^{-6}\ \text{г/см}^3$, а давление составляет около 0,1 земной атмосферы.

В телескоп видно, что фотосфера состоит из гранул – продолговатых облаков раскаленного газа. Их размеры 300 – 700 км. Каждые 5 – 7 мин они распадаются и заменяются другими гранулами. Фотосфера является верхней частью слоя, в котором происходит тепловая конвекция – вертикальное перемешивание газа. Толщина слоя конвекции – 12% от радиуса Солнца. Ее существование вызвано быстрым охлаждением наружного слоя. Гранулы – это более горячие газы, поднятые конвекцией вверх, быстро охлаждающиеся и потому вскоре опускающиеся. Под фотосферой на глубине 100 000 км температура около 100 000 К. Ниже этой границы конвективной зоны передача тепла из недр осуществляется переносом лучистой энергии. В недрах Солнца температура согласно расчетам около 15 млн. К.

В фотосфере, лучше – у краев Солнца, – видны светлые пятнышки, называемые факелами. Они примерно на 200 К горячее соседней области и потому немного ярче. Они могут существовать неделями и представляют собой вершину устойчивого столба более горячих газов, конвективно поднимающихся вверх. Эта устойчивость обусловлена тем, что магнитное поле Солнца препятствует вертикальным потокам ионизированных газов отклоняться в горизонтальном направлении. В фотосфере появляются также темные поры – зародыши пятен. Пятно часто разрастается до диаметра, превышающего диаметр земного шара. В этом месте напряженность магнитного поля усиливается от значения 1 эрстед в невозмущенной области до тысяч эрстед. Черными пятна кажутся лишь по контрасту с более горячей и оттого более яркой фотосферой. Температура пятен составляет около 3700 °С, поэтому в спектрах пятен есть полосы поглощения простейших двухатомных частиц: СО, TiO, СН, CN и др., которые в более горячей фотосфере распадаются на атомы.

Солнечные пятна появляются обычно группами, которые сначала разрастаются, а потом дробятся на все более мелкие части и постепенно исчезают. Пятна появляются в двух зонах по обе стороны экватора, и через каждые 11 лет в среднем их число и занимаемая ими площадь достигают максимума.

По видимому перемещению пятен на диске Солнца еще Галилей обнаружил вращение Солнца. По результатам спектрального анализа выяснилось, что Солнце вращается зонами, – быстрее всего на экваторе, где звездный период вращения составляет 25 суток. К полюсам период увеличивается до 30 суток. Так как за 25 суток Земля проходит по орбите дугу примерно 25° , то синодический период вращения Солнца на экваторе около 27 суток. Через столько времени пятно, бывшее в центре Солнца, снова придет туда для земного наблюдателя.

В наружном слое фотосферы минимальная температура 4400 К. Над ним находится атмосфера Солнца. Нижняя часть атмосферы называется *хромосферой*. В хромосфере температура постепенно растет до нескольких десятков тысяч градусов. Это вызвано тем, что конвекционные токи фотосферы порождают в газе колебания, вследствие чего энергия теплового движения атомов газа увеличивается.

Хромосфера гораздо разреженнее, чем фотосфера. На фоне яркого неба ее не видно. Непосредственно хромосферу можно видеть только в течение нескольких секунд во время полного солнечного затмения. При этом из-за черного края Луны она видна как красный узкий серп, редко – как полное тонкое кольцо. Ослепительная фотосфера в это время закрыта Луной, и небо вокруг Солнца темнее, чем обычно. Спектр хромосферы состоит из ярких линий, среди которых ярче всех красная водородная линия. Оттого и цвет хромосферы красный. Это дает возможность видеть хромосферу через светофильтр, пропускающий свет только красной водородной линии. По спектру хромосферы определяют ее химический состав и высоту, на которую поднимаются в ней разные химические элементы. Выше всего поднимаются водород и ионизированный кальций.

Тогда как спектр солнечной атмосферы состоит из ярких линий, спектр солнечного диска непрерывный, прерываемый множеством темных линий поглощения. Они называются *фраунгоферовыми*, по фамилии выдающегося немецкого оптика Фраунгера, впервые зарисовавшего в 1814 г. распо-

жение нескольких сот линий. Происхождение этих линий и польза от их изучения стали понятны лишь много позднее.

Излучение нижних, более плотных и горячих слоев фотосферы поглощается более холодными разреженными верхними слоями газа в определенных диапазонах длин волн, характерных для атомов данного элемента. Следовательно, в спектре Солнца возникает темная линия. По фраунгоферовым линиям делают и качественный, и количественный анализ солнечной атмосферы. В ней найдено 68 из общего числа химических элементов периодической таблицы Д. И. Менделеева. Атомов водорода на Солнце в 10 раз больше, чем всех остальных атомов, а по массе водород составляет 70% массы Солнца, гелий – 29% массы, и 1% ее приходится на все остальные химические элементы. В составе Солнца мы находим те же элементы, которые имеются на Земле.

Время от времени из хромосферы вздымаются струи, облака и арки раскаленного газа, называемые *протуберанцами*. Во время полного солнечного затмения они видны невооруженным глазом. Одни протуберанцы плавают спокойно, другие со скоростями в несколько сот километров в секунду поднимаются до высоты, достигающей солнечного радиуса. Иногда часть газа протуберанца может и совсем оторваться от Солнца, полететь к Земле или в другом направлении. Но это для Земли несколько не опасно, так как этот газ крайне разрежен. Протуберанцы часто связаны с областью темных пятен и через специальные светофильтры могут наблюдаться ежедневно и на краю Солнца, и в проекции на его диск.

Протуберанцы, яркие хромосферные вспышки, светлые горячие облака (флоккулы) в области хромосферы над факелами, а также образование пятен являются наиболее мощными и быстрыми проявлениями *солнечной активности*. Большинство этих явлений тесно связано между собой и возникает в активных областях. В их протекании отчетливо видна цикличность со средним периодом 11,2 года, а также с периодами 22, 80-90 лет и др.

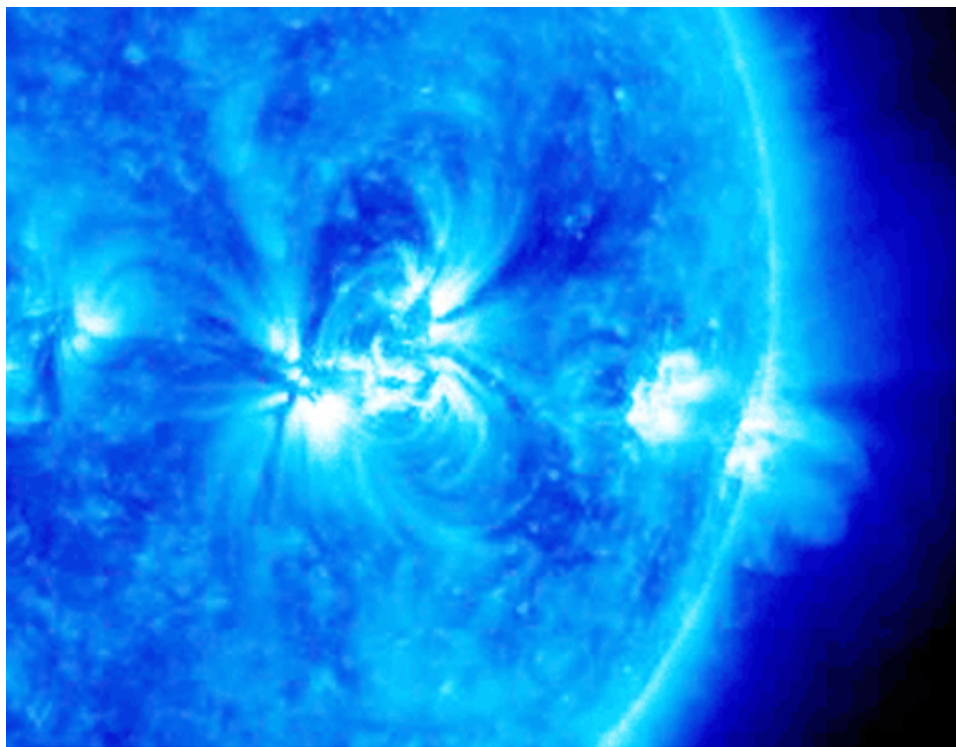


Рис. 2. Вспышка на Солнце.

При хромосферной вспышке за несколько минут часть флоккулы усиливается в яркости. Это вызвано катастрофическим сжатием газа под действием магнитных полей, которые развиваются в пятнах. Сжатие очень повышает температуру газа, а магнитные поля разгоняют некоторые частицы до огромных скоростей. В результате усиливаются рентгеновское и радиоизлучение Солнца, увеличивается поток космических лучей. Из Солнца со скоростью в среднем около 1000 км/сек выбрасываются корпускулярные потоки, которые, налетая на Землю, возмущают ее магнитное поле, проникают в области полюсов в атмосферу и создают в ней магнитные бури, полярные сияния и т. п. Рентгеновское излучение и солнечные космические лучи вызывают дополнительную ионизацию земной ионосферы, что сказывается на условиях распространения радиоволн (нарушение радиосвязи, работы навигационных устройств и т.д.).

Имеются свидетельства сильного влияния вспышечной активности на погоду и состояние биосферы Земли. Косвенным путем эти электромагнит-

ные и сопутствующие им изменения, по-видимому, влияют и на живые организмы. Корпускулярные потоки создают в солнечной системе солнечный ветер, влияющий также на хвосты комет, на поверхность безатмосферных планет и т. д. Ветром эти потоки назвали потому, что они испускаются Солнцем непрерывно: «дуют от Солнца, как ветер».

С циклическими изменениями Солнечной активности связано проявление многолетних биологических циклов. Изучением влияния изменений Солнечной активности на живые организмы Земли занимается гелиобиология – наука, основы которой были заложены в начале 1920-х годов А.Л. Чижевским. Как показали обширные исторические исследования, проведённые Чижевским, имеется несомненная связь между циклами солнечной активности и динамикой войн и других социальных потрясений, вспышек эпидемий и эпизоотий и массой других явлений на Земле.

Солнце влияет на следующие факторы:

- эпидемиологическую обстановку на Земле;
- количество разного рода стихийных бедствий (тайфуны, землетрясения, наводнения и т. д.);
- количество автомобильных и железнодорожных аварий.

Максимальное проявление перечисленных факторов приходится на годы активного Солнца.

Интересно, что первым учёным, выступившим с подобной мыслью, был У. Гершель – астроном, открывший первую невидимую невооружённым глазом планету Уран. Ещё в 1804 г. он обнаружил прямую зависимость между уровнем Солнечной активности и ценами на хлеб. Среди современных исследований на эту тему стоит выделить работу российского историка Валерия Храпова, открывшего «кривую одарённости». Выяснилось, что большинство выдающихся людей (в самых разных областях политики, спорта, искусства) рождается в периоды экстремального (максимального или минимального) уровня Солнечной активности. Кривая смертности также соотносится с кривой Солнечной активности.

Выше хромосферы над Солнцем простирается самая верхняя часть его атмосферы – *солнечная корона*. Она состоит из разреженного газа, имеющего температуру около миллиона градусов, находящегося в особом состоянии и дающего спектр из ярких линий преимущественно сильно ионизированного железа, которые на Земле никогда не удавалось получить в лаборатории. Их расшифровали теоретически.

Корона состоит из плазмы – смеси ионов и электронов, а ее высокая температура – характеристика скорости их движений.

Корона образует красивые длинные лучи, превышающие по длине радиус Солнца. Во время полных солнечных затмений корона представляет собой поразительно красивое зрелище. Солнечная корона гораздо более разрежена, чем хромосфера, и является основным источником радиоизлучения Солнца. Радиометоды позволяют проследить за короной на расстоянии в несколько десятков солнечных радиусов. Это сверхкорона Солнца, переходящая в межпланетную среду. Структура короны связана со строением активных областей Солнца – с пятнами и протуберанцами, а ее лучи тянутся вдоль магнитных силовых линий, выходящих из активных областей. Корональные лучи связаны с движением через корону корпускулярных потоков. Форма короны в целом меняется, и в максимуме солнечной активности она одна, а в минимуме – другая.

2.3. Планеты и астероиды

Солнечная система находится в одном из спиральных рукавов нашей Галактики, ближе к концу. В ее состав входит несколько типов космических объектов. В первую очередь это – *планеты*, которые иногда делят на большие и малые. По физическим характеристикам большие планеты разделяются на внутренние, или планеты земной группы, (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и внешние планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Физические характеристики Плутона качественно отличны от характеристик планет-гигантов, и потому он не может быть отнесен к их числу. Довольно часто

Плутон причисляют к планетам земной группы, но это утверждение является достаточно спорным.

Около 90% естественных спутников планет группируются вокруг внешних планет, причем Юпитер и Сатурн сами представляют системы, подобные Солнечной системе в миниатюре. У Меркурия, Венеры и Плутона спутники неизвестны. Некоторые спутники имеют весьма большие размеры; так, спутник Юпитера Ганимед по размерам превосходит планету Меркурий. Сатурн, кроме десяти спутников, обладает системой колец, состоящих из большого количества мелких тел, движение которых соответствует законам Кеплера; по сути дела эти тела представляют собой также спутники Сатурна.

Подобно Земле все планеты вращаются вокруг собственной оси и вокруг Солнца, но периоды вращения отличаются друг от друга. Движение (и вращение вокруг осей) планет и их спутников, рассматриваемое с Северного полюса мира, происходит против часовой стрелки (прямое движение). Исключение составляют вращение Венеры и Урана и обратное движение некоторых спутников вокруг планет (основные характеристики Солнца и планет приведены в табл. 1 приложения).

Помимо больших планет в составе Солнечной системы имеется большое количество малых – их называют *астероидами*. Размеры астероидов – от сотен километров – до сотен метров. Они обращаются между орбитами Марса и Юпитера. Первая малая планета была открыта в 1801 г., ее назвали Церерой. Вскоре были найдены и другие малые планеты, названные Паллада, Веста и Юнона. С применением фотографии стали открывать все более мелкие астероиды и во все большем числе. К настоящему времени известно более 1700 астероидов. Суммарная масса астероидов оценивается всего лишь в 0,1 массы Земли.

Наблюдения показывают, что астероиды представляют собой тела неправильной формы. Этот факт подтверждает гипотезу о существовавшей когда-то на месте пояса астероидов распавшейся планеты. Эта гипотеза появилась в астрономии в XVIII в. Отыскивая закономерности строения Солнечной

системы, Кеплер предположил, что между Марсом и Юпитером не хватает одной планеты. Продолжение работ Кеплера привело к появлению так называемого закона Тициуса – Боде. Закон отражает расстояния от планет до Солнца, причем за единицу принимается расстояние от Солнца до Земли. Полученный ряд чисел (0,4 – 0,7 – 1,0 – 1,6 – 2,8 – 5,2 – 10,0 – 19,6 – ... – 38,8) достаточно точно, за исключением Нептуна, характеризует реальные расстояния, но планета, соответствующая положению «2,8» отсутствует. Астрономические поиски данной планеты и привели к открытию пояса астероидов. Была выдвинута гипотеза о существовании на этом месте планеты, а сама гипотетическая планета названа романтическим именем Фэтон. Этим именем отсутствующая планета обязана профессору С.В. Орлову. Но ряд ученых считает, что в поясе астероидов формирование крупной планеты было невозможно из-за воздействия сил тяготения со стороны Юпитера.

Самым ярким астероидом является Веста (не ярче 6-й звездной величины). Самый крупный астероид – Церера, его диаметр 780 км. Диаметры самых малых из известных астероидов составляют лишь несколько километров. Астероиды не имеют атмосфер. На небесной сфере они выглядят как звезды (астероид – звездоподобный) и отличаются от них лишь характерным для планет петлеобразным перемещением на фоне звездного неба. Для орбит некоторых астероидов характерны необычайно большие эксцентриситеты, вследствие чего в перигелии они подходят к Солнцу ближе, чем Марс и даже чем Земля. Под *эксцентриситетом* понимают величину, характеризующую отклонение от окружности. *Перигелием* называется ближайшая к Солнцу точка орбиты космического объекта. Икар подходит к Солнцу ближе, чем Меркурий. В 1968 г. Икар подходил к Земле почти в 10 раз ближе, чем Марс, но его ничтожное притяжение никакого влияния на Землю не оказало. Временами близко подходят к Земле Гермес, Эрот и другие «малые планеты».

2.4. Метеориты. Кометы

Помимо планет и астероидов в состав Солнечной системы входят также кометы и метеориты, хотя часть исследователей считает, что метеориты – это всего лишь астероиды очень маленьких размеров, орбиты которых пересекают орбиту Земли, а разница в определениях – лишь вопрос терминологии.

Метеориты – это металлические и каменные образования различного размера (от песчинок до глыб). Выделяют три класса метеоритов:

- Сидериты – железные метеориты, в основном состоящие из железа с примесью никеля.
- Сидеролиты – железо-каменные метеориты, состоящие из смеси одинаковых количеств силикатных минералов и железа.
- Аэролиты – каменные метеориты, состоящие из силикатных минералов с незначительными примесями железа.

Среди известных преобладают каменные метеориты, в свою очередь подразделяющиеся на 2 группы: хондриты (метеориты, содержащие хондрулы – включения минералов сферической формы) и ахондриты (хондрулы отсутствуют).

Метеориты часто проникают в атмосферу Земли со скоростью от 10 до 200 км/с. Возникающий при этом яркий след раскаленного метеорита называется метеором. В быту это явление неправильно, но поэтично, именуют «падающей звездой». Крупные метеоры называются болидами. Болид достигает нижних слоев атмосферы вместе с оболочкой, состоящей из раскаленных газов и частиц вещества. Метеорит, имеющий небольшие размеры, иногда целиком испаряется в атмосфере Земли. В большинстве случаев масса метеорита за время полета сильно уменьшается. До Земли долетают лишь остатки метеорита, обычно успевающие остыть, когда космическая скорость его уже погашена сопротивлением воздуха.

От сильного сопротивления воздуха метеорит нередко раскалывается и с грохотом падает на Землю в виде осколков. Иногда выпадает целый метео-

ритный дождь. При полете метеориты оплавляются и покрываются черной корочкой. Один из таких «черных камней» в Мекке вделан в стену храма и служит предметом религиозного поклонения. Некоторые наиболее крупные метеориты при большой скорости падения взрываются и образуют метеоритные кратеры, напоминающие лунные. Часто при этом метеорит почти полностью испаряется. Один из самых больших метеоритных кратеров находится в Аризоне (США); его диаметр составляет 1200 м, а глубина – 200 м. Возраст этого кратера составляет, предположительно, 5000 лет. Но на Земле существуют и более древние метеоритные кратеры.

По содержанию радиоактивных элементов и свинца определяют возраст метеоритов. Он различен, но самые старые метеориты не старше, чем земная кора.

Одними из самых интересных тел в составе Солнечной системы являются *кометы*. В переводе с греческого это название означает «хвостатая». Но комета не всегда имеет «хвост». Вещественной частью ее является ядро или «голова» кометы, которое состоит из смеси льда и космического «мусора» (пыль, мелкие кусочки твердого вещества). Поэтому кометы иногда называют «грязными снежками». Спектральный анализ показывает, что в составе «головы» кометы основными компонентами являются пары углерода и циана (C_2N_2), а в «хвосте» присутствует ионизированный угарный газ. Орбита, по которой происходит движение комет, обычно очень вытянута. Находящаяся вдали от Солнца комета состоит только из «головы», а по мере возвращения к Солнцу начинает «отращивать хвост», причем «хвост» этот всегда направлен от Солнца. Проходя перигелий, комета начинает двигаться «хвостом» вперед. Хвосты образуются только у комет определенного размера, поэтому, наблюдая за очень маленькой кометой, хвоста мы не увидим.

Кометы по внешнему виду, размерам и характеристикам своих орбит резко отличаются от других тел Солнечной системы. Периоды обращения комет могут достигать нескольких миллионов лет, причем в *афелии* (наиболее удаленной точке орбиты) такие кометы приближаются к границам Сол-

нечной системы, испытывая гравитационные возмущения от ближайших звезд. Орбиты комет имеют любые наклоны от 0° до 180° . Общее количество комет оценивается сотнями миллиардов. Судьба кометы, прошедшей перигелий, непредсказуема. Комета может, облетев вокруг Солнца, вновь на долгое время скрыться в неведомые дали. Или может встретиться с планетой и под действием ее сил изменить орбиту на параболическую, чтобы навсегда исчезнуть в глубинах Вселенной. Может перейти на более короткую орбиту, а может упасть на Солнце. В конце концов, комета может врезаться в планету, как это случилось в 1994 г. с кометой Шумейкера – Леви.

Среди этого класса космических объектов выделяют периодические кометы, которые регулярно возвращаются к Солнцу через определенный период времени. Наиболее известной является комета Галлея, период которой составляет 75,5 лет. Как правило, комета получает свое имя по имени ученого, ее открывшего, либо по имени математика, который рассчитал ее орбиту. Периоды обращения комет различны: минимальный из них – у кометы Энке – 3,3 года. Но не всегда периодическая комета может вернуться к Солнцу. Жизнь кометы невелика, так как, проходя перигелий, она теряет часть своей массы, отдавая ее «хвосту», то есть, испаряя часть вещества, из которого состоит ядро. Комета истощается и может распасться на несколько частей.

2.5. Облако Оорта и пояс Койпера

Кометы входят в состав Солнечной системы. Следовательно, они родились вместе с ней или в ней, хотя пока еще неизвестно, как именно. Идеи о существовании связанного с Солнцем семейства комет высказывал еще в начале 70-х гг. XIX в. Джованни Скиапарелли. В 1950 г. голландский космогонист Ян Оорт предположил, что Солнечная система окружена гигантским облаком кометных тел (по его оценке насчитывающим до 10^{11} тел), находящихся на расстояниях от 20 000 до 200 000 а.е. Считается, что в процессе роста планет – гигантов (в первую очередь Юпитера и Сатурна) при достижении ими достаточно большой массы гравитационные возмущения стано-

вятся настолько сильными, что начинается массовый выброс ими планетезималей (см. стр. 42) из ближайших к их орбитам кольцевых зон. Практически все, не вошедшие в планеты и находящиеся в этих зонах, тела улетели во внешние области Солнечной системы. Облако, которое составили миллионы таких ледяных тел, в дальнейшем стали называть *облаком Оорта*. Это гигантский резервуар, в котором находятся кометные тела, и из которого под действием сближающихся с Солнцем звезд или гигантских газо-пылевых облаков они изменяют свои орбиты и попадают во внутреннюю область нашей планетной системы.

В 1951 г. Койпер высказал гипотезу о существовании наряду с облаком Оорта еще одного резервуара комет. Первый объект *пояса Койпера*, расположенный на расстоянии 41 а.е., был открыт в 1992 г. В настоящее время открыто более 400 подобных объектов, размеры которых превышают 200 км, находящихся далеко за орбитами Нептуна и Плутона. По современным оценкам, в поясе Койпера до 35 000 объектов размерами свыше 100 км, а общая численность тел, находящихся там, по расчетам специалистов, оценивается в несколько миллиардов.

Следовательно, пояс Койпера имеет полную массу, в сотни раз большую, чем пояс астероидов между орбитами Марса и Юпитера. Объектов пояса Койпера на расстоянии, превышающем 100 а.е., не найдено. Либо далекие тела имеют более темную поверхность, либо за этой границей находятся только мелкие объекты. Ответить на вопрос, где заканчивается Солнечная система, еще предстоит. В поясе Койпера обнаружены небесные тела, размеры которых превышают размеры Цереры и спутника Плутона – Харона. Открытия таких крупных объектов может указывать на то, что Плутон – не девятая планета Солнечной системы, а лишь крупнейший объект пояса Койпера. Однако пока решено сохранить за ним статус планеты.

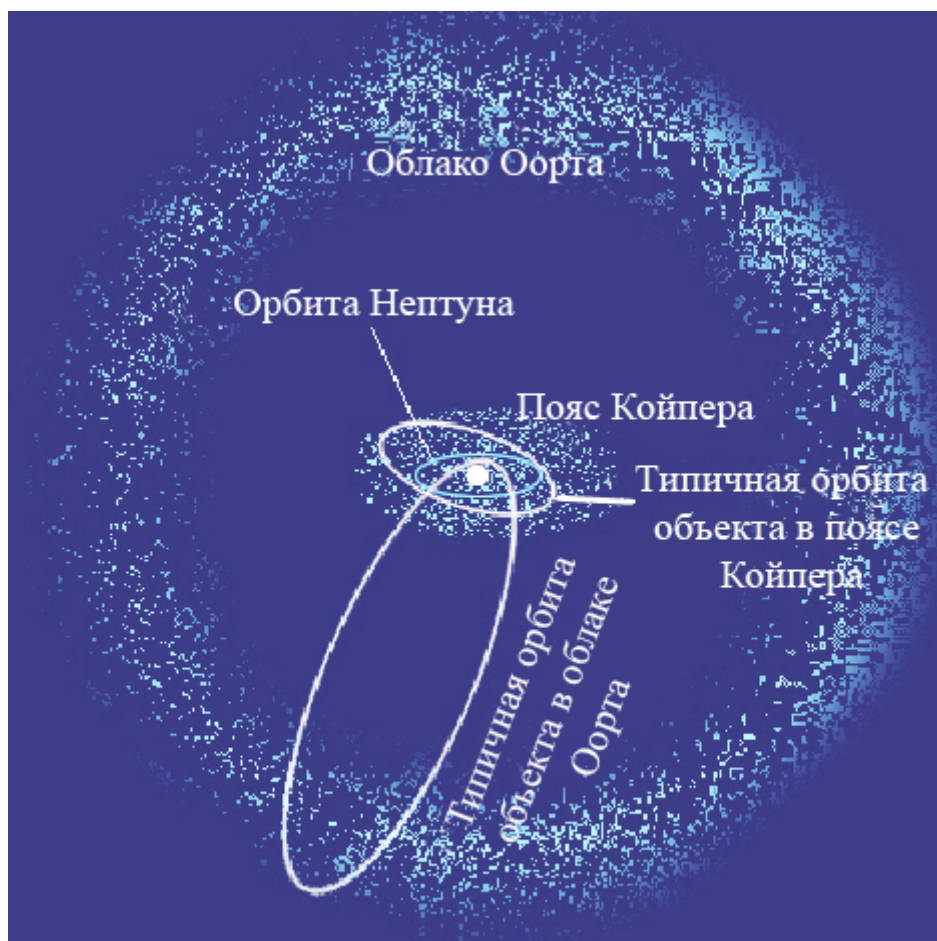


Рис. 3. Население пояса Койпера и облака Оорта.

Наличием пояса Койпера и облака Оорта объясняются особенности орбит короткопериодических и долгопериодических комет. Орбиты короткопериодических комет лежат в одной плоскости с планетами Солнечной системы. Такие кометы сформировались на «окраине» Солнечной системы одновременно с планетами, и принадлежат они поясу Койпера. А орбиты долгопериодических комет могут быть расположены как угодно.

Метеорные тела и космическая пыль заполняют все космическое пространство Солнечной системы. На движение космической пыли влияет не только притяжение Солнца и планет, но и солнечная радиация, а на движение электрически заряженных частиц – также и магнитные поля Солнца и планет. Внутри орбиты Земли плотность космической пыли возрастает, и она образует облако, окружающее Солнце, видимое с Земли как зодиакальный свет.

Вопросы для самоконтроля

1. Работы каких ученых способствовали изучению Солнечной системы?
2. Что называется солнечной постоянной?
3. Фотосфера, ее строение и характеристики.
4. Хромосфера и способы ее изучения.
5. Солнечная активность, ее причины и влияние на биосферу Земли.
6. Что из себя представляет солнечная корона?
7. Перечислите планеты Солнечной системы и дайте им краткую характеристику.
8. Астероиды, их открытие и причины образования.
9. Классификация метеоритов.
10. Кометы, их состав и "судьбы".
11. Что называется облаком Оорта?
12. Почему пояс Койпера называют "резервуаром" комет?

3. ГИПОТЕЗЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Особый теоретический и практический интерес представляет для ученых и просто для жителей Земли вопрос о возникновении планет. Отличительной чертой планетоподобных несветящихся тел является величина их массы. Все различия между звездами и планетами являются существенными различиями их масс. Вследствие громадных космических расстояний другие планетные системы ненаблюдаемы, поэтому проблема происхождения планет рассматривается на примере модели происхождения планет Солнечной системы.

Около 200 лет назад начала формироваться наука о происхождении и развитии небесных тел – *космогония* (от греч. kosmogonia – происхождение мира). Все космогонические гипотезы, известные на сегодняшний день можно разделить на 2 типа: небулярные и катастрофические. *Небулярные* (от лат. nebula – газ, туман) гипотезы подразумевают образование планет из пылевых или газовых туманностей. *Катастрофические* – путем различных случайных катастрофических явлений.

Небулярные гипотезы, а их больше всего, можно, в свою очередь разделить на две подгруппы. Согласно первой из них Солнце и все тела Солнечной системы: планеты, спутники, астероиды, кометы и метеорные тела – образовались из единого газово-пылевого, или пылевого облака. Согласно второй – Солнце и его семейство имеют различное происхождение. Это подразумевает, что Солнце образовалось из одного газово-пылевого облака (туманности, глобулы), а остальные небесные тела Солнечной системы – из другого облака. Второе облако было захвачено каким-то, не совсем понятным, образом Солнцем на свою орбиту и разделилось каким-то, еще более непонятным образом на множество самых различных тел (планет, их спутников, астероидов, комет и метеорных тел). Все эти тела имеют самые различные характеристики: массу, плотность, эксцентриситет, направление обращения по орбите и направление вращения вокруг своей оси, наклонение орбиты к

плоскости экватора Солнца (или эклиптики) и наклон плоскости экватора к плоскости своей орбиты.

Первые научные теории происхождения Солнечной системы являлись небулярными и были выдвинуты независимо друг от друга немецким философом Кантом и французским математиком Лапласом. Эти теории вошли в науку под названием космогонической теории Канта – Лапласа.

3.1. Гипотеза Канта - Лапласа

Согласно теории Канта (1755) пространство, в котором теперь существует Солнечная система, было заполнено рассеянной газо-пылевой материей, пришедшей во вращательное движение вокруг некоего центрального сгущения, на месте которого образовалось Солнце. Постепенно, вследствие притяжения и отталкивания между частицами рассеянной материи – туманностями – возникли планеты. Кант первый выдвинул гипотезу о том, что Солнечная система не существовала вечно. Процесс ее возникновения Кант связывал с существованием сил взаимодействия, присущих частицам туманности. При этом гипотеза Канта не противоречила наблюдаемому расположению орбит планет Солнечной системы приблизительно в одной плоскости и существованию спутников.

Приблизительно через 50 лет (1797) Лаплас выдвигает свою гипотезу, во многом сходную с предположениями Канта, но разработанную более глубоко. Космогоническая гипотеза Лапласа основана на том, что Солнечная система образовалась из уже вращающейся газовой туманности. Согласно гипотезе Канта Солнечная система тоже возникла из газовой туманности, но не имевшей первоначального вращения, и в этом случае возникали непреодолимые трудности в объяснении того, как могло образоваться правильное вращательное движение небесных тел. Гипотеза Лапласа некоторым образом решала эту проблему, и получила широкое распространение в начале XIX в. Лаплас рассматривал большую, медленно вращающуюся туманность, состоящую из разреженного газа, при сжатии которого под действием сил при-

тяжения скорость ее вращения возрастала. Туманность сплющивалась, и из ее центральной части образовалось Солнце. По мере сжатия первичного Солнца в плоскости его экватора стали отделяться газовые кольца. Примером таких колец могут служить кольца Сатурна. Из концентрической системы этих колец в результате их неравномерного охлаждения и разрыва под действием притяжения частиц возникли планеты. Остывая, планеты покрывались твердой корой, на поверхности которой в дальнейшем происходили геологические процессы.

Точки зрения Канта и Лапласа в ряде важных вопросов резко различались. Кант исходил из эволюционного развития холодной пылевой туманности, в ходе которого возникло центральное массивное тело – будущее Солнце, а потом уже – планеты. Лаплас считал первоначальную газовую туманность очень горячей, находящейся в состоянии быстрого вращения. Согласно гипотезе Лапласа, планеты образовались раньше Солнца. Но в основе гипотез Канта и Лапласа лежит одно общее представление о возникновении Солнечной системы в результате закономерного развития туманности. Поэтому принято называть эту концепцию гипотезой Канта – Лапласа.

Гипотеза Канта – Лапласа объясняла круговой характер орбит вращения планет, сонаправленное вращение планет по орбитам и вокруг оси. Одним из главных достоинств гипотезы была идея развития материи (вращательное движение туманности, вследствие которого произошло уплотнение частиц и образование Солнечной системы). Эта идея доказывала неделимость и неуничтожимость материи и движения.

Но ряд фактов не укладывался в рамки этой теории. Первым и главным необъяснимым фактом стало относительно медленное вращение Солнца вокруг своей оси в настоящее время, хотя во время сжатия оно должно было вращаться столь быстро, чтобы за счет центробежной силы происходило бы отделение вещества. Следующим противоречием стало то, что спутники некоторых планет вращаются в другом направлении, чем сами планеты.

Согласно современным данным, отделившийся от центрального тела газ не может сформироваться в кольца и, в дальнейшем, – образовать планеты, а должен рассеяться.

Дальнейшее развитие физики и математики выявило несостоятельность гипотезы Канта – Лапласа. На сегодняшний день наиболее существенными недостатками этой гипотезы считаются следующие:

1. Из закона сохранения момента импульса следует, что в Солнце, обладающем большей частью массы Солнечной системы (99,8%) должен быть сосредоточен соответствующий момент импульса. Но вычисления показывают, что на Солнце приходится только 2% момента импульса, а 98% сосредоточено в планетах Солнечной системы.

2. Расчеты показывают, что скорость вращения первичного Солнца равнялась скорости вращения Юпитера в настоящее время. Следствием этого является тот факт, что Солнце должно обладать тем же сжатием, что и Юпитер. А этого недостаточно, чтобы вызвать отделение колец от вращающегося Солнца, как считали Кант и Лаплас.

3. Доказано, что звезда, обладающая избытком вращения, не образует семейство планет, а распадается на части. Пример тому – спектрально-двойные и кратные звезды.

Гипотеза Канта – Лапласа не смогла дать ответы на эти вопросы, поэтому ей на смену пришли другие гипотезы.

3.2. Гипотеза Джинса и ее развитие

После гипотезы Канта – Лапласа появляется еще несколько гипотез, причем не только небулярные, но и катастрофические. Одной из первых гипотез такого типа была *гипотеза Бюффона*: Земля и планеты образовались из-за столкновения Солнца с кометой. Далее последовало еще несколько подобных гипотез. Наиболее интересной стала гипотеза английского физика Дж. Х. Джинса, предложенная в 1919 г. Идея Джинса заключалась в предположении о том, что когда-то Солнце (которое к тому времени было уже дос-

таточно старым и похожим на нынешнее) столкнулось или прошло рядом с другой звездой, и в результате из него была вырвана струя газа, сгущение которой и привело к образованию планет. По форме газовая струя напоминала сигару, в центральной части которой были образованы Юпитер и Сатурн, а на концах – все остальные планеты. Джинс считал, что такая гипотеза объясняет несоответствие в распределении массы и момента импульса в Солнечной системе, так как звезда, вырвавшая газовую струю из Солнца, могла придать ей избыток момента импульса. Но теория Джинса имела ряд недостатков. В первую очередь, в ней не учитывается, что Солнечная система – это система упорядоченная, имеющая свое закономерное строение. Единый характер Солнечной системы проявляется в том, что все ее планеты вращаются вокруг Солнца в одном и том же направлении и практически в одной и той же плоскости. Большинство планетных спутников также вращается в этом направлении, в экваториальной плоскости. Вращение планет Солнечной системы вокруг своих осей происходит в том же направлении, что и вращение по траектории. Кроме того, само строение системы закономерно: каждая планета удалена от Солнца приблизительно в 2 раза дальше, чем предыдущая. Принимая во внимание эти закономерности, трудно предположить, что планеты – это осколки космической катастрофы. В 1943 г. Н.И. Парийский рассчитал, что если звезда имела большую скорость, газовый *протуберанец* (масса светящегося газообразного водорода, поднимающаяся с поверхности Солнца – *П. Мур*) должен уйти со звездой. При малой скорости – упасть обратно на Солнце. В случае строго определенной скорости звезды, протуберанец мог стать спутником Солнца с орбитой в 7 раз меньше орбиты Меркурия. Самый же существенный недостаток гипотезы Джинса заключается в том, что она основана на факторе случайности, противоречащем известным данным о других планетных системах. Расчеты также показывают исключительно малую вероятность сближения звезд в космическом пространстве, примерно 10^{-15} . Если бы гипотеза Джинса была справедлива, то число планетных систем в Галактике можно было бы пересчитать по пальцам. Так как число

планетных систем достаточно велико, гипотеза Джинса оказывается несостоятельной.

Некоторое время спустя гипотеза Джинса была модифицирована Вулфсоном. Основное отличие заключалось в том, что выброс газовой струи происходил не со стороны Солнца, а от проходящего объекта – рыхлой и нетяжелой (по сравнению с Солнцем) протозвезды. Захваченные Солнцем отдельные «куски» протозвездного вещества и сформировали планеты и их спутники. Известный астрофизик И.С. Шкловский считал, что эта гипотеза достаточно хорошо объясняла происхождение планет – гигантов, но существование ее возможно только в том случае, если Солнечная система – единственная планетная система во Вселенной.

3.3. Гипотеза О.Ю. Шмидта

Современные концепции происхождения планет Солнечной системы основываются на том, что, рассматривая процессы ее образования, нужно учитывать не только механические, но и другие силы (в частности, электромагнитные). Идея эта была выдвинута шведом Альфвеном и англичанином Хойлом в XX в. и, согласно современным представлениям, считается вероятным, что именно электромагнитные силы сыграли решающую роль при зарождении Солнечной системы.

Наш соотечественник, выдающийся ученый, полярник, Отто Юльевич Шмидт, в 1944 г. выдвинул свою гипотезу возникновения Солнечной системы.

Согласно Шмидту, наша планетная система образовалась из вещества, захваченного из газо-пылевой туманности, через которую некогда проходило Солнце, уже тогда имевшее почти «современный» вид. Сила солнечного притяжения вызвала вращение захваченного облака вокруг самого Солнца, хотя Шмидт предполагал, что облако обладало собственным вращением. Вращение облака вокруг Солнца привело к уплотнению в экваториальной области. Образовавшиеся в результате этого уплотнения тела-спутники, разрастаясь,

создали планеты, которые стали вращаться по круговым орбитам. Образование Земли произошло из облака холодных частиц, постепенно разогревавшегося за счет радиоактивного распада. Такое разогревание привело к выделению воды и газа, в результате чего возникли моря и океаны. Гипотеза Шмидта правильно объясняет закономерности образования Солнечной системы. В рамках этой гипотезы математически обосновано расстояние планет от Солнца и между собой, причины вращательного движения планет в одну сторону. При этом никаких трудностей с вращательным моментом планет не возникает, так как первоначальный момент вращения вещества облака может быть сколь угодно большим. Но, тем не менее, гипотеза имеет ряд недостатков: рассматривается происхождение планет независимо от Солнца; имеется элемент случайности – захват Солнцем межзвездной материи. Кроме того, Солнце должно было иметь очень небольшую скорость (~ 100 м/с), чтобы оно смогло захватить достаточно много вещества.

Более подробно гипотеза О.Ю. Шмидта и ее развитие представлены в параграфе 9 данного пособия (см. п.п. 9.1 – 9.3).

3.4. Гипотеза В.Г. Фесенкова

На основании работ В.А. Амбарцумяна русский академик В.Г. Фесенков выдвигает новую гипотезу образования Солнечной системы, которая заключается в следующем: формирование планет широко распространено во Вселенной и связано с образованием звезд. Звезды возникают в результате сгущения первоначально разреженного вещества. Уплотнение газопылевого облака приводит к образованию звездообразного сгущения, которое под влиянием быстрого вращения удаляется от центра в экваториальной плоскости, образуя диск. В результате уплотнения туманности формируются планетные сгущения, которые впоследствии образуют планеты. Одинаковый возраст Земли и Солнца доказывает, что они образовались одновременно. Отличие гипотезы Фесенкова от гипотезы Шмидта заключается в образовании Земли из раскаленной газопылевой туманности, которая

постепенно остывала. По сравнению с другими гипотезами, гипотеза В.Г. Фесенкова имеет ряд достоинств: обоснован закон зависимости планетных расстояний от плотности среды; в связи с потерей вещества Солнца при выборе материи математически обоснованы причины устойчивости момента импульса; захватом планетами астероидов объясняется обратное вращение некоторых спутников.

3.5. Гипотеза Камерона

Американский ученый Камерон предположил образование Солнечной системы из первичной солнечной туманности. Эта гипотеза является дальнейшим развитием гипотезы Канта – Лапласа. Он связывает образование звезд и планет в единый процесс. Звезды образуются в процессе конденсации облаков межзвездной среды в результате их гравитационной неустойчивости. Масса облака во много тысяч раз превосходит солнечную массу. В стадии гравитационного сжатия находятся облака, имеющие достаточную плотность. Время от времени внешние причины увеличивают плотность облаков, после чего они начинают сжиматься. Такими причинами могут быть взрывы сверхновых звезд неподалеку от облаков. Образовавшаяся после взрыва ударная волна сжимает газ в близлежащем облаке, создавая условия для его дальнейшего сжатия уже под влиянием внутренней силы тяготения. (То, что у «колыбели» Солнечной системы стояла взорвавшаяся звезда, Камерон обосновывает аномальным изотопным составом метеоритов, являющихся частью Солнечной системы). По мере сжатия массивного облака, оно разбивалось на более мелкие сгустки, один из которых и был «солнечной туманностью». Первоначально газ, образовывавший эту туманность, находился в состоянии быстрого, беспорядочного движения и по этой причине обладал значительным вращательным моментом. Это мешало ему сконденсироваться в одно компактное тело – протозвезду. Вместо этого образовался уплощенный диск с радиусом в несколько десятков астрономических единиц. Теоретический анализ показывает, что дальнейшая эволюция диска приводит к образо-

ванию нескольких газовых колец, каждое из которых превратилось в огромный газовый сгусток. Камерон их назвал «гигантскими газовыми протопланетами». Размеры их должны быть порядка астрономической единицы. Таким образом, образование протопланет произошло, когда протосолнце еще не образовалось. В процессе эволюции протопланеты сжимаются, температура в их центральных областях достигает 3 – 4 тысяч К. Во внутренних частях Солнечной системы, благодаря приливным возмущениям, оболочки протопланет как бы «обдирались». Входящее в них вещество попадало обратно в межпланетную среду, обогащая ее кусочками твердых фракций, которые прошли через стадию расплавления во внутренних частях гигантских протопланет. На более поздней стадии эволюции «солнечной туманности», когда она уже потеряла большую часть газа, истраченного на образование Солнца или диссипировавшего, входящие в нее твердые частицы образуют тонкий слой в экваториальной плоскости диска. В дальнейшем из этого слоя образуются астероиды.

Итак, с точки зрения гипотез Джинса и Шмидта, образование планетных систем – это явление редкое или даже уникальное. В то время как с точки зрения гипотез Канта – Лапласа, В.Г. Фесенкова и Камерона образование планетных систем следует ожидать у подавляющего числа звезд. Но не стоит забывать, что все теории носят гипотетический характер, и однозначного решения вопроса об их достоверности пока нет.

3.6. Современные представления о формировании планетной системы

Согласно современным компьютерным расчетам, первоначальный размер облака существенно превышал размеры Солнечной системы, а его состав был аналогичен тому, что наблюдается в плотных холодных межзвездных туманностях, то есть 99 % межзвездного газа и 1 % межзвездной пыли. У нескольких десятков звезд в настоящее время обнаружены планетные системы. Телескопом им. Кека на Гавайских островах была исследована молодая звез-

да HR 4796. На полученных изображениях в инфракрасном диапазоне вокруг нее виден диск радиусом примерно 200 а.е. Центральная часть диска свободна от пыли. Считают, что в центральной области из пыли уже сформировались крупные планетные тела, а во внешней части продолжают формироваться кометы.

В настоящее время общепризнанной является теория формирования планетной системы в четыре этапа. Планетная система формируется из того же протозвездного пылевого вещества, что и звезда, и в те же сроки. Первоначальное сжатие протозвездного пылевого облака происходит при потере им устойчивости. Центральная часть сжимается самостоятельно и превращается в протозвезду. Другая часть облака с массой, примерно в десять раз меньше центральной части, продолжает медленно вращаться вокруг центрального утолщения, а на периферии каждый фрагмент сжимается самостоятельно. При этом стихает первоначальная турбулентность, хаотичное движение частиц. Газ конденсируется в твердое вещество, минуя жидкую фазу. Образуются более крупные твердые пылевые крупинки – частицы. Чем крупнее образовавшиеся крупинки, тем быстрее они падают на центральную часть пылевого облака. Часть вещества, обладающая избыточным моментом вращения, образует тонкий газопылевой слой – газопылевой диск. Вокруг протозвезды формируется протопланетное облако – пылевой субдиск. Протопланетное облако становится все более плоским, сильно уплотняется. Из-за гравитационной неустойчивости в пылевом субдиске образуются отдельные мелкие холодные сгустки, которые, сталкиваясь друг с другом, образуют все более массивные тела – планетезимали. В процессе формирования планетной системы часть планетезималей разрушается в результате столкновений, а часть объединяется. Образуется рой допланетных тел размером около 1 км, количество таких тел очень велико – миллиарды. Затем допланетные тела объединяются в планеты. Аккумуляция планет продолжается миллионы лет, что очень незначительно по сравнению со временем жизни звезды. Прото-солнце становится горячим. Его излучение нагревает внутреннюю область

протопланетного облака до 400 К, образуя зону испарения. Под действием солнечного ветра и давления света легкие химические элементы (водород и гелий) оттесняются из окрестностей молодой звезды. В далекой области, на расстоянии свыше 5 а.е., образуется зона намерзания с температурой примерно 50 К. Это приводит к различиям в химическом составе будущих планет.

Как только масса протопланеты достигает 1 – 2 масс Земли, протопланета способна захватывать атмосферу. ПротоЮпитер буквально за сотню лет увеличил свою массу за счет захвата газов в десятки раз. Затем скорость аккреции падает, т.к. весь газ непосредственно на пути планеты уже вобран, а снаружи он поступает достаточно медленно (за счет диффузии). В нашей Солнечной системе на периферии образовались планеты – гиганты, способные удержать возле себя газовые оболочки. Сначала сформировались ядра планет-гигантов, а затем планеты «нарастили» себе оболочку из водорода и гелия. Двухступенчатая модель образования гигантов подтверждается фактами. Массы ядер планет – гигантов примерно одинаковы. Количество водорода уменьшается с увеличением расстояния. Чем больше масса планеты, тем быстрее идет аккреция газа на нее. По современным расчетам, рост Юпитера продолжался десятки миллионов лет, а рост Сатурна – сотни миллионов. У планет – гигантов возникли собственные минидиски из газа и пыли, из которых затем сформировались кольца и многочисленные спутники. При формировании Юпитера именно в районе его орбиты проходила граница конденсации водяных паров. По современным расчетам, на более близких расстояниях, в поясе астероидов, летучие вещества находились в газообразном состоянии. Это привело к тому, что рост допланетных тел в районе будущего Юпитера ускорился, а в районе пояса астероидов замедлился. Именно поэтому массивный Юпитер обогнал по скорости роста протопланету, более близкую к Солнцу. Но после своего «рождения» Юпитер стал тормозить образование этой планеты в поясе астероидов. Разогнанные тяготением планет – гигантов сгустки вещества выбрасывались на окраину Солнечной сис-

темы, где становились кометами. Гравитационные возмущения со стороны Юпитера и сейчас сильно воздействуют на астероиды. Уран и Нептун росли еще медленнее. К тому времени газа в Солнечной системе из-за действия солнечного ветра осталось еще меньше, поэтому Уран и Нептун содержат меньше водорода в процентном содержании, чем Юпитер. Основными составляющими этих планет – гигантов являются вода, метан и аммиак. В центре Солнечной системы сформировались менее массивные планеты. Здесь солнечный ветер выдул мелкие частицы и газ. А вот более тяжелые частицы, наоборот, стремились к центру. Рост Земли продолжался сотни миллионов лет. Ее недра прогрелись до 1000 – 2000 К благодаря гравитационному сжатию и участвовавшим в аккумуляции крупным телам (до сотен километров в поперечнике). Падение таких тел сопровождалось образованием кратеров с очагами повышенной температуры под ними. Другой и основной источник тепла Земли – распад радиоактивных элементов, в основном, урана, тория и калия. В настоящее время температура в центре Земли достигает 5000 К, что гораздо выше, чем в конце аккумуляции. Солнечные приливы затормозили вращение близких к Солнцу планет – Меркурия и Венеры. С появлением радиологических методов был точно определен возраст Земли, Луны и Солнечной системы – около 4,6 млрд. лет. Компьютерные эксперименты продемонстрировали замечательное свойство нашей планетной системы: пролет звезды с массой порядка 0,1 массы Солнца через ее внешние области мало изменит орбиты планет земной группы. Этого нельзя сказать об удаленных объектах, расположенных в облаке Оорта, для которых расстояние от Солнца в сотни раз больше, чем радиус орбиты Земли. Гравитационное поле Галактики возмущает орбиты малых тел на окраине Солнечной системы и даже вызывает их появление внутри орбиты Земли. Что касается Солнца, центрального тела Солнечной системы, то это – типичная звезда главной последовательности, равновесие которой обусловлено равенством сил газового давления и гравитации. Солнце существует 5 миллиардов лет, и еще столько же будет излучать практически неизменный поток энергии вследствие проте-

кающих в его недрах ядерных реакций. Затем, в соответствии с законами звездной эволюции, Солнце превратится в красный гигант, и его радиус значительно увеличится, станет больше орбиты Земли. После этого газовая оболочка рассеется, и на месте Солнца останется белый карлик. Этот остаток нашего бывшего светила будет высвечивать запасы тепловой энергии в течение миллиардов лет, постепенно превращаясь в невидимый холодный объект. При этом температура на Земле сначала увеличится до 10 000 °С, а затем уменьшится практически до абсолютного нуля.

Современная планетная космогония встречается со многими вопросами, которые требуют строгого решения. Один из таких вопросов – парадокс вращательного момента. Протопланетные диски имеют небольшую массу, в 10 – 100 раз меньшую центральной звезды. Так, например, в Солнечной системе 99,8 % массы заключается в Солнце. Тем не менее, основной вращательный момент приходится именно на планеты. Поэтому вопрос о перераспределении вращательного момента из центральной части конденсирующегося газопылевого облака к периферии очень актуален и до сих пор не решен.

Вопросы для самоконтроля

1. Как классифицируют гипотезы происхождения солнечной системы?
2. В чем сущность гипотезы Канта – Лапласа? Назовите ее основные достоинства и недостатки.
3. В чем заключается гипотезы Джинса?
4. К какому классу гипотез относится гипотеза О.Ю. Шмидта?
5. Укажите достоинства гипотезы В.Г. Фесенкова.
6. Почему большинство современных гипотез образования Солнечной системы являются небулярными?
7. Расскажите, как образовалась Солнечная система по гипотезе Кемпона.
8. Каковы современные представления об образовании планетных систем? На чем они основаны?

4. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Одной из основных концепций современного естествознания является учение о Вселенной как едином целом и обо всей охваченной астрономическими наблюдениями области Вселенной (Метагалактике) как части целого – *космология*.

Выводы космологии основываются на законах физики и на данных наблюдательной астрономии. Как любая наука, космология в своей структуре кроме эмпирического и теоретического уровней имеет также уровень философских предпосылок, философских оснований.

4.1. Классическая космология и ее развитие.

Модели Вселенной

В классической науке существовала так называемая теория стационарного состояния Вселенной, согласно которой Вселенная практически неизменна. Астрономия была статичной: изучалось движение космических тел, создавались их описания и классификация. Вопрос об эволюции Вселенной не ставился.

Классическая космология принимала следующие постулаты:

- космология познает мир таким, как он существует, безотносительно к условиям познания;
- пространство и время во Вселенной абсолютны и не зависят от материальных объектов и процессов;
- пространство и время метрически бесконечны;
- пространство и время однородны и изотропны;
- Вселенная стационарна, т.е. не претерпевает эволюции. Изменяться могут конкретные космические системы, но не мир в целом.

В основе современной космологии лежит предположение о том, что законы природы, установленные в процессе изучения весьма ограниченной части Вселенной, чаще всего опытным путем на планете Земля, могут быть экстраполированы на значительно большие области, в конечном счете, – на

всю Вселенную. Это предположение об устойчивости законов природы в пространстве и времени относится к уровню философских оснований современной космологии.

Возникновение современной космологии связано с созданием релятивистской теории тяготения – общей теории относительности (ОТО) – Эйнштейном (1916 г.). Из уравнений Эйнштейна следует кривизна пространства – времени и связь кривизны с плотностью массы (энергии). Современные космологические модели Вселенной основываются на ОТО, согласно которой метричность пространства и времени определяются распределением во Вселенной гравитационных масс. Свойства Вселенной как единого целого обусловлены плотностью материи и другими физическими факторами.

Модели Вселенной отталкиваются при построении от основного уравнения тяготения, введенного Эйнштейном в ОТО. Это уравнение имеет множество решений, что обуславливает множество космологических моделей.

Первая такая модель появилась в 1917 г. и была разработана самим Эйнштейном. В соответствии с этой моделью мировое пространство однородно и изотропно, материя распределена во Вселенной, в среднем, равномерно, гравитационное притяжение масс компенсируется универсальным космическим отталкиванием. Время существования Вселенной бесконечно, а пространство безгранично, но конечно. Так как метрически в модели Эйнштейна пространство и время не связаны, Вселенная – стационарна. Эйнштейн ввел в полученные уравнения дополнительное слагаемое, обеспечивающее стационарность Вселенной.

Хотя эта модель в то время стала самой удовлетворяющей все известные факты, идеи Эйнштейна стимулировали дальнейшие исследования. В результате взгляд на проблему радикально изменился.

В 1917 г. голландский астроном де Ситтер предложил другую модель, также основанную на решении уравнений тяготения. Эта модель существование свободной от материи Вселенной. Если в такой Вселенной появляется масса, решение де Ситтера перестает быть стационарным: возникает косми-

ческое отталкивание между массами, стремящееся удалить их друг от друга. Такая тенденция к расширению становится заметной только на очень больших расстояниях.

В начале 20-х годов XX в. советский математик А.А. Фридман впервые решил уравнения общей теории относительности применительно ко всей Вселенной, не накладывая условия стационарности. Он показал, что Вселенная, заполненная тяготеющим веществом, должна расширяться или сжиматься. Полученные Фридманом уравнения лежат в основе современной космологии. Решение уравнений Фридмана допускает 3 возможности:

1. Если средняя плотность вещества и излучения во Вселенной равна некоторой критической величине, мировое пространство оказывается евклидовым и Вселенная неограниченно расширяется от первоначального точечного состояния.

2. Если средняя плотность меньше критической, то пространство подчиняется геометрии Лобачевского и также неограниченно расширяется.

3. Если средняя плотность больше критической, то пространство становится римановым, а расширение на некотором этапе меняется сжатием, которое продолжится до первоначального точечного состояния – Вселенная пульсирует.

Согласно современным представлениям, наблюдаемая нами сейчас Вселенная возникла около 15 – 20 миллиардов лет назад из некоторого начального «сингулярного» состояния с бесконечно большими температурой и плотностью и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается. В настоящее время общепринятой точкой зрения на происхождение Вселенной является гипотеза «Большого взрыва» (также называемая гипотезой «Горячей Вселенной»), которая была разработана американским ученым физиком – теоретиком Георгием Гамовым в 1948 г.

4.2. Гипотеза Большого Взрыва.

Рождение Вселенной и ее эволюция

В основе гипотезы Большого Взрыва лежит представление о существовании компенсирующей гравитационное притяжение силе космического отталкивания такой величины, которое сделало возможным разрыв начального состояния материи, и вызвало ее расширение.

В рамках этой концепции полагается, что начальным состоянием Вселенной была точка, называемая *точкой сингулярности*, в которой были сосредоточены все вещество и энергия. Она характеризовалась бесконечно большой плотностью материи. Конкретные свойства точки сингулярности неизвестны, как неизвестно и то, что предшествовало состоянию сингулярности.

Приблизительная хронология событий, последовавших с нулевого момента времени – начала расширения, представлена ниже (табл. 1).

Относительно условий и событий, происходивших до наступления момента $5 \cdot 10^{-44}$ секунды – окончания первого кванта времени – никаких достоверных сведений нет. О физических параметрах той эры можно лишь сказать, что тогда температура была $1,3 \cdot 10^{32}$ градуса, а плотность материи около 10^{96} кг/м³. Приведенные значения являются предельными для применения существующих теорий. Они вытекают из соотношений скорости света, гравитационной постоянной, постоянных Планка и Больцмана и называются «планковскими».

События периода с $5 \cdot 10^{-44}$ по 10^{-36} секунды отражает модель *«инфляционной Вселенной»*. В этой модели начальное состояние Вселенной – физический вакуум. *Физический вакуум* – наинизшее энергетическое состояние материи. Возбужденное состояние такого вакуума называется «ложным вакуумом», который способен создать силу космического отталкивания.

Таблица 1.
Начальная эволюция Вселенной

Время с начала взрыва	Температура (град. Кельвина)	События	Следствия
$0-5 \cdot 10^{-44}$ секунды	$1,3 \cdot 10^{32}$	Никаких достоверных сведений нет	
$5 \cdot 10^{-44} - 10^{-36}$ секунды	$1,3 \cdot 10^{32} - 10^{28}$	Начало действия известных физических законов, эра инфляционного расширения	Расширение Вселенной, продолжающееся и поныне
$10^{-36} - 10^{-4}$ секунды	$10^{28} - 10^{12}$	Эра промежуточных бозонов, а затем – адронная эра, существование свободных кварков	
$10^{-4} - 1-3$ секунды	$10^{12} - 10^{10}$	Возникновение частиц и античастиц из свободных кварков, а также их аннигиляция, возникновение прозрачности вещества для нейтрино	Возникновение барионной асимметрии, появление нейтринного реликтового излучения
1-3 – 100-120 секунд	$10^{10} - 10^9$	Протекание ядерных реакций синтеза ядер гелия и некоторых других легких химических элементов	Установление первичного соотношения химических элементов
300 тысяч – 1 миллион лет	3000 – 4500	Завершение эры рекомбинации	Появление реликтового излучения и нейтрального газа
1 миллион – 1 миллиард лет	4500 – 10	Развитие гравитационных неоднородностей газа	Образование звезд и галактик

В этом вакуумоподобном состоянии находится пространство, заполненное однородным и медленно меняющимся скалярным полем (т. е. полем, квантами которого являются частицы с нулевым спином, типа бозонов Хиггса). Уравнение состояния такого вакуума, связывающее плотность и давление, имеет вид $\rho = -p/c^2$, т.е. Вселенная в начальный момент имеет огромное (планковского масштаба) отрицательное давление. Это отрицательное давление, эквивалентное мощному гравитационному отталкиванию, является причиной взрывного расширения Вселенной, запуская механизм Большого взрыва. Предполагается, что расширение Вселенной происходило по экспоненциальной зависимости (за каждые 10^{-32} секунд диаметр увеличивался в 10^{50} раз). Такой процесс был назван *инфляционным*.

Расширение происходит столь стремительно, что за время раздувания (инфляции) к 10^{-36} с размер Вселенной увеличивается в 10^{10} раз. При этом планковская область (10^{-33} см) вырастает до размеров, неизмеримо превосходящих размер нынешней видимой части Вселенной (10^{28} см). После столь сильного расширения геометрия пространства становится неотличимой от евклидовой геометрии плоского мира, а практически все магнитные монополя и другие первичные неоднородности оказываются далеко за пределами современного горизонта видимости.

Стадия раздувания завершается распадом неустойчивого вакуумоподобного состояния. При этом огромная энергия, запасенная в ложном вакууме, освобождается и идет на рождение пар элементарных частиц. Одним из предположений, не противоречащих процессу инфляции, является следующее: *из большого количества энергии рождаются частицы материи и антиматерии. Но на 100 млн. античастиц во Вселенной образовывалось 100 млн. + 1 частица, и этого дисбаланса стало достаточно для рождения Вселенной.* Вселенная заполняется высокоэнергичными частицами, античастицами и излучением – продуктами распада вакуумоподобного состояния. Вновь рожденные «горячие» частицы взаимодействуют друг с другом, устанавливается термодинамическое равновесие и дальнейшая эволюция проис-

ходит согласно модели горячей Вселенной. Несмотря на то, что этап раздувания представляется в настоящее время необходимым элементом эволюции ранней Вселенной, само существование такого этапа нуждается в подтверждении.

Далее, начиная с момента 10^{-36} секунды от начала взрыва, события описываются в рамках модели «горячей Вселенной». Дальнейшую эволюцию Вселенной принято разделять на четыре эры: адронную, лептонную, фотонную и звездную.

В период $10^{-36} - 10^{-4}$ секунды электромагнитное излучение и элементарные частицы существовали в равновесии, т.е. их объемные концентрации были равны. Очень важную роль в это время играли вначале поля сильных, а затем слабых взаимодействий. Вещество на самом раннем этапе состояло из адронов, и поэтому ранняя эра эволюции Вселенной называется адронной, несмотря на то, что в то время существовали и лептоны. Через миллионную долю секунды с момента рождения Вселенной, температура упала до 10^{13} К. Средняя кинетическая энергия частиц и фотонов составляла около миллиарда ЭВ, что соответствует энергии покоя барионов. В первую миллионную долю секунды эволюции Вселенной происходила материализация всех барионов неограниченно, так же, как и аннигиляция (взаимодействие частицы и античастицы при столкновении, приводящее к их превращению в какие-либо иные частицы, отличные от исходных). Но по прошествии этого времени материализация барионов прекратилась, так как при температуре ниже 10^{13} К фотоны не обладали уже достаточной энергией для ее осуществления. Процесс аннигиляции барионов и антибарионов продолжался до тех пор, пока давление излучения не отделило вещество от антивещества. Нестабильные гипероны (самые тяжелые из барионов) в процессе самопроизвольного распада превратились в самые легкие из барионов (протоны и нейтроны). Так во Вселенной исчезла самая большая группа барионов – гипероны. Нейтроны могли дальше распадаться в протоны, которые далее не распадались, иначе бы нарушился закон сохранения барионного заряда. Распад гиперонов про-

исходил на этапе с 10^{-6} до 10^{-4} секунды. К моменту, когда возраст Вселенной достиг одной десятитысячной секунды (10^{-4} с), температура ее понизилась до 10^{12} К, а энергия частиц и фотонов представляла лишь 100 МэВ. Ее не хватало уже для возникновения самых легких адронов – пионов. Пионы, существовавшие ранее, распадались, а новые не могли возникнуть. Это означает, что к тому моменту, когда возраст Вселенной достиг 10^{-4} секунды, в ней исчезли все мезоны. На этом и заканчивается адронная эра, потому что пионы являются не только самыми легкими мезонами, но и легчайшими адронами. Никогда после этого сильное взаимодействие (ядерная сила) не проявлялась во Вселенной в такой мере, как в адронную эру, длившуюся всего лишь одну десятитысячную долю секунды.

В период 10^{-4} – 1-3 секунды происходило формирование всего множества элементарных частиц, которые, преобразуясь одни в другие, и составляют ныне всю Вселенную. Произошла аннигиляция подавляющего большинства элементарных частиц и античастиц, существовавших ранее. Именно в этот период появилась барионная асимметрия, которая оказалась следствием очень малого, всего на одну миллиардную долю, превышения количества барионов над антибарионами, возникшего сразу после эры инфляционного расширения Вселенной. При температуре 10^{11} градусов плотность Вселенной уже снизилась до величины, характерной для атомных ядер. В этот период уменьшение температуры вдвое происходило за тысячные доли секунды. Когда энергия частиц и фотонов понизилась от 100 МэВ до 1 МэВ, в веществе было много лептонов. Температура была достаточно высокой, чтобы обеспечить интенсивное возникновение электронов, позитронов и нейтрино. Барионы (протоны и нейтроны), пережившие адронную эру, стали по сравнению с лептонами и фотонами встречаться гораздо реже. Лептонная эра начинается с распада последних адронов – пионов – в мюоны и мюонное нейтрино, а кончается через несколько секунд при температуре 10^{10} К, когда энергия фотонов уменьшилась до 1 МэВ и материализация электронов и позитронов прекратилась. Во время этого этапа начинается независимое существование

электронного и мюонного нейтрино, которые называют «реликтовыми». Всё пространство Вселенной наполнилось огромным количеством реликтовых электронных и мюонных нейтрино. Возникает нейтринное море. Но, несмотря на его значительную плотность, составляющую не менее, чем 400 штук/см³, и возможность получить с его помощью важнейшую информацию о том периоде формирования Вселенной, его регистрация пока не реализуема.

На смену лептонной эры пришла фотонная эра, или эра излучения. Как только температура Вселенной понизилась до 10^{10} К, а энергия гамма-фотонов достигла 1 МэВ, произошла только аннигиляция электронов и позитронов. Новые электронно-позитронные пары не могли возникать вследствие материализации, потому что фотоны не обладали достаточной энергией. Но аннигиляция электронов и позитронов продолжалась дальше, пока давление излучения полностью не отделило вещество от антивещества. Со времени адронной и лептонной эры Вселенная была заполнена фотонами. К концу лептонной эры фотонов было в два миллиарда раз больше, чем протонов и электронов. Важнейшей составной Вселенной после лептонной эры становятся фотоны, причем не только по количеству, но и по энергии. Для того чтобы можно было сравнивать роль частиц и фотонов во Вселенной, была введена величина плотности энергии. Это среднее количество энергии в 1 см³. Если сложить вместе энергию всех фотонов, присутствующих в 1 см³, то получим плотность энергии излучения. Сумма энергии покоя всех частиц в 1 см³ является средней энергией вещества во Вселенной. Вследствие расширения Вселенной понижалась плотность энергии фотонов и частиц. С увеличением расстояния во Вселенной в два раза, объём увеличился в восемь раз. Иными словами, плотность энергии частиц и фотонов понизилась в восемь раз. Но фотоны в процессе расширения ведут себя иначе, чем частицы. Плотность энергии фотонов падает быстрее, чем плотность энергии частиц. Преобладание во Вселенной фотонной составляющей над составляющей частиц

на протяжении эры излучения уменьшалось до тех пор, пока не исчезло полностью. К этому моменту обе составляющие пришли в равновесие.

В период с 1 – 3 по 100 – 120 секунд в результате термоядерных реакций начинается процесс *нуклеогенеза* – синтеза атомных ядер. Когда возраст Вселенной равнялся 1 секунде, температура достигала порядка 10^{10} К. А при возрасте, равном 100 секунд, температура составляла около 10^9 К. В это время образовались ядра гелия и очень малое количество ядер некоторых других легких химических элементов, а значительная часть протонов – ядер водорода – объединению в атомные ядра не подверглась. Все они остались погруженными в «океан» свободных электронов и фотонов электромагнитного излучения. С этого момента в первичном газе установилось соотношение: 75 – 78 % водорода и 25 – 22 % гелия по массам этих газов.

В период между 300 тыс. и 1 млн. лет температура Вселенной понизилась до 3000 – 4500 К и наступила эра рекомбинации. Когда температура упала до ~4000 К (как показывают расчеты, возраст Вселенной был около 500 тыс. лет, а размеры примерно в 1000 раз меньше современных) водород перестал быть ионизированным – ядра захватывали электроны и образовались атомы. Вселенная вступила в стадию рождения вещества. Образовались атомы водорода, гелия и некоторое количество атомов лития. После того, как ядра водорода и гелия соединились с электронами, плазма довольно быстро становится нейтральным водородно-гелиевым атомарным газом. Этот газ, расширяясь, быстро охлаждается, гораздо быстрее, чем излучение. Молекулы водорода образоваться не успевают, слишком мала скорость соответствующей химической реакции. Вещество стало прозрачным и излучение, наблюдаемое до сих пор, «отделилось» от него. Наступила продолжительная эра вещества, эпоха преобладания частиц. Ее называют звездной эрой. Она продолжается до наших дней. По сравнению с периодом «большого взрыва» её развитие представляется замедленным. Это происходит по причине низкой плотности и температуры.

В течение последующего – первого миллиарда лет существования Вселенной ее температура снизилась от 3000 – 4500 К до 300 К. В связи с тем, что к этому периоду времени во Вселенной еще не образовалось источников электромагнитного излучения – звезд, квазаров и т.п., а реликтовое излучение уже остыло, эту эпоху называют «темным возрастом» Вселенной.

Когда размеры Вселенной увеличились в несколько десятков раз, а температура газа опустилась ниже 5 К, наступил следующий этап ее развития. Первоначально почти однородная газовая среда разбивалась на отдельные сгустки, которые уплотнялись под действием гравитационных сил. На вопрос, как возникли эти области с избыточной плотностью в почти однородном, да к тому же быстро расширяющемся веществе Вселенной, наука не дает однозначного ответа. Но «зародыши» неоднородности во Вселенной присутствовали всегда, т.е. она никогда не была строго однородной. Компьютерное моделирование показывает, что эти процессы должны были приводить к образованию гигантских звезд с массами в миллионы масс Солнца. По причине таких огромных масс, эти звезды разогревались до очень высоких температур и потому проходили весь свой путь эволюции в течение нескольких десятков миллионов лет, а затем взрывались как сверхновые.

Нагретые до огромных температур поверхности этих звезд порождали мощные потоки ультрафиолетового излучения, которые произвели повторную ионизацию атомов, находящихся в свободном от звезд космическом пространстве. Наступила так называемая эпоха переионизация. Образовавшаяся плазма сильно рассеивала электромагнитное излучение в его коротковолновых спектральных диапазонах. Вселенная как бы погрузилась в густой туман. Только для длинноволнового реликтового излучения эта среда оказалась прозрачной.

Из гигантских газовых сгустков, являющихся протоскоплениями галактик, путем дальнейшей фрагментации возникли меньшие сгустки. Каждый такой сгусток, характеризовавшийся определенной массой и вращательным моментом, постепенно эволюционировал в галактику. После этого расшире-

ние Вселенной сводилось к разлету галактик. Таким образом, галактики и звезды образовались на сравнительно позднем этапе эволюции Вселенной, когда ее размеры были примерно в 10 – 100 раз меньше, чем сейчас.

Первые гигантские звезды послужили во Вселенной источниками более тяжелых, чем литий, химических элементов. Вслед за тем появилась возможность формирования космических объектов второго поколения, содержащих ядра этих атомов. Звезды второго поколения начали формироваться из смеси тяжелых атомов, а также атомов первичных водорода и гелия. Они и звезды последующих поколений уже не были столь массивными и горячими, как звезды первого поколения, поэтому потоки ультрафиолетового ионизирующего излучения от них были значительно меньше. Произошла повторная рекомбинация большинства атомов межзвездного и межгалактического газов, и пространство вновь стало в основном прозрачным для электромагнитного излучения во всех его спектральных диапазонах. Картина Вселенной стала, практически такой, какой мы ее наблюдаем сегодня.

Далеко не весь газ сконденсировался в галактики. Некоторая его часть осталась в межгалактическом пространстве. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение образовавшихся к тому времени звезд ионизировало и нагревало межгалактический газ. Температура его поднялась до многих десятков миллионов градусов. Таким образом, довольно высокая температура межгалактического газа в современной Вселенной есть результат его вторичного разогрева. Межгалактическое пространство заполнилось также сверхэнергичными заряженными частицами – космическими лучами, которые образовались в результате активности ядер галактик и взрывов сверхновых звезд.

4.3. Экспериментальные основания гипотезы Горячей Вселенной

Основными экспериментальными основаниями гипотезы Горячей Вселенной являются следующие три:

1. Наблюдаемое «разбегание» далеких галактик, подчиняющееся закону Хаббла.

Данные наблюдений показывают, что в крупных масштабах Вселенная однородна и изотропна. Это означает, что в любой сфере с фиксированным достаточно большим диаметром (достаточным считается число ~ 300 миллионов световых лет) содержится приблизительно одинаковое число галактик. Утверждение об однородности и изотропности Вселенной в больших масштабах принято называть Космологическим Принципом.

В наблюдаемых спектрах звезд и галактик хорошо различимы спектральные линии поглощения (хромосферами звезд) известных элементов. В 1912 году американский ученый Слайфер исследовал спектрограммы удаленных галактик. Основным их веществом является водород, спектр испускания которого хорошо известен и положение линий определяется законами квантовой механики. Оказалось, что длины волн λ линий поглощения смещены на величину $\Delta\lambda$ в красную область спектра. Это позволяет довольно точно измерять с помощью хорошо известного эффекта Доплера скорость v , с которой данный излучающий объект удаляется ($v > 0$) или приближается ($v < 0$) по отношению к земному наблюдателю:

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{1 + v/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

где v – скорость удаления, c – скорость света.

В 1929 году американский астроном Э. Хаббл опубликовал статью "Связь между расстоянием и лучевой скоростью внегалактических туманностей", в которой сформулировал "закон разбегания": "Далекие галактики уходят от нас со скоростью, пропорциональной удаленности от нас. Чем дальше галактика, тем больше ее скорость".

$$v = HR, \quad H \cong 15 \frac{\text{км}}{\text{с}} / 10^6 \text{ световых лет.}$$

Коэффициент пропорциональности H называют постоянной Хаббла. Открытие Хабблом закона разбегания галактик лежит в основе концепции расширяющейся Вселенной. В соответствии с современными космологиче-

скими концепциями, Вселенная расширяется, но центр расширения отсутствует: из любой точки Вселенной картина расширения будет представляться той же самой, а именно, все галактики будут иметь красное смещение, пропорциональное расстоянию до них. Само пространство как бы раздувается. Наглядной моделью такого разбегания может послужить надуваемый резиновый шарик с нанесенными хаотически на его поверхность точками – «галактиками». При надувании все эти точки будут удаляться друг от друга в точном соответствии с законом Хаббла, то есть расстояния между ними будут возрастать, причем тем быстрее, чем дальше они расположены друг от друга.

Из пропорциональности v и H в законе вытекает фундаментальный вывод относительно существования «начала мира». Где-то в прошлом был момент, в который любая из наблюдаемых сейчас галактик была бесконечно близка к нашей галактике («любая к любой») в силу Космологического Принципа. Из-за такого сближения плотность вещества во Вселенной в «начальный момент» становится бесконечной. Но это не означает, что все это вещество было собрано в одном месте, так как тот же Космологический Принцип требует, чтобы плотность становилась бесконечной в любой точке пространства.

Оценить «возраст Вселенной» (t_0) можно очень просто, если предположить, что постоянная Хаббла H в процессе расширения остается неизменной: тогда $t_0 = 1/H \cong 20$ миллиардов лет. На самом деле предположение о неизменности неправильно и точную оценку t_0 можно получить только с помощью космологической модели Фридмана. К качественным изменениям это не приводит, а для t_0 тогда получается $t_0 = 2H/3 \cong 14$ миллиардов лет.

Таким образом, большинство галактик удаляются от нас с огромными скоростями, причем скорость «разлета» по мере удаления галактик растет. Так, найденная по «красному смещению» скорость удаления радиогалактики «Лебедь» близка к 17000 км/с. В 1960 году был получен спектр радиогалактики 3C295. Оказалось, что известная ультрафиолетовая спектральная линия,

принадлежащая ионизированному кислороду, смещена в оранжевую часть спектра. Отсюда скорость удаления этой галактики составляет 138000 км/с, или почти половину скорости света. Таким образом, во Вселенной происходит разбегание галактик, что является следствием большого взрыва. По мере удаления галактик, их скорость растет примерно на 50 км/с на каждый миллион парсек (1 ПК = 3,26 световых года). Существует точка зрения, что Вселенная будет расширяться вечно.

2. Открытие в 1964 году А. Пензиасом и Р. Вильсоном космического фона «реликтового излучения», по интенсивности и спектральному составу эквивалентного излучению черного тела с температурой около 3 К.

Это важнейшее космологическое открытие нашего века, которое было сделано случайно. В 1964 году американские астрономы Арно Пензиас и Роберт Вильсон решили измерить фоновое радиоизлучение нашей Галактики в направлениях вне ее плоскости эклиптики. Для этого они решили воспользоваться построенной для связи со спутниками рупорной антенной лаборатории фирмы Белл-Телефон, сконструированной так, чтобы обеспечить сверхнизкий уровень собственных шумов. Последнее очень важно, так как ожидаемое фоновое радиоизлучение галактики также подобно радиошуму, который следовало выделить на фоне других шумов от атмосферы, самой антенны и ее усилительных цепей.

После тщательного анализа и оценки всех этих «паразитных» шумов Пензиас и Вильсон начали измерения на сравнительно коротких волнах с длиной 7,35 см (микроволновый диапазон), для которых радиошум галактики должен практически отсутствовать. Они ожидали, что весь сигнал будет тогда простой суммой уже известных «паразитных шумов». Но оказалось, что кроме них система регистрирует некоторый слабый дополнительный радиошум, интенсивность которого не зависит ни от направления антенны, ни от времени суток.

Пензиас и Вильсон не понимали природы этого дополнительного радиошума и даже разобрали, почистили и вновь собрали всю антенну, чтобы

исключить добавочные помехи от возможных загрязнений. Но это практически не изменило результат, и им пришлось констатировать, что по непонятным (для них) причинам их антенна принимает дополнительный слабый радиосигнал внеземного происхождения, интенсивность которого постоянна во времени и не зависит от направления. Измеренная ими на длине волны 7,35 см интенсивность этого радиосигнала оказалась равной интенсивности излучения на данной длине волны абсолютно черного тела с температурой около 3 К. Пензиас и Вильсон наткнулись на этот факт случайно и некоторое время даже не решались опубликовать свои результаты, поскольку не понимали природы обнаруженного ими радиосигнала (в 1978 г. они получили за свое открытие Нобелевскую премию). Но уже в конце сороковых годов появились первые работы физиков-теоретиков, в которых предсказывалось, что в настоящий момент вся Вселенная должна быть заполнена равновесным электромагнитным излучением с эффективной температурой в несколько градусов Кельвина.

Согласно утверждениям теоретиков, на ранней стадии Вселенная была заполнена равновесным излучением с очень высокой температурой. В процессе расширения Вселенной это излучение охлаждалось, оставаясь равновесным, и к настоящему времени температура опустилась до значений нескольких градусов Кельвина. Именно это «реликтовое излучение», оставшееся от начальной фазы горячей ранней Вселенной, обнаружили Пензиас и Вильсон. Они узнали об этом, вступив в контакт с физиками из Принстонского университета, которые были знакомы с теорией горячей (на ранней стадии) Вселенной и уже строили специальную антенну для обнаружения реликтового излучения. Но Пензиас и Вильсон их опередили.

Наличие реликтового излучения считается в настоящий момент достоверно установленным фактом. Основной проверкой является возможность его измерения на разных длинах волн. В настоящее время измерения выполнены для десятков различных длин волн, как в микроволновой, так и в инфракрасной области спектра электромагнитных волн. По последним данным,

полученным с помощью установленной на спутниках аппаратуры, современное значение температуры реликтового излучения равно 2,74 К.

3. Наблюдаемый химический состав Вселенной, состоящей по массе приблизительно из 3/4 водорода и 1/4 гелия с небольшой (порядка 1%) примесью прочих элементов.

Эти данные получены по спектрам звезд и межзвездного газа и хорошо согласуются с теоретическими моделями астрофизики, описывающими состав и эволюцию звезд. Приведенные цифры 3/4 и 1/4 относятся к начальной фазе этой эволюции, в процессе которой в звездах вырабатываются и другие, в том числе тяжелые, элементы.

По современным представлениям, где-то в первые минуты своего существования Вселенная прошла «эру нуклеосинтеза», во время которой и образовались водород и гелий в пропорции 3 : 1 плюс ничтожная примесь других легких элементов, в частности лития (Li), и изотопов водорода – дейтерия (D) и трития (T). Все прочие более тяжелые элементы образовались уже гораздо позднее внутри звезд, а в межзвездное пространство они попадают при взрывах сверхновых и т.п. Этот простой факт преобладания водорода во Вселенной позволил теоретикам предсказать необходимость существования реликтового излучения.

Для дальнейшего изложения также важно сопоставить плотность ядерных частиц (протонов и нейтронов) в наблюдаемой Вселенной с плотностью числа фотонов в реликтовом излучении.

При современной температуре ~ 3 К в фоне реликтового излучения содержится 550 млн. фотонов на 1 м^3 . Оценка плотности вещества по данным наблюдений остается пока неопределенной, но в любом случае не выходит из границ от 6 до 0,03 ядерных частицы на 1 м^3 . Таким образом, на одну ядерную частицу приходится порядка $10^8 - 10^{10}$ фотонов или, в среднем, 10^9 – один миллиард фотонов на одну ядерную частицу.

Для объяснения соотношения 3 : 1 как раз и требуется наличие очень большого числа фотонов на одну ядерную частицу. Это число не определяет-

ся автоматически условиями термодинамического равновесия. Оно остается неизменным на протяжении рассматриваемого периода эволюции, поскольку обе плотности числа частиц изменяются по одному и тому же закону (т.е. полное число частиц сохраняется). Если бы фотонов (излучения) не было, то при $T = 10^{10}$ К протоны и нейтроны уже могли бы сливаться в ядра ${}^4\text{He}$, так как их энергия связи превышает характерную тепловую энергию $E = 1$ МэВ. Наличие фотонов с такой же энергией тормозит процесс нуклеосинтеза, поскольку фотоны, сталкиваясь с ядрами, способствуют их развалу на исходные элементы. Этот конкурирующий с нуклеосинтезом процесс идет тем быстрее, чем больше плотность числа фотонов. Для обеспечения задержки нуклеосинтеза вплоть до температур порядка 10^9 К (что нужно для объяснения экспериментального отношения 3 : 1), согласно расчетам специалистов по ядерным реакциям, необходима очень высокая плотность числа фотонов порядка $10^8 - 10^{10}$ на ядерную частицу. Она столь велика, что даже к настоящему времени должна оставить заметный след в форме реликтового излучения – именно из этих соображений оно и было предсказано теоретиками.

4.4. Модели будущего Вселенной

Вселенная эволюционировала и эволюционирует. Каково же ее возможное будущее развитие? Для этого необходимо знать, замкнута ли Вселенная или открыта. То есть, будет ли она сколь угодно долго расширяться («открытая» модель) или когда-нибудь ее расширение сменится сжатием. Выбор между этими двумя моделями можно будет сделать, когда будет определена средняя плотность вещества во Вселенной. Для того, чтобы Вселенная была замкнута, нужно, чтобы средняя плотность межгалактического газа была примерно в 30 раз больше средней плотности галактик.

Сравнительно просто предсказать будущее Вселенной для *«закрываемой» модели*. Если Вселенная начнет сжиматься, то этот процесс ничто не остановит, и она, пройдя через компактную сверхплотную горячую фазу, сожмется в точку. В этом случае Вселенная как бы повторяет историю в обратном на-

правлении. Весь цикл «расширение – остановка – сжатие» должен занять время порядка 100 млрд. лет.

В случае *«открытой» модели*, которой придерживается большинство специалистов, Вселенная в далеком будущем претерпит ряд качественных изменений. Через 10^{14} лет (что во много тысяч раз превышает возраст современной Вселенной) «остынут», исчерпав свое ядерное горючее, все карликовые звезды с массой, превышающей несколько сотых долей солнечной массы. Эти звезды превратятся в белые карлики, которые, остывая, превратятся в холодные черные карлики с размерами порядка Земли и очень большой плотностью. Несмотря на то, что взаимные случайные столкновения звезд в галактиках будут происходить редко, через 10^{15} лет по этой причине почти все планеты будут оторваны от своих материнских звезд. По этой же причине спустя 10^{19} лет, по крайней мере, 90% всех звезд покинут свои галактики, а центральные области последних сожмутся, образуя весьма массивные ($M \sim 10^9 M_{\odot}$) черные дыры. Итак, наступит эпоха, когда галактики прекратят свое существование (от них останутся только массивные черные дыры), а из звезд останутся только холодные белые карлики. При этом отдельные звезды будут участвовать в расширении Вселенной. До этой эпохи разлетались только галактики, размеры которых сравнительно мало менялись, так что расстояния между звездами были такими же, как в нашу эпоху, т.е. несколько световых лет. Теперь же расстояния между соседними звездами будет в начале этой эпохи превышать много мегапарсек, и далее будет неограниченно расти.

Считается, что через $\sim 10^{65}$ лет любое твердое тело становится жидким даже при абсолютном нуле. Значит все остывшие белые карлики станут сферическими жидкими каплями. Через 10^{1500} лет любое вещество становится радиоактивным. За такие промежутки времени легкие ядра сливаются в более тяжелые, а тяжелые начинают делиться. В результате этих процессов все жидкие капли – бывшие звезды – станут железными. Черные дыры также не являются вечными образованиями, как было показано английским теоретиком Хокингом. Через промежутки времени, пропорциональные кубам их

масс, они «испарятся», излучая электромагнитные волны с длиной порядка размеров черной дыры. Например, черная дыра с массой, равной 10 солнечным массам, «испарится» через 10^{67} лет, излучая радиоволны с длиной около 30 км. А сверхмассивная черная дыра ($M \sim 10^9 M_{\odot}$), бывшее ядро какой-нибудь галактики, испарится через 10^{91} лет, излучая сверхдлинные волны длиной порядка 10 астрономических единиц. Итак, все черные дыры в конце концов превратятся в сверхдлинноволновое электромагнитное излучение. Когда истечет более чем $10^{10^{26}}$ лет, железные капли превратятся в нейтронные звезды (которые потом превратятся в черные дыры), либо прямо в черные дыры. Последние же практически мгновенно (всего за 10^{67} лет) испарятся. В конечном итоге Вселенная превратится в совокупность разлетающихся длинноволновых квантов и нейтрино.

Вопросы для самоконтроля

1. Сравните понятия "космология" и "космогония".
2. Сформулируйте постулаты классической космологии.
3. Что изменилось в космологии с появлением ОТО?
4. Охарактеризуйте модели Вселенной.
5. Что представляет из себя гипотеза "Большого Взрыва"? Почему эта гипотеза так называется?
6. В чем заключается модель "инфляционной Вселенной"?
7. Охарактеризуйте основные этапы образования Вселенной.
8. Перечислите доказательства гипотезы Горячей Вселенной. Насколько они убедительны с вашей точки зрения?
9. Сформулируйте закон Хаббла. Каковы его следствия?
10. Что называется "реликтовым излучением"? Как оно было открыто?
11. Как получают данные о химическом составе Вселенной? Как эти данные интерпретируют?
12. Расскажите о моделях будущего Вселенной.

5. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

5.1. Основные характеристики звезд

В нашей Галактике 97% вещества составляют звезды. Основные параметры звезд – масса, радиус, светимость, химический состав, средняя плотность, спектральный класс, температура поверхностных слоев.

Температура поверхностных слоев определяет цвет:

3-4 тыс. К – красный;

5-7 тыс. К – желтый;

10-12 тыс. К – белый с голубоватым оттенком;

20 тыс. К – голубой.

Цвет звезды является абсолютно объективной характеристикой, так как каждому цвету присущ свой тип спектра. У горячих звезд с температурой 20 тысяч К в спектре наблюдаются линии ионизированного водорода и гелия. При температуре 10 тысяч К наиболее интенсивны линии водорода. С температурой 6 – 7 тысяч К – линии ионизированного кальция. У самых холодных красных звезд преобладают линии простейших молекул или групп атомов (H_2O , $-\text{CH}$, CN – и др.).

Светимость – полное количество энергии, излучаемое звездой в единицу времени. Обычно выражают в единицах светимости Солнца: $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с. По светимости звезды различаются в широких пределах. Есть звезды, светимость которых больше в 10 и 100 тысяч раз, чем у Солнца. Однако, подавляющее большинство звезд имеет светимость всего в 1000 раз больше Солнца (желтые карлики).

Масса меняется в очень узких пределах. Очень мало звезд, масса которых больше или меньше массы Солнца в 10 раз. $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ кг.

Радиус изменяется очень широко. Есть звезды по размерам не превышающие земной шар (белые карлики), а есть огромные, размер которых превышает орбиту Марса (красные гиганты).

Плотность звездного вещества также колеблется в широких пределах. Средняя плотность Солнца $1,4 \text{ г/см}^3$. У гигантов плотность может быть в миллионы раз меньше, чем плотность воздуха. А у белых карликов достигает десятков или сотен кг/см^3 .

Химический состав. Звезды, как правило, представляют собой водородные или гелиевые плазмы. Остальные элементы присутствуют в очень небольших количествах. Средний химический состав наружных слоев звезды выглядит следующим образом: на 10000 атомов водорода приходится 1000 атомов гелия, 5 атомов кислорода, 2 атома азота, 1 атом углерода, 0,3 атома железа.

Спектральный класс.

Последовательность спектров звезд, получающихся при непрерывном измерении их температуры, обозначается буквами: O, B, A, F, G, K, M от самых горячих к очень холодным. Каждая такая буква описывает спектральный класс. Спектры звезд очень чувствительны к изменению температуры их поверхностных слоев, поэтому в каждом классе выделяют 10 подклассов. Если построить диаграмму спектральный класс – светимость, то окажется, что большинство звезд (~ 90%) находится в пределах сравнительно узкой полосы, идущей от левого верхнего угла диаграммы к правому нижнему. Это так называемая главная последовательность звезд. В верхнем правом углу расположены красные гиганты (G, K, M), а в левом нижнем – очень горячие белые карлики (B, A, F).

5.2. Этапы эволюции звезд

В соответствии с современными представлениями, звезды образовались из газопылевого облака в результате его конденсации. На первой стадии формируется газопылевой шар под влиянием сил всемирного тяготения. Когда плотность молекулярного облака (или отдельной его части) становится настолько большой, что гравитация преодолевает газовое давление, облако начинает неудержимо *коллапсировать* (сжиматься). Коллапс плотной части

облака в звезду, а чаще – в группу звезд, продолжается несколько миллионов лет (сравнительно быстро по космическим масштабам). В среднем в Галактике ежегодно рождается примерно десяток звезд с общей массой около 5 масс Солнца.

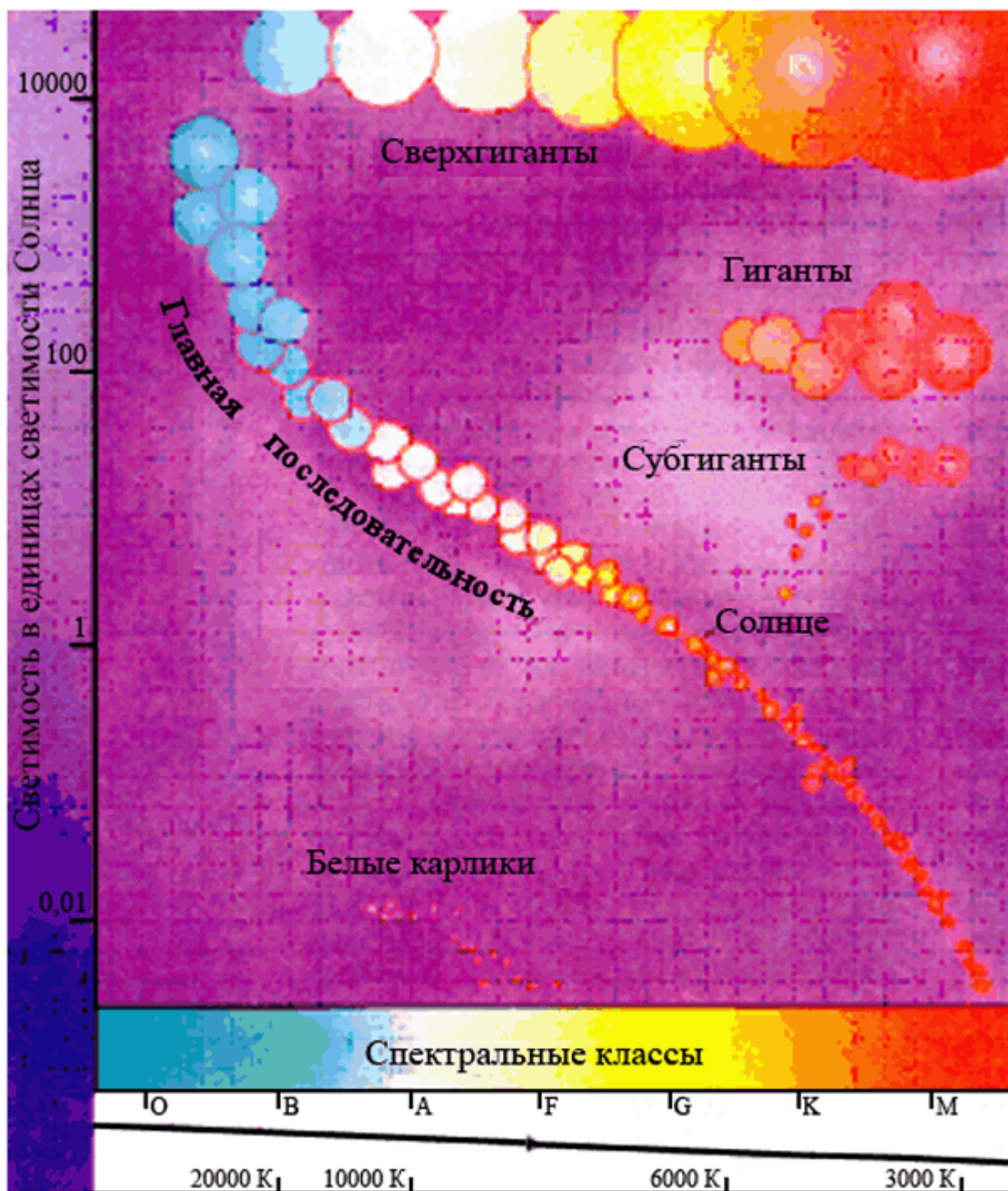
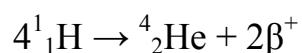


Рис. 4. Диаграмма спектр-светимость.
(Диаграмма Герцшпрунга-Рассела)

Плотный фрагмент молекулярного облака, в котором еще не достигнуты температуры, необходимые для начала термоядерных реакций, т.е. превращения облака в звезду, называется в звездной космогонии протозвездой. **Протозвезда** (от греч. «протос» – первый) – это космический объект, который уже не облако, но еще и не звезда. При сжатии протозвезды температура ее повышается. На начальных этапах температура еще недостаточна для протекания термоядерных реакций. Дальнейшее сжатие сопровождается ростом температуры. Значительная часть энергии при этом рассеивается в виде излучения. Температура поверхностных слоев звезды сравнительно низка, а светимость почти такая же, как у обычной звезды. Поэтому на диаграмме «спектр – светимость» такие звезды располагаются вправо от главной последовательности, т.е. попадают в область красных гигантов или красных карликов в зависимости от массы.

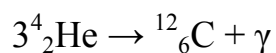
В дальнейшем протозвезда продолжает сжиматься. Как только температура в ее недрах достигнет 10 млн. К, осуществляется запуск первичной термоядерной реакции:



Спектр звезды становится более «ранним» и она «садится» на главную последовательность. Давление газа внутри звезды уравнивает притяжение, и газовый шар перестает сжиматься. Наступает состояние гидростатического равновесия. Протозвезда становится звездой. В этом режиме звезда может существовать миллиарды лет. Например, Солнце за 5 млрд. лет своего существования сожгло менее 10% водорода. Чтобы пройти самую раннюю стадию эволюции протозвезд нужно немного времени. Если масса протозвезды больше солнечной – нужно лишь несколько миллионов лет; если меньше – несколько сот миллионов лет.

Излучение звезды, находящейся на главной последовательности, поддерживается термоядерными реакциями, идущими в центральных областях. Время пребывания звезды на главной последовательности определяется ее первоначальной массой. Если масса очень велика, излучение звезды имеет

огромную мощность, и она быстро расходует запасы водородного горючего. **Голубые гиганты** (спектральный класс O), с массой, превышающей солнечную в несколько десятков раз, выжигают весь свой водород за несколько миллионов лет. Звезды с массой типа солнечной находятся на главной последовательности 10 – 15 млрд. лет. Выгорание водорода происходит только в центральных областях звезды, так как звездное вещество перемешивается только в центральных областях, где протекают ядерные реакции. Наружные слои сохраняют относительное содержание водорода неизменным. Масса и радиус центральной области постепенно уменьшаются, при этом звезда медленно перемещается на диаграмме «спектр – светимость» вправо. Этот процесс происходит быстрее у сравнительно массивных звезд. Когда весь водород в ядре звезды выгорит, выделение энергии в центральных частях прекращается. Давление газа не в состоянии уравновешивать силы гравитации и гелиевое ядро звезды начинает сжиматься, а температура повышается. Ядерные реакции еще протекают, но в периферических областях. Размеры звезды растут, она сходит с главной последовательности и переходит в разряд **красных гигантов**, располагающихся на диаграмме в правом верхнем углу. Звезда принимает гетерогенную структуру. Оболочка ее разбухает до огромных размеров. Предполагают, что звезда типа нашего Солнца может увеличиться в размерах настолько, что его внешняя оболочка выйдет за пределы орбиты Венеры. Температура поверхности звезды становится низкой, хотя светимость ее высока. При переходе звезды в стадию красных гигантов скорость ее эволюции значительно увеличивается. После того, как температура сжимающегося плотного гелиевого ядра звезды – красного гиганта – достигает 100 – 150 млн. градусов, начинается новая ядерная реакция. Эта реакция состоит в образовании ядра углерода из трех ядер гелия и сопровождается потерей массы (дефект массы):



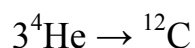
Как только начнется эта реакция, сжатие ядра прекратится, а температура и светимость резко возрастают. Звезда снова вступает в устойчивый режим горения.

Что произойдет, когда выгорит весь гелий? Звезды с массой, меньше, чем 1,2 массы Солнца, сбрасывают существенную часть своей массы, образуя наружную оболочку. Обнажается горячее ядро звезды, а отделившаяся оболочка расширяется и рассеивается. Малая масса не может обеспечить повышение температуры при гравитационном сжатии для запуска новой термоядерной реакции. Ядро начинает остывать, и звезда превращается в «белого карлика». *Белый карлик* находится в состоянии гравитационного равновесия и его давление определяется давлением вырожденного электронного газа. Поверхностные температуры белого карлика высоки – от 100000 К до 200000 К. Массы белых карликов порядка солнечной ($0,6 M_{\odot}$ – $1,44 M_{\odot}$), а размеры – порядка размеров Земли. Поэтому они имеют чрезвычайно высокую плотность (10^6 г/см³). Ядерные реакции в белом карлике не идут. Звезда сжимается до тех пор, пока силы гравитационного притяжения не будут уравновешены следующим силовым барьером. В его роли выступает давление вырожденного электронного газа. Электроны, не участвуя в реакциях ядерного синтеза и свободно перемещаясь между ядрами, на определенной стадии сжатия оказываются лишенными «жизненного пространства» и начинают «сопротивляться» дальнейшему гравитационному сжатию звезды. Состояние звезды стабилизируется, и она превращается в вырожденного белого карлика, который будет излучать в пространство остаточное тепло, пока не остынет окончательно. На диаграмме «спектр – светимость» белые карлики располагаются в левом нижнем углу. Белые карлики, по-видимому, представляют собой заключительный этап эволюции большинства звезд. Постепенно остывая, они все меньше и меньше излучают, переходя в невидимые «*черные карлики*». Это мертвые холодные звезды очень большой плотности, в миллионы раз плотнее воды. Их размеры меньше размеров земного шара, хотя массы сравнимы с массой Солнца. Процесс остывания белых карликов

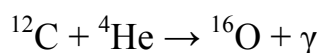
длится много сотен миллионов лет. Так заканчивают свое существование большинство звезд. Солнце в будущем – это белый карлик.

Массивные звезды эволюционируют иначе. На заключительной стадии многие массивные звезды вступают в стадию неустойчивого развития и взрываются. Это явление получило название *«взрыв сверхновой звезды»*. В максимуме своего блеска звезда может быть столь же яркой, как остальные сотни миллиардов звезд галактики, вместе взятые. Это явление во Вселенной не очень редкое. В больших звездных системах, подобных нашей Галактике, вспышки сверхновых звезд происходят в среднем раз в столетие или несколько чаще. В чем причина взрыва сверхновых? Массивные звезды после выгорания гелия не могут превратиться в белые карлики. После того, как гелий израсходуется, сжатие ядра продолжается. Температура вновь возрастает. Начинаются другие ядерные реакции, которые протекают до тех пор, пока не исчерпается энергия, запасенная в атомных ядрах. Запуск следующих реакций нуклеосинтеза приводит к образованию углерода, затем кремния, магния – и так далее, по мере роста ядерных масс. При этом при начале каждой новой реакции в ядре звезды предыдущая реакция продолжается в ее оболочке. Все химические элементы вплоть до железа, из которых состоит Вселенная, образовались именно в результате нуклеосинтеза в недрах умирающих звезд этого типа.

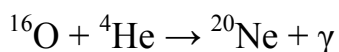
К моменту, когда в ядре звезды температура достигает $1,5 \cdot 10^8$ К, а плотность $5 \cdot 10^4$ г/см³, начинается так называемая тройная реакция с участием ядер гелия:



Наряду с рассмотренной реакцией возможна реакция с образованием кислорода:

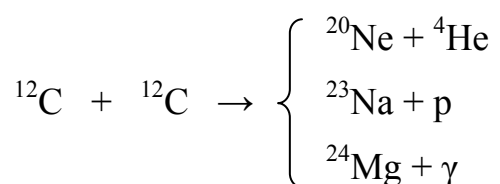


Образующиеся ядра ^{16}O вступают в реакцию с ядрами ^4He и образуют ядра неона:

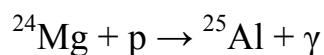


Для массивной звезды (масса звезды ~ 25 масс Солнца) реакция горения водорода продолжается несколько миллионов лет, а горение гелия происходит в десять раз быстрее.

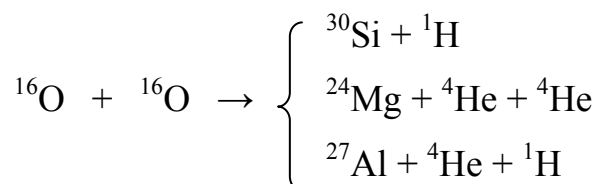
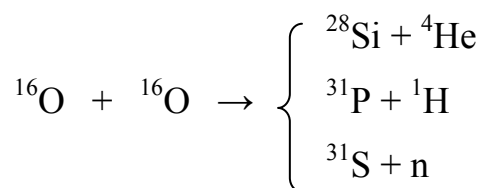
Горение гелия приводит к росту звездного ядра, состоящего главным образом из углерода и кислорода. Звездное ядро окружено слоем, в котором продолжается горение гелия. Когда температура и плотность звездного ядра становятся достаточно большими ($5 \cdot 10^8$ К) в результате гравитационного сжатия ядра звезды, начинается слияние ядер углерода с образованием ядер неона, натрия и магния:



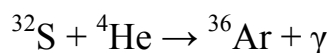
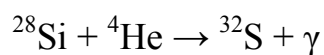
Одновременно с этими реакциями образуются алюминий, кремний и некоторые другие соседние нуклиды в результате захвата образующимися нуклидами высвободившихся протонов, нейтронов, α -частиц. Например, ${}^{25}\text{Al}$ образуется в результате реакции:



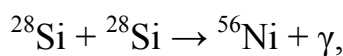
Горение кислорода подразумевает слияние двух ядер ${}^{16}\text{O}$ при энергиях несколько МэВ (10^9 К). Эта реакция имеет также несколько каналов:



Вслед за стадией горения ${}^{16}\text{O}$ по мере роста температуры и плотности следует горение кремния. Процесс горения кислорода длится около 6 месяцев, а горение кремния происходит за сутки.



Горение кремния приводит к образованию никеля:



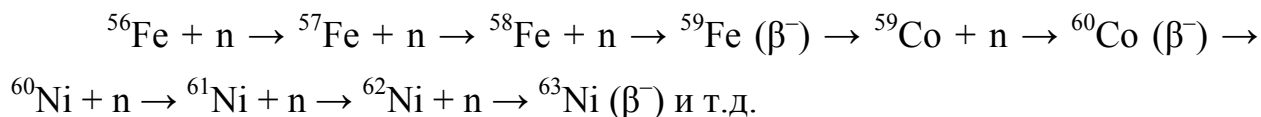
который в результате двух β^- -распадов превращается в ${}^{56}\text{Fe}$. Горение кремния является конечной стадией термоядерного синтеза нуклидов в массивных звездах, на которой образуются ядра группы железа, обладающие максимальной удельной энергией связи. Последующий термоядерный синтез в результате присоединения легких ядер ядрами группы железа не имеет места, так как этот процесс должен протекать только с поглощением энергии.

К моменту завершения термоядерных реакций ядро звезды состоит уже из чистого железа, которое играет роль ядерной золы. Теперь ничто не может воспрепятствовать дальнейшему коллапсу звезды – он продолжается до тех пор, пока плотность ее вещества не достигнет плотности атомных ядер. Резкое сжатие вещества в центральных областях звезды порождает взрыв огромной силы, в результате которого внешние слои звезды разлетаются с громадными скоростями. При взрыве сверхновой происходят цепные реакции, сопровождающиеся образованием большого количества нейтронов. В этих условиях образуются тяжелые химические элементы вплоть до трансурановых.

Синтез атомных ядер, расположенных в таблице Д.И. Менделеева за группой железа, согласно отмеченным выше причинам, должен обеспечиваться другими механизмами и, как показали М. и Дж. Бербиджи, У. Фаулер и Ф. Хойл еще в 1957 году, такие нуклиды образуются в результате трех принципиально разных s -, r - и p -процессов.

s-Процесс представляет собой медленный захват нейтронов, при котором образующиеся неустойчивые ядра распадаются прежде, чем успеют присоединить следующий нейтрон. Поэтому можно заключить, что s -процесс идет в недрах звезд при их нормальной стадии эволюции. Скорость s -процесса меньше скорости β -распада образующихся в процессе захвата ней-

тронов радиоактивных ядер. Длительность s-процесса от 10^2 до 10^5 лет. s-Процесс отвечает за образование максимумов в распространенности элементов при $A \sim 90, 138$ и 208 . Важным условием протекания s-процесса в звездах является источник нейтронов. Примером фрагмента цепочки последовательных ядерных s-захватов нейтронов может служить схема:



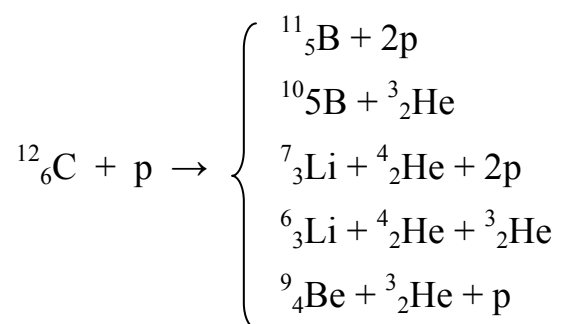
Завершаются цепочки превращений s-процесса на изотопах свинца и висмута ${}^{209}\text{Bi}$, так как последующие нуклиды ${}^{210}\text{Po}$ и ${}^{211}\text{Po}$ претерпевают α -распад с периодом полураспада 138 суток и 0,5 секунд соответственно, превращаясь в свинец.

r-Процесс приводит к образованию тяжелых и сверхтяжелых элементов, находящиеся в таблице Менделеева за висмутом. В этом процессе ядро должно быстро последовательно захватить много нейтронов, прежде чем произойдет его β -распад. Характерное время r-процесса 0,01 – 100 с. В результате r-процесса в кривой распространенности элементов возникают максимумы при $A = 80, 130$ и 195 . Начальная концентрация нейтронов в звездах должна быть достаточно большой и составлять 10^{33} в 1 см^3 . Зародышевыми ядрами в r-процессе являются, так же как и для s-процесса, ядра группы железа.

p-Процесс представляет собой образование редких, богатых протонами ядер путем захвата протонов или позитронов, так как ни одним процессом нейтронного захвата эти ядра не могут быть созданы. К таким ядрам следует в первую очередь отнести изотопы олова ${}^{111}\text{Sn}$, ${}^{112}\text{Sn}$ и ${}^{115}\text{Sn}$. Однако физические модели условий протекания p-процесса в звездах остаются пока в большей степени неоднозначными по сравнению с процессами захвата нейтронов.

При взрыве сверхновых звезд происходит также образование изотопов легких элементов. Легкие нуклиды ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{11}\text{B}$ характеризуются более низкой распространенностью и стабильностью по отношению к He, C, N, O и не могут образоваться в процессе обычного нуклеосинтеза в недрах

звезд, так как эти нуклиды легко разрушаются. На сегодняшний день общепризнанной гипотезой образования легких ядер являются *реакции скалывания* – реакции деления ядер C, N, O при столкновении с ядрами H и He либо в космических лучах, либо космических лучей с атомами межзвездных газовых облаков. *Космические лучи* – это поток заряженных частиц, включая ядра ряда атомов достаточно большой энергии, которые заполняют пространство Галактики. Считается, что основным источником космических лучей являются взрывы сверхновых звезд. В космических лучах содержание Li, Be, B приблизительно на пять порядков больше, чем в звездах. Это указывает на то, что реакции скалывания имеют место в космических лучах. В качестве примера приведем реакции скалывания ^{12}C под действием протонов:



Эти процессы нуклеосинтеза получили название *X-процессов*.

Судьба коллапсирующего остатка звезды зависит от его массы. Если масса меньше, чем $\sim 2,5\text{-}3 M_{\odot}$ (*предел Оппенгеймера-Волкова*), то давление вырожденного газа нуклонов препятствует неограниченному сжатию звезды и эволюция останавливается на стадии нейтронной звезды.

Нейтронные звезды являются одними из самых интересных астрофизических объектов с физической точки зрения. Для них характерны такие явления и свойства как: сверхтекучесть, сверхпроводимость, сверхсильные магнитные поля, излучение нейтрино, эффекты специальной и общей теории относительности. В недрах нейтронных звезд могут существовать экзотические формы материи (конденсаты различных элементарных частиц, кварковое вещество). В 1934 г. Вальтер Бааде (1893-1960) и Фриц Цвикки (1898-1974) предсказали, что нейтронные звезды могут рождаться во вспышках

сверхновых. Они были неожиданно открыты как радиопульсары в 1967 г. в Англии.

Нейтронные звезды – это очень компактные объекты с радиусом порядка 10 км и плотностью 10^{15} г/см³, что превышает плотность атомного ядра. Вещество состоит из чрезвычайно плотно упакованных нейтронов, так как свободные электроны как бы вдавливаются в протоны. Расчеты показывают, что первоначальная температура поверхности у нейтронных звезд около миллиарда градусов. В дальнейшем нейтронная звезда будет быстро остывать, и температура будет падать. Не имея внутренних источников энергии, нейтронные звезды быстро остывают. Так как эти объекты очень малы, то и яркость их невелика. Поэтому обнаружить нейтронные звезды по их тепловому излучению не удастся. Однако некоторые нейтронные звезды являются мощным источником нетеплового излучения. Речь идет о пульсарах, которые излучают радиоимпульсы. **Пульсары** – это быстро вращающиеся нейтронные звезды с необычайно сильным магнитным полем. Причем магнитная ось звезды не совпадает с осью вращения. Горячие пятна на поверхности звезды излучают потоки электронов. Попадая в магнитосферу, электроны разгоняются вокруг магнитных силовых линий. Ускоренное движение электронов порождает радиоизлучение. Наибольшей величины поток будет достигать на магнитных полюсах. Так как ось вращения и магнитная ось не совпадают, потоки радиоизлучения с полюсов в пространстве будут описывать окружности, и частота радиосигнала будет соответствовать периоду вращения звезды вокруг собственной оси.

Первый пульсар открыли случайно в 1967 г. астрономы Кембриджского университета – аспирантка Джоселин Белл и ее руководитель профессор Энтони Хьюиш. За открытие радиопульсаров Э. Хьюишу в 1974 г. была присуждена Нобелевская премия. К 1975 г. было обнаружено 150 пульсаров. Наиболее детально исследован пульсар PSR 0531+21, расположенный в Крабовидной туманности. Эта нейтронная звезда делает 30 оборотов в секунду (период пульсара 0,033 сек); она родилась менее тысячи лет назад, вспышку

сверхновой на этом месте в созвездии Тельца наблюдали на Земле в 1054 году. Радиоастрономы всего мира продолжают поиски пульсаров в нашей и соседних галактиках. В ноябре 1998 г. в Парксской обсерватории (Австралия) был открыт 1000-й радиопульсар.

Если на заключительной стадии эволюции масса звезды больше $2,5 - 3 M_{\odot}$, то давление газа не может уравновесить гравитационное сжатие и звезда начинает с огромной скоростью сжиматься, одновременно уплотняясь. Она будет «раздавлена» собственным весом. За очень короткое время (несколько секунд) звезда может превратиться в сверхплотную точку. Это явление носит название *«гравитационный коллапс»*. Звезда сжимается, а ее

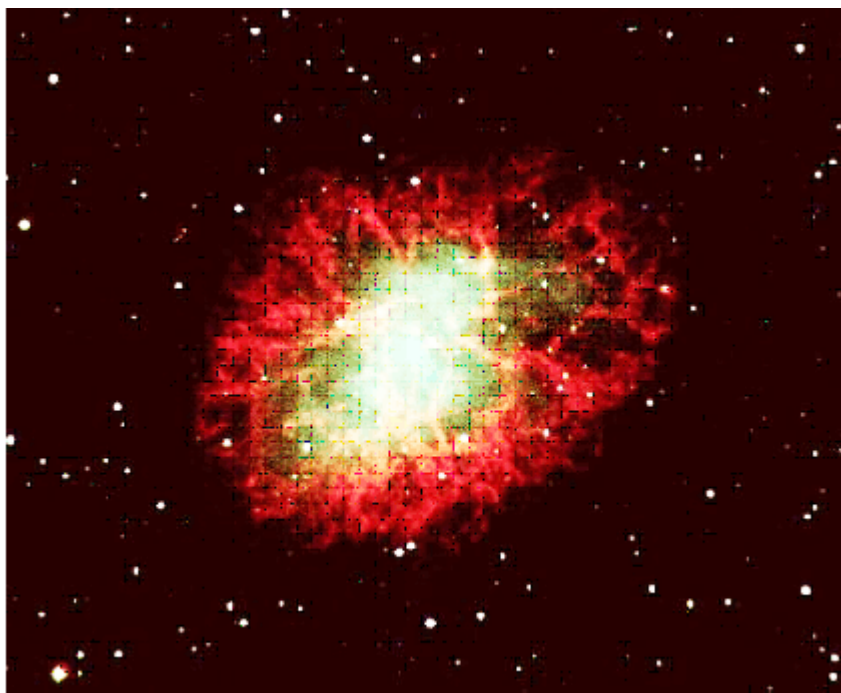


Рис.5. Крабовидная туманность

масса остается неизменной. При этом ее параболическая скорость (вторая космическая) будет расти. При критическом значении радиуса параболическая скорость примерно равна скорости света. В очень сильном гравитационном поле течение времени замедляется. Поэтому те несколько секунд, которые требуются для катастрофического спада звезды в точку, отсчитал бы воображаемый наблюдатель на сжимающейся звезде. Для стороннего наблюдателя при подходе к критическому радиусу время будет идти все медленнее и,

наконец, остановится, когда звезда сожмется до этого критического радиуса. Т.е. посторонний наблюдатель никогда не увидит, что сжимающееся тело достигнет своего критического радиуса (этот радиус называется *радиусом Шварцшильда*). Из такого тела не могут выходить ни излучение, ни какие-либо частицы. Оно взаимодействует с окружающим миром только через гравитационное притяжение. Такие объекты получили название «*черные дыры*». Существование этих объектов предсказывает общая теория относительности. Сам термин «черная дыра» введен в науку американским физиком Джоном Уилером в 1968 г. для обозначения сколлапсировавшей звезды. В настоящее время черная дыра обнаружена в созвездии Лебедя под названием Лебедь X-1. Она входит в двойную систему (один компонент – гигант, а другой – компактная звезда) и имеет массу, равную $10 M_{\odot}$. Под действием гравитационного поля компактной звезды из разреженной атмосферы гиганта вытекают газовые потоки. При этом молекулы газа ускоряются до очень высоких энергий. Энергия газа, падающего на компактную звезду, переходит в рентгеновское излучение.

Роль черных дыр еще не ясна. Возможно, что это будущие «зародыши» галактик или даже Вселенных. В 1960-х годах были открыты радиоисточники, отличающиеся очень высокой светимостью и настолько малым угловым размером, что в течение нескольких лет после открытия их не удавалось отличить от точечных источников – «звезд». Они были названы квазизвездами, или *кварами* (от англ. quasar – QUASi stellAR radio source, т.е. похожий на звезду радиоисточник). В их спектре имеются яркие линии с очень большим красным смещением. Оказалось, что это линии ультрафиолетовой области спектра, смещенные в его видимую часть. Красное смещение их так велико, что ему соответствуют расстояния в миллиарды световых лет.

Квazarы – самые мощные стационарные источники оптического излучения в природе. Их светимость в 100 – 1000 раз больше, чем у гигантских галактик. При этом видимая яркость квазаров, как правило, заметно меняется на самых различных интервалах времени – от нескольких лет до долей суток. Обнаружено уже более 5000 квазаров. Ближайший из них и наиболее яркий находится на расстоянии около 2 млрд. световых лет.

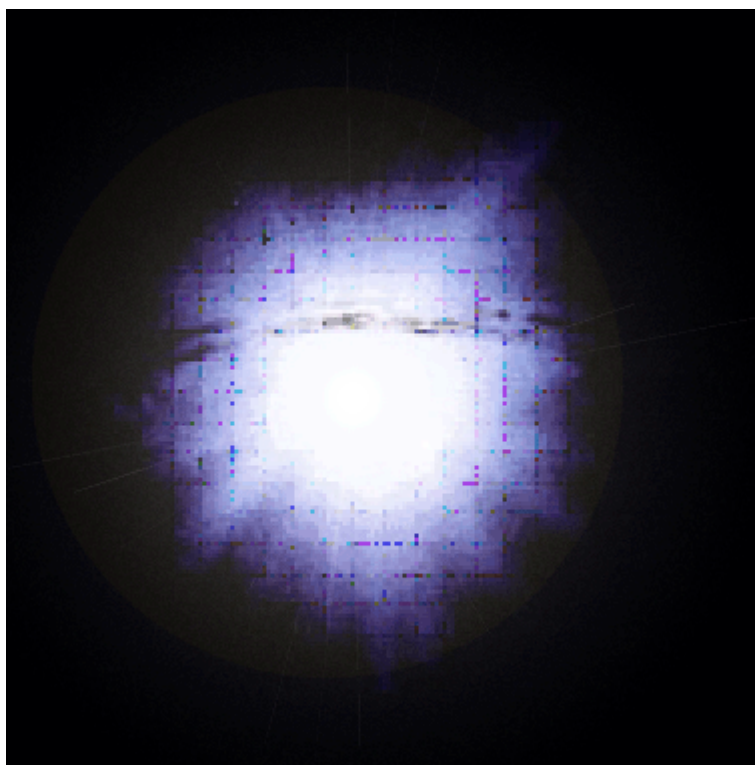


Рис. 6. Квазар

Самые далекие квазары, благодаря своей гигантской светимости, видны на расстоянии более 10 млрд. световых лет. Изучая ближайшие квазары, удалось определить, что они располагаются в ядрах крупных галактик. Считается, что квазары представляют собой кратковременную (по сравнению с возрастом галактик) стадию очень высокой активности галактических ядер, которая имеет место на определенной стадии их эволюции. Предположительно, механизм выделения энергии в квазарах связан с падением вещества на сверхмассивные черные дыры, существующие в ядрах большинства массивных галактик.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные характеристики звезд.
2. Какие стадии выделяют при образовании звезд?
3. Какие ядерные реакции протекают при образовании звезд? Каковы условия протекания этих реакций?
4. Соотнесите стадии эволюции звезд с положением этих звезд на диаграмме Герцшпрунга – Рассела.
5. Что называется Главной последовательностью? От каких факторов зависит пребывание звезды в этой области?
6. Как зависит эволюция звезды от ее массы?
7. Охарактеризуйте основные стадии эволюции звезд. Укажите ядерные реакции, сопутствующие этим стадиям.
8. Какие звезды называются нейтронными?
9. Охарактеризуйте пульсары и квазары, как источники различных типов излучения.
10. Что представляет из себя гравитационный коллапс?
11. Составьте схемы эволюции разных типов звезд.
12. Как происходит образование химических элементов? Какие стадии можно выделить в этом процессе?
13. Как объясняют образование легких ядер?
14. Что представляют из себя s-, r- и p-процессы?

6. СТРУКТУРНАЯ ИЕРАРХИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Наблюдаемая Вселенная представляет собой систему самогравитирующих масс. *Метагалактика* – часть Вселенной, доступная современным астрономическим методам исследований – содержит несколько миллиардов галактик – звездных систем, в которых звезды связаны друг с другом силами гравитации.

Если говорить о светящейся материи, то низшим уровнем является звезда. Очень часто звезды образуют *двойные системы* (две звезды вращаются вокруг одного центра тяжести и сформировались из общего газопылевого облака). *Звездные системы* включают 10 или несколько десятков звезд. Звездные системы образуют *звездные скопления* (типичными являются шаровые скопления), включающие примерно миллион звезд в области пространства примерно 30 световых лет. Следующим уровнем организации являются *галактики*, включающие $\sim 10^{12}$ звезд, затем – системы галактик и скопления галактик.

Таблица 2.

Уровни организации Вселенной

Система	М \odot	Диаметр, световые годы
Звезды с планетными системами. Двойные звезды	1	10^{-3}
Кратные звездные системы	10	$5 \cdot 10^{-3}$
Звездные скопления	10^6	30
Галактика со спутниками	10^{12}	$3 \cdot 10^5$
Системы галактик	10^{13}	$1,5 \cdot 10^6$
Скопления галактик	10^{15}	$3 \cdot 10^7$

Наша Галактика – Млечный Путь – имеет вид диска диаметром 100 тысяч световых лет и толщиной около 1500 световых лет. В этом диске более 200 млрд. звезд. Самые маленькие галактики содержат звезд в миллион раз меньше. Существуют галактики, включающие триллионы звезд. Мы находимся на периферии гигантского скопления более тысячи галактик с центром в направлении созвездия Девы, удаленным на расстояние ~ 60 миллионов

световых лет. Возможности современной техники позволяют наблюдать достаточно яркие галактики вплоть до расстояний порядка 10 миллиардов световых лет.

Помимо обычных звезд галактики включают в себя межзвездный газ, пыль, а также различные экзотические объекты: белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры. Ближайшие к нам Галактики – Магеллановы Облака (200 тысяч световых лет) и Туманность Андромеды (1800 тысяч световых лет).

Галактики бывают следующих типов:

- эллиптические (E)
- спиральные (S)
- спирально-линейные (SB)
- неправильные (иррегулярные) (Ir)

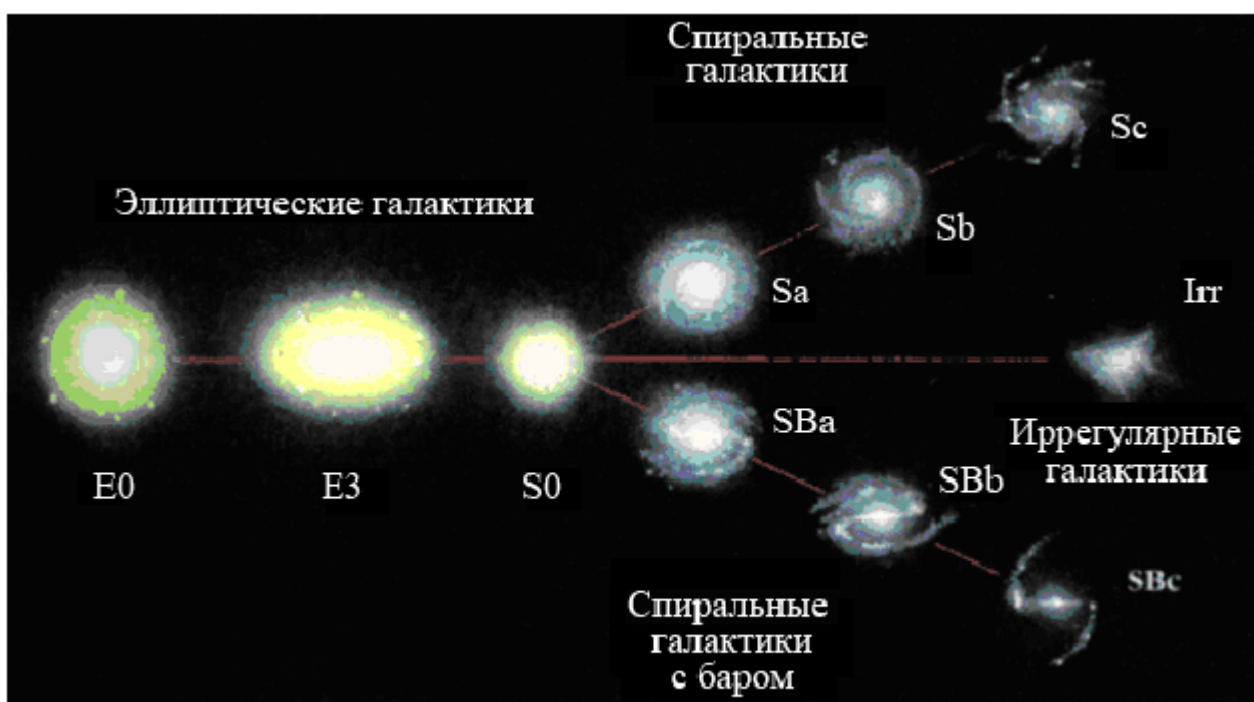


Рис.7. Классификация галактик

Эллиптические галактики – сфероиды разной степени сплюснутости и внешне невыразительные. Они имеют вид гладких эллипсов или кругов с постепенным круговым уменьшением яркости от центра к периферии. В зависимости от формы, различают классы от E0 (почти шарообразной формы) до E7 (сильно уплощенные галактики). Эллиптические галактики построены из красных и желтых гигантов, красных и желтых карликов и некоторого количества белых звезд не очень высокой светимости. Отсутствуют белоголубые сверхгиганты и гиганты, нет пылевой материи. Внешне эллиптические галактики отличаются друг от друга в основном одной чертой – большим или меньшим сжатием.

Спиральные галактики – уплощенный диск со сферической центральной областью и несколькими спиральными рукавами. Как правило, имеются две спиральные ветви, берущие начало в противоположных точках ядра, развивающиеся сходным симметричным образом, и теряющиеся в противоположных областях периферии галактики. Известны примеры большего, чем двух, числа спиральных ветвей в галактике. В других случаях спиралей две, но они неравны: одна значительно более развита, чем вторая. Спиральные галактики, по сравнению с эллиптическими, имеют большую массу и больший момент количества движения. Спиральные галактики, как правило, одиночные, тогда как эллиптические проявляют тенденцию к образованию скоплений. В зависимости от «плотности скручивания спирали» они делятся на галактики, у которых выделяется четкое ядро и ясно видимые, плотно скрученные рукава – Sa. Галактики, ядро которых менее плотное, а рукава – более растянутые – Sb. И, наконец, если ядро галактики выражено нечетко, а рукава далеко отстоят друг от друга – Sc. Для *спирально-линейных* (пересеченных) галактик характерно наличие яркой и широкой «поперечной планки», проходящей через ядро, от конца которой ответвляются рукава. Эта «поперечная планка» обычно называется перемычкой или баром. Галактики такого типа так же, как и спиральные, подразделяются на три класса: SBa, SBb, SBc.

Встречается большое число галактик малой массы с неправильной формой – это *иррегулярные галактики*. Они не имеют каких-либо закономерностей структурного строения. Неправильная форма у галактики может быть вследствие того, что она не успела принять правильной формы; из-за малой плотности в ней материи или из-за молодого возраста. Есть и другая возможность образования неправильной галактики: галактика может стать неправильной вследствие искажения формы в результате взаимодействия с другой галактикой.

У каждой галактики имеется уплотненное ядро с высокой концентрацией звезд и высоким уровнем протекания процессов, т.е. ядра являются очень активными, но активность носит периодический характер.

Наша Галактика (рис. 8) принадлежит к типу спиральных, причем спиральная структура в ней очень хорошо развита. В центре галактики расположено ядро диаметром 1000 – 2000 парсек: гигантское уплотненное скопление звезд. Оно находится от нас на расстоянии почти 10 000 парсек (30 000 световых лет) в направлении созвездия Стрельца, но почти целиком скрыто плотной завесой облаков, что препятствует его визуальным и обычным фотографическим наблюдениям. В состав ядра входит много красных гигантов и короткопериодических *цефеид* – переменных звезд с коротким строго периодическим изменением блеска.

Звезды верхней части главной последовательности, а особенно сверхгиганты и классические цефеиды, составляют более молодое население. Оно располагается дальше от центра и образует сравнительно тонкий слой или диск. Среди звезд этого диска находится пылевая материя и облака газа.

Субкарлики и гиганты образуют вокруг ядра и диска Галактики сферическую систему.

Масса нашей галактики равна $2 \cdot 10^{11}$ масс Солнца. Причем 0,001 ее заключена в межзвездном газе и пыли.

Наблюдаемые галактики редко бывают одиночными. Более 90% ярких галактик входят либо в небольшие группы, содержащие лишь несколько

крупных членов, либо в скопления галактик, в которых их насчитываются многие тысячи.

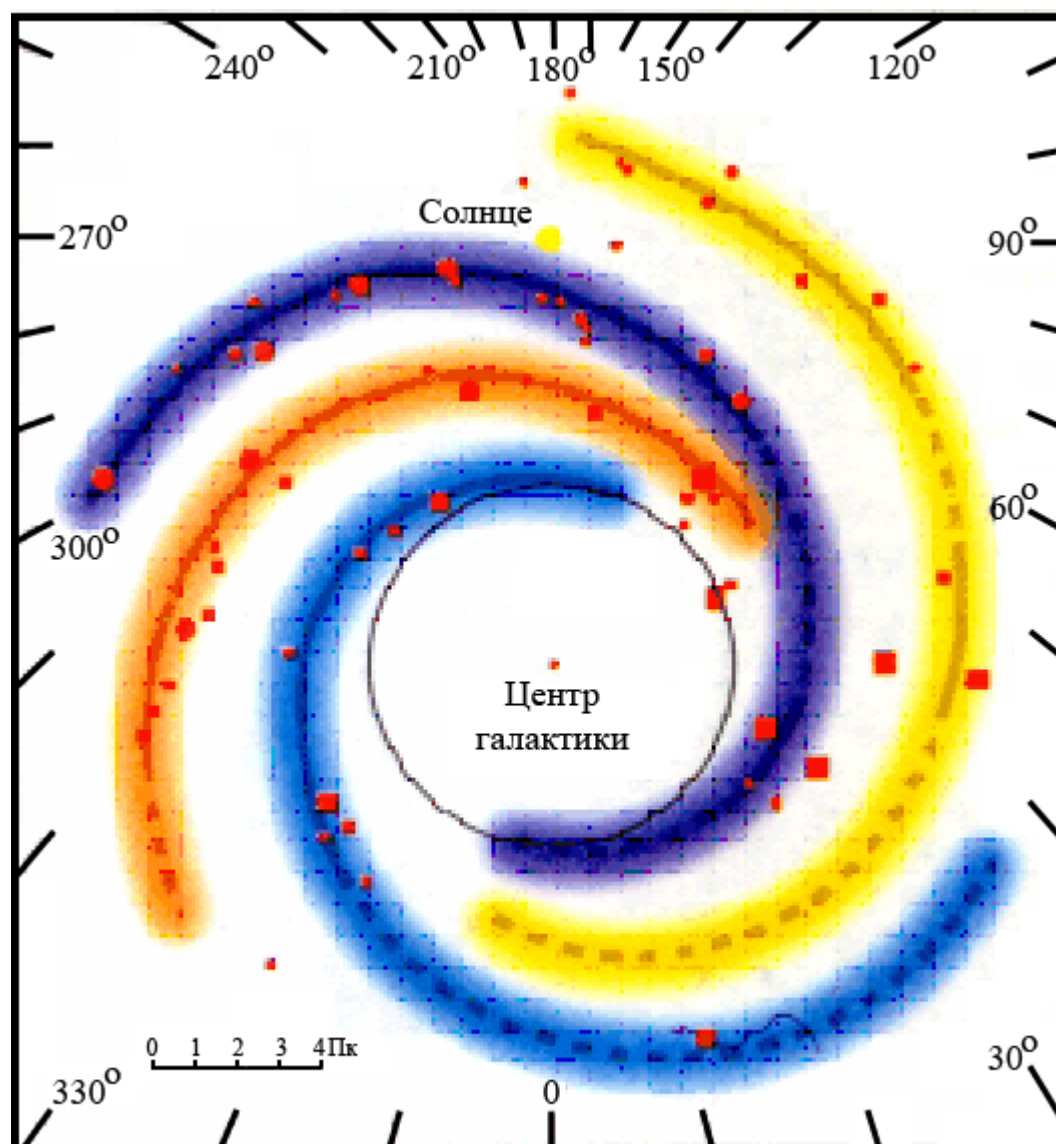


Рис. 8. Схема строения нашей галактики.

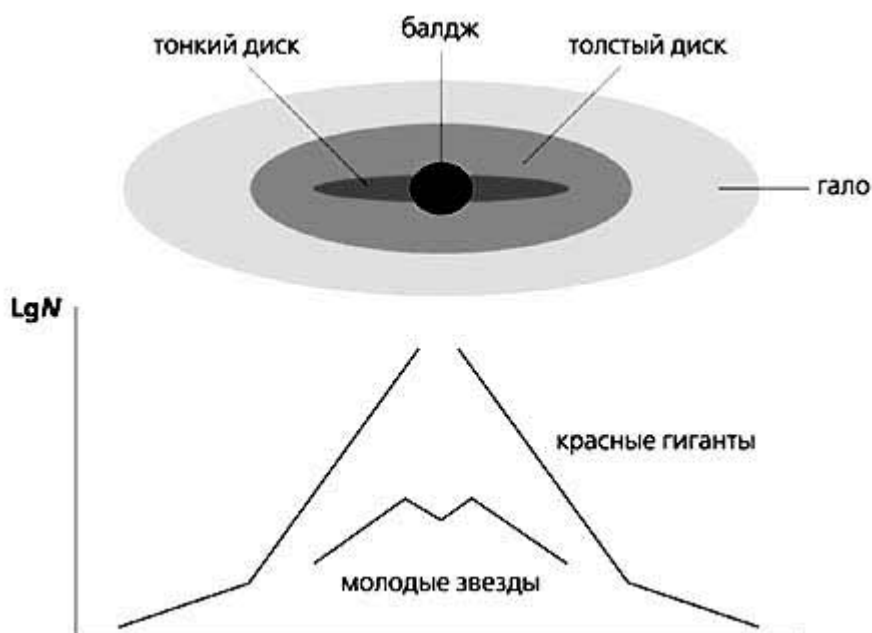


Рис. 9. Модель звездного строения спиральной галактики. Боковые графики показывают численное распределение звезд разного возраста вдоль радиуса галактики и перпендикулярно плоскости ее диска (По Н.А. Тихонову).

В окрестностях нашей Галактики, в пределах полутора мегапарсек от нее, расположены еще около 40 галактик, которые образуют местную группу.

Скопления галактик – это самые крупные устойчивые системы во Вселенной. Существуют и более протяженные образования: цепочки из скоплений или гигантские плоские поля, усеянные галактиками и скоплениями («стенки»), но гравитация не удерживает эти системы, и они вместе со всей Вселенной расширяются.

В соответствие с современными представлениями, на первом этапе структурирования материи в результате сгущивания первичных газовых облаков, образовались массивные звезды ($M = 10 - 15 M_{\odot}$) первого поколения. Время их жизни относительно невелико. Взрываясь, как сверхновые, они обогащали межзвездную среду тяжелыми элементами. По этой причине звезды следующих поколений имели другой химический состав. Набор тяжелых элементов на Солнце указывает, что оно образовалось звездой с $M = 10 - 15 M_{\odot}$. Следовательно, Солнце – звезда второго поколения. Таким образом,

элементы, тяжелее гелия были синтезированы в массивных звездах задолго до того, как началось структурирование галактик. Газопылевые облака, состоящие из водорода и тяжелых элементов, конденсировались в протогалактики. В течение 100 миллионов лет они под действием сил гравитации формировали сфероиды или диски. Массивные звезды продолжали взрываться, обогащая среду тяжелыми элементами. Из этого следует – в виде светящегося вещества должно находиться не более 10% вещества. Скрытая, не светящаяся масса во много раз больше, чем масса светящегося вещества.

Для современной астрономической картины мира принципиально важным оказалось то, что существуют космические объекты, от которых невозможно принять излучение. Их наличие удастся установить только по их гравитационному воздействию на соседей. Невидимое вещество, проявляющее себя по взаимодействию с видимым посредством сил тяготения, в современной астрономии называют *скрытой массой*.

Впервые о скрытой массе заговорили в 30-х гг. XX в., когда швейцарский астроном Фриц Цвикки, измеряя по красному смещению скорости галактик из скопления в созвездии Волосы Вероники, получил, что скорости галактик гораздо выше расчетных. Он выдвинул гипотезу, что в скоплении присутствует невидимая, скрытая масса, которая и является причиной больших скоростей галактик. Согласно расчетам эта невидимая масса во много раз превышала массу видимую.

Сегодня астрономы уверенно заключают: Вселенная в основном заполнена невидимым веществом. Оно образует протяженные «галы» (газовая оболочка) галактик и заполняет межгалактическое пространство, концентрируясь к скоплениям галактик.

Вопрос о природе скрытой массы далек от разрешения. Возможно, эта масса создается не открытыми пока элементарными частицами. Часть скрытой массы может заключаться в телах, состоящих из обычных атомов.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется Метагалактикой?
2. Какие структурные уровни выделяют во Вселенной?
3. Что является основой для классификации галактик?
4. Охарактеризуйте основные типы галактик. В чем они различаются?
5. Как образуются irregулярные галактики?
6. Расскажите о нашей Галактике.
7. Какие типы звезд входят в состав ядра нашей Галактики?
8. Что происходит на первом этапе структурирования материи?
9. Почему Солнце считают звездой второго поколения?
10. Что называется скрытой массой? Почему появилось такое название?
11. Почему считается, что скрытая масса гораздо больше массы светящегося вещества?
12. Используя изученный ранее материал, составьте подробную схему структурной иерархии Вселенной. За основу возьмите табл. 2.
13. На основании материала, изложенного ранее, составьте «краткий астрономический словарь».

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

7. СОДЕРЖАНИЕ ГЕОЛОГИИ КАК НАУКИ

Геология – комплекс наук о земной коре и более глубоких сферах Земли; в узком смысле слова – наука о составе, строении, движениях и истории развития земной коры и размещении в ней полезных ископаемых. Большинство прикладных и теоретических вопросов, решаемых геологией, связано с верхней частью земной коры, доступной непосредственному наблюдению.

Все геологические методы основаны, главным образом, на прямых полевых наблюдениях. Геологические исследования определенной территории начинаются с изучения и сопоставления горных пород, наблюдаемых на поверхности Земли в различных естественных обнажениях, а также в искусственных выработках. Породы изучаются как в их природном залегании, так и путем отбора образцов, подвергаемых затем лабораторному исследованию.

Методы непосредственного изучения недр не дают возможности познать строение Земли глубже, чем на несколько километров (иногда до 20 км) от ее поверхности. Поэтому даже для изучения земной коры, а тем более нижележащих геосфер геология не обходится без помощи косвенных методов, разработанных другими науками, особенно без геохимических и геофизических методов. Очень часто применяется комплекс геологических, геофизических и геохимических методов.

В геологических исследованиях можно различить три основных направления. Задачей первого из них (*описательная геология*) служит описание минералов, горных пород и их типов; изучение состава, формы, размеров, взаимоотношений, последовательности залегания и всех прочих вопросов, связанных с современным размещением и составом геологических тел (слои горных пород, гранитные массивы и др.). Второе направление (*динамическая геология*) – изучение геологических процессов и их эволюции. К числу этих процессов относятся как внешние, по отношению к земной коре и

более глубоким геосферам: разрушение горных пород, перенос и переотложение ветром, ледниками, наземными и подземными водами; накопление осадков на дне рек, озер, морей, океанов и др., так и внутренние: движения земной коры, землетрясения, извержения вулканов и сопутствующие им явления. Геологические процессы изучаются не только в естественных условиях, но и экспериментально. Восстановление картины геологического прошлого Земли (историко-геологическая реконструкция) составляет сущность третьего направления геологических исследований – *исторической геологии*. Задачи этого направления сводятся к изучению распространения и последовательности образования геологических напластований и других геологических тел, а также к установлению последовательности различных геологических процессов и событий – например, тектогенеза, метаморфизма, образования и разрушения залежей полезных ископаемых, трансгрессий и регрессий морей, смены эпох оледенений эпохами межледниковий и т.д. Все три направления геологии неразрывно связаны друг с другом, и исследование каждого геологического объекта, как и любой территории, ведется со всех трех точек зрения, хотя каждое направление самостоятельно в смысле основных принципов и методов исследования.

Широко используется в геологии *метод актуализма*, согласно которому в сходных условиях геологические процессы идут сходным образом; поэтому, наблюдая современные процессы, можно судить, как шли подобные процессы в далеком прошлом. Современные процессы можно наблюдать в природе (например, деятельность рек) или создавать искусственно (подвергая, к примеру, образцы горных пород действию высокой температуры и давления). Таким путем часто удается установить физико-географические и физико-химические условия, в которых отлагались древние слои, а для метаморфических горных пород – и примерную глубину, на которой произошел метаморфизм (изменение). Однако географическая и геологическая обстановка в жизни Земли необратимо менялась; поэтому, чем древнее изучаемые толщи, тем ограниченнее применение метода актуализма.

Разработка теоретических вопросов геологии тесно связана с одной из ее крупнейших практических задач – прогнозом поиска и разведки полезных ископаемых и созданием минерально-сырьевой базы мирового хозяйства. Большое значение имеет геология при проектировании различных инженерных сооружений, в строительстве, сельском хозяйстве, военном деле.

Современная геология тесно связана с очень большим числом других наук, главным образом наук о Земле. Именно поэтому трудно установить точные границы геологии как науки и однозначно определить ее предмет. Широкое применение при геологических исследованиях физических и химических методов способствовало бурному развитию таких пограничных дисциплин как физика Земли и геохимия. *Физика Земли* изучает физические свойства Земли и ее оболочек, а также происходящие в этих оболочках геологические процессы. *Геохимия* рассматривает химический состав Земли, законы распространения и миграций в ней химических элементов. Геология не может обойтись без применения методов и выводов этих наук. В геохимии и физике Земли органически сливаются физические и химические приемы исследования, с одной стороны, и геологические, – с другой. Поэтому положение геохимии и физики Земли в системе наук о Земле является дискуссионным. Их рассматривают либо как наиболее развившиеся геологические дисциплины, либо как области знания, равнозначные геологии. Тесная связь объединяет геологию с геодезией и с комплексом физико-географических наук (геоморфологией, климатологией, гидрологией, океанологией, гляциологией и пр.), в задачи которых входит изучение рельефа земной поверхности, вод суши и Мирового океана, климатов Земли, вопросов, касающихся строения, состава и развития географической оболочки. Для полного понимания истории Земли необходимо знать ее начальное состояние; такой вопрос решает *планетная космогония*, т. е., раздел астрономии, изучающий проблему образования планет. В вопросах происхождения и развития органической жизни на Земле геология взаимосвязана с биологическими науками и прежде всего с палеонтологией. Знание биологических и биохимических

процессов необходимо геологу для выяснения путей образования ряда горных пород и полезных ископаемых (нефть, уголь и др.). Таким образом, весь комплекс наук, изучающих Землю, характеризуется многосторонней связью и взаимодействием. Геология использует данные этих наук для решения общих проблем развития планеты. Это позволяет некоторым исследователям отводить геологии ведущее место среди наук о Земле или даже понимать под геологией весь комплекс наук о Земле.

Геология включает ряд научных дисциплин, занимающихся исследованием и описанием Земли. Комплекс этих дисциплин пополняется по мере расширения исследований планеты за счет их дифференциации и появления новых научных направлений, возникающих главным образом на стыке геологии с другими областями знания. Предмет большинства геологических дисциплин относится ко всем трем направлениям геологии (описательной, динамической и исторической). Этим объясняется тесная взаимосвязь геологических дисциплин и трудность их классификации, разделения на четко разграниченные группы.

Наиболее принятыми считаются следующие группы геологических дисциплин:

- научные дисциплины, изучающие вещество и структуру (строение) земной коры;
- дисциплины, рассматривающие современные геологические процессы (динамическая геология);
- дисциплины, изучающие историческую последовательность геологических процессов (историческая геология);
- дисциплины прикладного значения; в особую группу выделяется геология отдельных областей и районов (региональная геология).

К первой группе относятся: *минералогия*, часть геологии, изучающая минералы – природные устойчивые химические соединения; *петрография* – часть геологии, изучающая горные породы как структурно-вещественные ассоциации минералов; *структурная геология*, изучающая формы залегания

геологических тел, различные нарушения в залегании слоев – их изгибы, разрывы и т.п. Как одно из направлений минералогических исследований зародилась и долгое время развивалась кристаллография. Однако в последнее время изучение атомарного строения кристаллов сделало эту дисциплину в значительной мере физической.

Ко второй группе геологических дисциплин (динамическая геология) относится **тектоника**, изучающая движения земной коры и создаваемые ими структуры. Применительно к самым крупным структурам Земли – материкам и океанам – ее называют часто **геотектоникой**, а тектонику неоген – антропогенового времени именуют **неотектоникой**. Обособленно стоит **экспериментальная тектоника**, занимающаяся изучением тектонических процессов (например, образованием складок) на моделях. В эту же группу входят разделы минералогии и петрографии, изучающие процессы образования минералов и горных пород, а также такие дисциплины как **вулканология**, изучающая процессы вулканизма, **сейсмогеология** – наука о геологических процессах, сопровождающих землетрясения, и об использовании геологических данных для определения сейсмически опасных районов (сейсмо-районирование), **геокриология**, исследующая процессы, связанные с многолетнемерзлыми породами.

К третьей группе относится историческая геология, восстанавливающая по следам, сохранившимся в осадочной оболочке Земли, события геологической истории и их последовательность. В этой же группе **стратиграфия**, занимающаяся изучением последовательности отложения слоев горных пород в осадочной оболочке Земли, и **палеогеография**, восстанавливающая физико-географические условия прошлых геологических периодов на основании геологических данных. Своеобразие применяемых методов исследования геологической истории последнего антропогенового периода привело к образованию отдельной дисциплины, которую часто неточно называют четвертичной геологией.

Четвертая группа (прикладная геология) включает геологию полезных ископаемых; *гидрогеологию* – науку о подземных водах; *инженерную геологию*, изучающую геологические условия строительства различных сооружений, и *военную геологию*, занимающуюся вопросами применения геологии в военном деле.

С точки зрения методики и задач, особое место среди геологических дисциплин занимает геология дна морей и океанов, или *морская геология*, успешно развивающаяся в связи с возросшим интересом к использованию природных ресурсов морей и океанов.

Невозможно полностью хотя бы перечислить все геологические дисциплины. Их дифференциация, а также сращивание со смежными дисциплинами приводит к появлению новых направлений. Так, различие методов исследования горных пород глубинного и осадочного происхождения привело к разделению петрографии на петрографию магматических и петрографию осадочных пород, или литологию. Использование химических методов при изучении магматических пород вызвало возникновение петрохимии, результатом изучения деформаций внутри горных пород стала петротектоника.

Резко дифференцирована геология полезных ископаемых: геология нефти и газа, геология угля, металлогения, рассматривающая закономерности размещения рудных месторождений. Применение в геологии новейших физических и химических методов послужило основой для появления таких новых специализаций как тектонофизика, палеомагнетизм, экспериментальная физическая химия силикатов и др.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие вопросы изучает геология?
2. Почему возможно существование двух определений геологии как отрасли науки?
3. На чем основаны геологические методы? В чем заключается трудность решения основных вопросов геологии?
4. Назовите основные разделы геологии и охарактеризуйте их.
5. В чем заключается принцип актуализма?
6. В чем трудность классификации геологических дисциплин? Какой способ классификации могли бы предложить вы?
7. Назовите дисциплины, которые являются примерами интеграции и дифференциации наук.

8. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ГЕОЛОГИИ

Отдельные наблюдения и высказывания, которые принято считать истоками геологии, относятся к глубокой древности. Особенно ценными являются работы Аристотеля (первые доказательства шарообразности Земли) и Аристарха Самосского (первая гелиоцентрическая система). Основные геологические исследования того времени носят наблюдательный характер и касаются землетрясений, извержений вулканов, размывания гор, перемещения береговых линий морей, т. е. явлений динамической геологии. Развитие торговых отношений приводит к зарождению основ геодезии и географии (буровые работы при строительстве египетских пирамид, изобретение компаса в Китае в III в. до н. э.).

В средние века развитие геологии замедляется. Но, тем не менее, именно в это время были сделаны попытки описания и классификации геологических тел, – например, описание минералов Ал-Бируни из Хорезма и работы таджикского естествоиспытателя Ибн Сины (Авиценны).

Эпоха Возрождения, которой предшествовал период Великих географических открытий, положила начало серьезным исследованиям в области геологии. Именно к этому времени относятся первые суждения (если не считать ранних упоминаний об этом у древнегреческого ученого Страбона) об истинной природе ископаемых раковин как остатках вымерших организмов и о большей по сравнению с библейскими представлениями длительности истории Земли. Особый вклад в развитие геологической науки этого времени внесли итальянские ученые Леонардо да Винчи и Дж. Фракасторо. Разработка первых представлений о смещении слоев и их первоначальном горизонтальном залегании принадлежит датчанину Н. Стено, который впервые дал анализ геологического разреза в Тоскане, объясняя его как последовательность геологических событий.

Слово «геология» появилось в печати в XV в., но имело тогда совершенно другое значение по сравнению с современным. В 1473 г. в Кельне вышла книга епископа Р. де Бьюри «Philobiblon» («Любовь к книгам»), в ко-

торой под геологией понимался весь комплекс закономерностей и правил «земного» бытия, в противоположность теологии – науке о духовной жизни. В современном его понимании термин «геология» впервые был применен в 1657 г. норвежским естествоиспытателем Эшольтом в работе, посвященной крупному землетрясению, охватившему всю Южную Норвегию («*Geologia Norwegica*», 1657 г.). В конце XVIII в. немецкий геолог К. Фюксель предложил, а немецкий минералог и геолог А. Вернер в 1780 г. ввел в литературу термин «геогнозия» для явлений и объектов, изучаемых геологами на поверхности Земли. С того времени и до середины XIX в. термин «геогнозия» шире, чем в других странах, применялся в России и Германии, хотя четкого разграничения между понятиями «геология» и «геогнозия» не было. В Великобритании и Франции этот термин использовался очень редко, а в Америке почти совсем не применялся. С середины XIX в. термин «геогнозия» в России постепенно исчезает. Некоторое время он еще встречается в названиях ученых степеней и в названиях кафедр старых русских университетов, но к 1900 г. уже не фигурирует, вытесняясь термином «геология».

Конец XVII в. характеризовался ростом числа геологических наблюдений, а также появлением научных трудов, в которых делаются попытки обобщить далеко еще не достаточные знания, при полном отсутствии удовлетворительной методической основы, в некую общую теорию Земли. Большинство ученых конца XVII – начала XVIII вв. придерживалось представления о существовании в истории Земли всемирного потопа, в результате которого образовались осадочные породы и содержащиеся в них окаменелости. Эти воззрения, получившие название дилювианизма, разделяли английские естествоиспытатели Р. Гук, Дж. Рей, Дж. Вудворд, швейцарский ученый И. Я. Шейкцер и многие другие.

Геология, как самостоятельная ветвь естествознания, стала складываться во 2-й половине XVIII в., когда под влиянием нарождающейся крупной капиталистической промышленности начался быстрый рост потребностей общества в ископаемом минеральном сырье и в связи с этим возрос ин-

терес к изучению недр. Этот период развития геологии характеризовался разработкой элементарных приемов наблюдения и накопления фактического материала. Исследования сводились главным образом к описанию свойств и условий залегания горных пород. Но уже тогда появлялись попытки объяснить генезис горных пород и вникнуть в суть процессов, происходящих как на поверхности Земли, так и в ее недрах.

Выдающееся значение имели геологические труды М. В. Ломоносова: «Слово о рождении металлов от трясения Земли» (1757) и «О слоях земных» (1763), в которых он всесторонне и взаимосвязанно излагал существовавшие в то время геологические данные и собственные наблюдения. Решающую роль в формировании облика Земли Ломоносов отводил глубинным силам («жару в земной утробе»), признавая вместе с тем влияние на земную поверхность и внешних факторов (ветра, рек, дождей и др.). Он развивал идею единства формирования гор и впадин, утверждал длительность и непрерывность геологических изменений, которым подвергается земная поверхность. Признанием синтеза внешних и внутренних сил в их влиянии на развитие Земли Ломоносов намного опередил свою эпоху.

К концу XVIII в. в геологии появляются два враждующих направления, две противостоящих друг другу школы – нептунизм и плутонизм. Борьба, которая ведется между этими двумя направлениями, касается коренных проблем прошлого и настоящего Земли.

Нептунист А. Вернер, профессор минералогии во Фрейберге, стоял на крайне односторонних позициях, утверждая, что все горные породы, включая базальт, образовались как осадки из водной среды. Вулканическую деятельность Вернер приписывал подземному горению каменного угля. Кроме того, он, проводивший геологические наблюдения только в окрестностях Фрейберга, неправоммерно распространял замеченные там закономерности на всю поверхность земного шара. Таким образом, нептунисты считали, что причиной всех изменений, происходящих на Земле, является действие внешних сил.

Работы шотландского геолога Дж. Геттона и его последователей – плутонистов – соответствовали более верному направлению геологических идей, поскольку в них значительная роль отводилась внутренним силам Земли. В этих работах указывалось на вулканическое происхождение базальтов и на образование гранитов из расплавленных масс, что впоследствии было подтверждено микроскопическими исследованиями пород и специальными экспериментами.

Говоря о развитии геологии в XVIII в., нельзя не упомянуть немецкого философа И. Канта и французского математика П. Лапласа. Именно их работы привели к созданию первой теории происхождения Солнечной системы, свободной от идей божественного созидания. Эта теория приведена в первой части данного пособия.

В середине XVIII в. появились геологические, а точнее, литолого-петрографические карты, сначала небольших участков, а затем и крупных территорий. Эти карты показывали состав горных пород, но не указывали их возраст. В России первой «геогностической» картой была карта Восточного Забайкалья, составленная в 1789 – 1794 гг. Д. Лебедевым и М. Ивановым. Первая «геолого-стратиграфическая карта», охватывавшая значительные территории Европейской России, составлена в конце 1840 г. Н.И. Кокшаровым. На этой карте уже были выделены формации – силурийская, древнего красного песчаника (девон), горного известняка (нижний карбон), лиасовая и третичная. В начале 1841 г. П. Гельмерсен опубликовал «Генеральную карту горных формаций Европейской России».

Рождение геологии как науки относят к концу XVIII – началу XIX вв. Это связано с установлением возможности разделения слоев земной коры по возрасту на основании сохранившихся в них остатков древней фауны и флоры. Позднее это позволило обобщить и систематизировать разрозненные ранее минералогические и палеонтологические данные, сделало возможным построение геохронологической шкалы и создание геологических реконструкций.

Впервые на возможность разделения слоистых толщ по сохранившимся в них ископаемым органическим остаткам указал в 1790 г. английский ученый У. Смит, составивший «шкалу осадочных образований Англии», а затем и первую геологическую карту Англии (1815). Большие заслуги в расчленении земной коры по остаткам моллюсков и позвоночных принадлежат французским ученым Ж. Кювье и А. Броньяру. В 1822 г. в юго-западной части Англии была выделена каменноугольная, а в Парижском бассейне – меловая системы, что положило начало стратиграфической систематике.

Но методологическая основа первых стратиграфических исследований была несовершенной. Различие характера органических остатков в пластах, следующих один за другим, было объяснено французским ученым Ж. Кювье серией катастроф, вызванных сверхъестественными силами, во время которых на обширных пространствах все живое уничтожалось, а затем опустошенные области заселялись организмами, мигрировавшими из других районов. Ученики и последователи Ж. Кювье развили эту теорию. Они утверждали, что в истории Земли было 27 катастроф (по Д'Орбиньи), во время которых погибал весь органический мир и затем вновь возникал под влиянием очередного божественного акта, но уже в измененном виде. Нарушенное залегание первично горизонтальных слоев горных пород и образование гор считалось следствием этих же кратковременных катастроф.

Немецкий геолог Л. Бух в 1825 г. выступил с теорией «кратеров поднятия», объясняя все движения земной коры за счет вулканизма. Эти идеи он отстаивал и в дальнейшем, хотя в 1833 г. французский ученый К.Прево выяснил, что вулканические конусы представляют собой не поднятия, а скопления продуктов извержения. В то же время французский геолог де Бомон предложил контракционную гипотезу (1829), объясняющую дислокации слоев сжатием земной коры при остывании и уменьшении объема ее центрального раскаленного ядра. Эта гипотеза разделялась большинством геологов до начала XX в., а ее развитие привело к появлению геосинклинальной теории.

Трудом Ч. Лайеля «Основы геологии» (1830-1833 гг.) был нанесен первый удар взглядам катастрофистов. На основании большого фактического материала были окончательно опровергнуты предрассудки о малой продолжительности геологической истории Земли. Лайель доказал, что все изменения в геологической истории происходили под действием тех же факторов, что и в настоящее время (атмосферные осадки, ветер, морские приливы, вулканы, землетрясения). Из исследований Лайеля вытекало, что для объяснения геологических процессов необходимо только допустить очень длительный срок существования Земли.

Хотя геологический эволюционизм оказал немалое влияние на развитие эволюционного учения в биологии, он утвердился в науке только после выхода работы Ч. Дарвина «Происхождение видов».

В XIX в. продолжалось накопление фактического материала, связанное, в первую очередь, с ростом промышленности. Оно обусловило дальнейшее развитие геологической науки. В XX в. благодаря сейсмографии более точно устанавливается строение Земли, ведутся работы по различным вопросам геологии, палеонтологии, тектоники, стратиграфии, петрографии и другим разделам этой науки. Некоторые отрасли объединяются, возникают новые. Открываются месторождения полезных ископаемых, разрабатываются новые способы их добычи и переработки. Наука не стоит на месте. Разработано большое количество новых методов изучения веществ и состава горных пород, определения их возраста.

Выяснена огромная роль развития жизни на Земле как фактора, приведшего к образованию органогенных пород (коралловые рифы, каменные угли и др.), существенно изменившего состав атмосферы и гидросферы, а также непосредственно влиявшего на ход многих геологических процессов. В связи с этим выделился особый раздел геохимии – биогеохимия. В последней четверти XX в. наиболее интенсивно развивается геология дна морей и океанов, в частности, в целях промышленного освоения полезных ископаемых обширных пространств континентального шельфа. Поскольку залежи

полезных ископаемых на поверхности Земли в основном исчерпаны, одной из главных задач современной геологии являются поиски и освоение невидимых с поверхности («слепых», или «скрытых») месторождений. Поиски их могут производиться лишь с помощью геологических прогнозов, что требует усиленного развития всех направлений геологии. Конец XX в. отмечен появлением космических методов исследования в геологии.

Таковы основные этапы развития геологической науки. Далее мы поговорим о планете, на которой мы живем, – о Земле.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы особенности развития геологии до эпохи Возрождения?
2. Когда введено понятие «геология», чем оно отличается от современного?
3. Что такое «нептунизм» и «плутонизм»? В чем они различаются?
4. В чем сущность теории катастроф?
5. Каков вклад М.В. Ломоносова и других русских ученых в развитие геологии?
6. геологии?
7. Ч. Лайеля считают первым эволюционистом в геологии. Почему?
8. Каковы основные этапы развития геологии?

9. ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ. МОДЕЛИ ЗЕМЛИ

Формирование Земли происходило в процессе формирования Солнечной системы. Земля образовалась преимущественно из высокотемпературной фракции охлаждающегося газопылевого облака, которая конденсировалась в интервале температур 400 – 2000° С.

Есть несколько гипотез, объясняющих формирование Земли.

9.1. Гомогенная аккумуляция. Гипотеза О.Ю. Шмидта и его сторонников

Согласно гипотезе гомогенной аккумуляции Земля возникла из однородного вещества. Под этим веществом подразумевается сравнительно однородная смесь частиц железа, силикатов, небольшого количества сульфидов.

С начала формирования молодой Земли происходил ее радиоактивный нагрев, вызванный распадом быстро вымиращающихся радиоактивных ядер. Повышение температуры привело к частичному плавлению вещества. Максимальный рост температуры происходил в центре Земли с последующим выравниванием по периферии.

Определенные соображения говорят о том, что наиболее интенсивным плавление было на глубине 100 – 600 км. На этой глубине сформировался расплавленный слой. В нем начался процесс расслоения на две части: верхняя – силикатная, нижняя – железная, железосерная. Удельный вес железа вдвое больше удельного веса силикатов. Слой расплавленного железа препятствовал охлаждению центральных областей планеты. В то же время этот слой имел неодинаковую толщину.

В то время Луна располагалась ближе к Земле и приливной эффект за счет гравитационного взаимодействия системы Земля – Луна был значительно сильнее, чем в настоящее время. За счет притяжения Луны деформировался расплавленный слой железа, его поднимало то вверх, то опускало вниз. И вот одно из таких перемещений оказало высокое давление на подстилающий материал и, в конце концов, продавало его по направлению к центру Земли.

Образовался прогиб, и жидкое железо начало перемещаться в недра Земли, вытесняя другой недифференцированный материал со значительным содержанием силикатов. Этот материал был не расплавлен, но находился при высоких температурах и имел повышенную пластичность и текучесть.

С дальнейшим ростом гигантская железная капля опустилась к центру Земли. В конце концов, все жидкое железо стекло в центральные области Земли, образовав металлическое ядро. Внутренняя часть его перешла в твердое состояние из-за высокого давления.

При таком способе формирования ядра Земли образовались два неоднородных по составу полушария: одно обогащенное железом, а другое – силикатами.

9.2. Гетерогенная аккумуляция

Гипотеза гетерогенной аккумуляции предполагает, что с самого начала формировалась неоднородная по составу планета. В процессе формирования Земли играли роль магнитные и гравитационные силы. Высокая активность первичного Солнца способствовала намагничиванию ферромагнитного вещества. А к ферромагнитным веществам относятся железо, кобальт, никель, отчасти сернистое железо. Магнитные силы для мелких частиц намного превосходят гравитационные силы притяжения, которые зависят от массы. Поэтому при температуре ниже температуры плавления железа под действием магнитных сил происходило слипание частиц с образованием железного и железосерного ядра. После образования ядра оно уже как тело большой массы стало притягивать к себе (здесь уже вступили в действие гравитационные силы) слабоферромагнитные, а затем и силикатные породы. Таким образом, согласно второй гипотезе формирование Земли изначально шло послойно.

9.3. Частичная гетерогенная аккумуляция

Согласно этой гипотезе основная масса ядра образовалась в период формирования Земли за счет аккумуляции металлических частиц, а после-

дующее выплавление железо-сернистых масс в нижних частях первичной мантии завершило формирование ядра Земли в целом.

Нагрев молодой Земли, который привел к плавлению и химическому разделению вещества, мог происходить уже после ее формирования, в результате распада радиоактивных элементов.

Обще-планетарная химическая дифференциация привела к образованию центрального ядра, состоящего из железа с примесью никеля и серы и обволакивающей его первичной силикатной мантии.

Образование алюмосиликатной коры океанического и континентального типов относится к более поздним событиям, связанным с физико-химическими процессами в самой мантии.

В результате плавления и дегазации верхней мантии на поверхность Земли могли поступать три фракции мантийного материала: базальтовая магма, растворенные в ней вода и газы. Эти газы составляли первичную атмосферу Земли.

Из паров выделяющегося мантийного вещества возникла гидросфера. Первые порции конденсированной воды на Земле были кислыми. Они представляли собой раствор с присутствием ионов F, Cl, Br, I, которые и сейчас характерны для морской воды. А пресные воды появились позже, в результате испарения с поверхности первичных океанов, что было процессом естественной дистилляции. Выпадение атмосферных осадков на поверхность суши могло привести к образованию в пониженных участках рельефа первых пресноводных водоемов.

Существует еще одна гипотеза, объясняющая происхождение атмосферы и гидросферы. Когда в процессе формирования Земля достигла примерно размеров Марса, начался период ее бомбардировки планетезималями (твердыми космическими телами). Удары сопровождалась сильным локальным разогревом и плавлением земных пород и планетезималий. При этом выделялись газы и пары воды, содержащиеся в породах. А так как средняя температура поверхности планеты оставалась низкой, пары воды конденсировались,

образуя растущую гидросферу. В этих столкновениях Земля теряла водород и гелий, но сохраняла более тяжелые газы. Идея ударной дегазации рассматривается как основной механизм образования гидросферы и атмосферы и получает все большее признание.

8.4. Гипотеза образования Земли, как океан – планеты

В последние годы появляется множество новых идей относительно образования планет Солнечной системы. Л.А. Анкудинов предлагает рассматривать образование Земли совершенно отличным от образования других планет образом. Такое предложение обусловлено особенным в системе планет Солнечной системы состоянием Земли, единственной планеты, на которой существует в больших количествах вода и имеется жизнь.

Идея Анкудинова заключается в образовании океан – планеты из вещества, выброшенного прото-Солнцем. Согласно этой идее, начальный этап формирования прото-Солнца сопровождался образованием водяного пара, который уходил в космическое пространство. Водяной пар конденсировался и формировал ледяные тела планетных размеров. Повышение температуры прото-Солнца привело к переходу этих ледяных тел в жидкое состояние. Столкновение таких тел с другими (твердыми) космическими объектами приводило к их поглощению и накоплению в центральной части, где под действием большого давления воды они сливались в единой тело круглой формы. Такое образование, имеющее твердое ядро и огромную водную оболочку Анкудинов предлагает называть *океан – планетой*. Формирование океан – планет и их взаимосвязь с прото-Солнцем привели к тому, что орбиты океан – планет находились в плоскости солнечного экватора. Океан – планеты, связанные с прото-Солнцем гравитационным взаимодействием, провоцировали выбросы прото-солнечного вещества. Как правило, происходило столкновение прото-солнечного вещества и океан – планеты, и последняя – разрушалась. Очередной выброс прото-солнечного вещества (предположительно, твердого состава) и его столкновение с океан – планетой приве-

ли к образованию яйцеобразного тела, состоящего из твердого ядра, вокруг которого растеклось расплавленное прото-солнечное вещество, и пароводяной оболочки. Взаимодействие прото-солнечного вещества с ядром привело к частичному расплавлению последнего, в результате чего образовалась мантия будущей Земли. В дальнейшем образовалась литосфера и, при остывании пароводяной оболочки, – гидросфера. Развитие гидросферы привело к возникновению осадочных пород. Первоначальный угол земной оси (Анкудинов называет планету этого времени прото-Землей) составлял 45° и был обусловлен ее яйцеобразной формой. Развитие прото-Земли привело к увеличению угла наклона ее оси (в современном состоянии – $67^{\circ} 33'$) и, как следствие, – к изменению формы, причиной которого стало перемещение мантийного вещества.

9.5. Модели Земли

Представления о том, что Земля имеет шарообразную форму, зародились еще в Древней Греции. Доказано это было Аристотелем, обратившим внимание на то, что тень от Земли, падающая на полную Луну, имеет форму круга. Размеры Земли впервые были установлены во II в. до н.э. греческим математиком и астрономом Эратосфеном Киренским. По его расчетам окружность Земли равнялась 39,5 тыс. км, т.е. радиус Земли, если считать ее шаром, – 6278 км (в современном исчислении – 6371 км). Со временем исследователи пришли к выводу, что форма Земли не шарообразна, более того, форма Земли вообще не соответствует ни одной из правильных геометрических фигур. Из предложенных математических моделей, описывающих форму Земли, наибольшее распространение получили две – геоид и эллипсоид.

Геоид – это модель Земли, которая представляет собой геометрическое тело, у которого поверхность совпадает с поверхностью среднего уровня воды в океане в спокойном состоянии. Эта поверхность мысленно продолжается над материками таким образом, что в каждой точке поверхности она пересекает направление отвесной линии под углом в 90° . Относительно геоида

производятся измерения высоты (глубины) на суше (в океане) – количество метров над уровнем моря.

В ряде стран с 1946 г. для решения ряда геодезических и картографических задач принята другая модель – *эллипсоид относительности* (эллипсоид Красовского). Согласно этой модели Земля представляет собой шар, сжатый у полюсов (экваториальный радиус – 6375,75 км; полярный – около 6355,36 км). Если для вычислений не требуется высокая точность, средний радиус Земли принимают равным 6371 км.

Вращение Земли вокруг собственной оси и вокруг Солнца приводит к смене дня и ночи, а также к смене времен года. Результатом этого движения для наблюдателя является меняющаяся картина звездного неба. Но существует место, с которого для наблюдателя эта картина неизменна. Он видит над собой практически неподвижную звезду – эта звезда называется Полярной. Прямая, проведенная через Полярную звезду и центр Земли, называется осью вращения Земли. Точки ее пересечения с земной поверхностью – Северным (видна Полярная звезда) и Южным *полюсами*.

Для определения положения любой точки на поверхности Земли пользуются географической сеткой, которая образуется из совокупности параллелей и меридианов. *Параллелями* называются линии сечения поверхности земного шара плоскостями, параллельными плоскости экватора, линии сечения поверхности Земного шара плоскостями, проходящими через ось вращения Земли, – *меридианами*.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое гомогенная аккумуляция?
2. В чем заключается гипотеза гетерогенной аккумуляции?
3. Чем отличаются гипотезы гомо- и гетерогенной аккумуляции?
4. В чем различие между гетерогенной и частичной гетерогенной аккумуляцией?
5. Каждая гипотеза имеет свои достоинства и недостатки. Попробуйте самостоятельно сформулировать из для гипотезы образования Земли, как океан – планеты.
6. Какие еще гипотезы образования Земли вы знаете?
7. Что такое геоид?
8. Для чего используется эллипсоид относительности?
9. Что называется осью вращения Земли?
10. Из чего формируется географическая сетка? Для чего она нужна?

10. ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

С первых лет XX в. строение Земли исследуется с помощью сейсмических волн, возникающих при землетрясениях и искусственных взрывах. Наблюдения показывают неравномерное распространение волн, что объясняется неоднородностью строения земных недр. Сейсмические волны, зарождающиеся в очаге землетрясения, могут быть продольными, поперечными и поверхностными. Для продольных волн, способных проходить через газообразную, жидкую и твердую среды, характерна большая по сравнению с остальными скорость распространения. Поперечные волны, в отличие от продольных, имеют меньшую скорость распространения и не проходят через жидкие и газообразные среды. Усовершенствование аппаратуры, всемирная сеть стандартных сейсмических станций способствуют постоянному расширению и углублению человеческих знаний в этой области. Сейсмические исследования дополняются исследованиями, проводящимися в других направлениях: испытания минералов, горных пород и металлов ультразвуковыми и ударными волнами и при высоких давлениях, в условиях, эквивалентных глубине до 700 км. Встречая на своем пути внутри Земли различные по свойствам слои, сейсмические волны испытывают преломление, частичное или полное отражение. Границы различных глубинных слоев, выделяемые по изменению скорости сейсмических волн, называются разделами. Два важнейших раздела расчленяют всю планету на три части: кору, мантию и ядро (объемы соответственно: 1,5 %; 82,3 %; 16,2 %). Граница, разделяющая ядро и мантию, называется *разделом Гутенберга* – в честь известного немецкого сейсмолога. Между мантией и земной корой находится *граница Мохоровичича*, установленная хорватским геофизиком А. Мохоровичичем в 1909 г. на основании сейсмограмм. В современных исследованиях внутреннего строения Земли широко используется сейсмическая томография, позволяющая не только выделять различные внутренние области, но и определять их «геометрию».

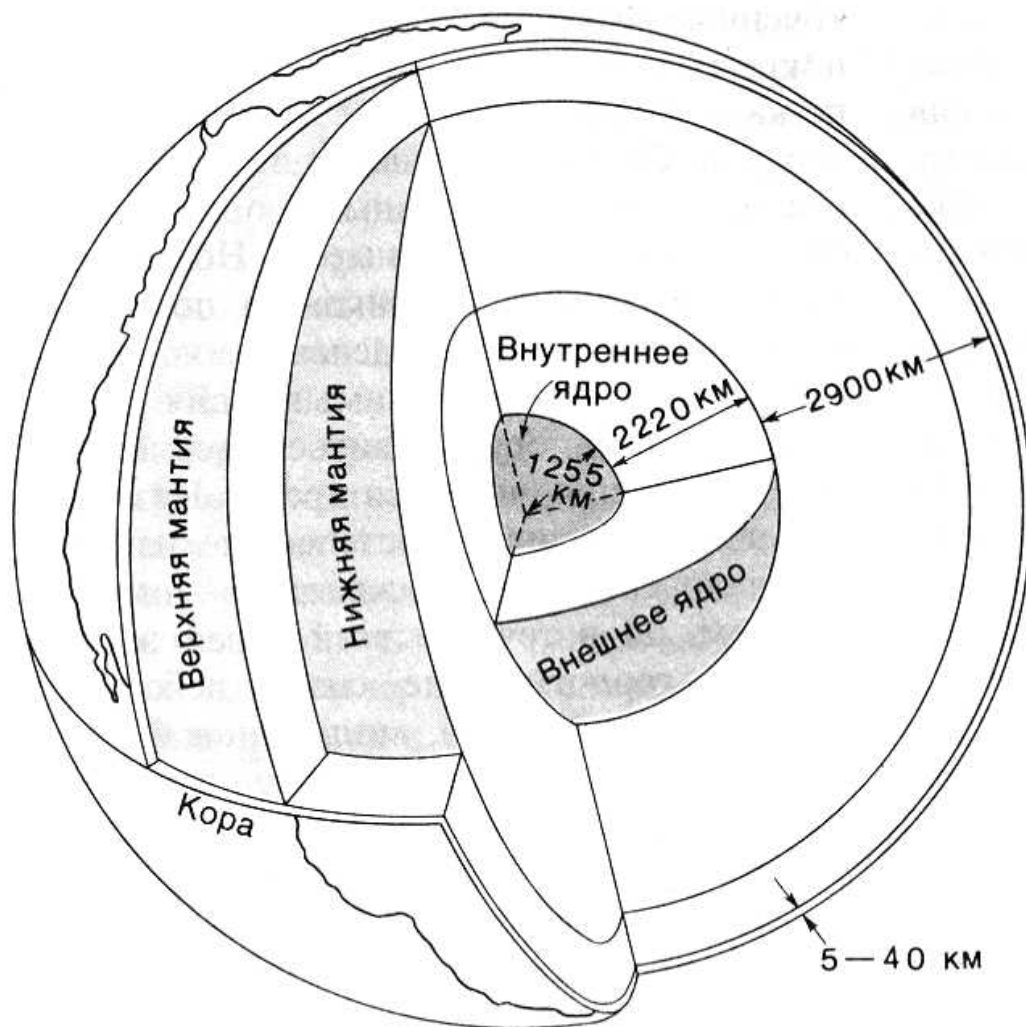


Рис.10. Внутреннее строение Земли.

10.1. Ядро

Существование у Земли ядра открыто в 1936 г. На сегодняшний день существует множество предположений о составе ядра и его моделей. Но этот вопрос окончательно не решен. Сейсмологические исследования показывают, что **внутреннее ядро** Земли (1270 км до ее центра) твердое, а **внешняя его часть** – жидкая. Внешнее ядро (глубина от 2900 до 5100 км) обычно считают вращающимся железоникелевым расплавом – возможно, с примесью более легких элементов, таких как кремний и сера. Эти легкие элементы включают в гипотетический состав ядра, чтобы лучше согласовать экспериментальные данные о плотности с расчетами, касающимися сейсмических

скоростей. Происхождение магнитного поля Земли связывают именно с внешним ядром. Внешнее ядро имеет температуру выше, чем прилегающая к нему мантия, поэтому активно на нее воздействует, являясь причиной тепло-массопотоков, направленных к поверхности Земли.

Как и многие другие вопросы геологической науки, вопрос о составе и строении внутреннего ядра до сих пор остается предметом непрерывных дискуссий и исследований. Ряд экспериментов показывает, что свойствами ядра может обладать вещество, в составе которого 80 % железа и 20 % диоксида кремния. Согласно расчетам, плотность вещества там достигает, как минимум, 13 г/см^3 , а давление – 3,6 млн. атм. Твердое состояние внутреннего ядра объясняется огромным давлением.

Ряд ученых предполагает, что в ядре Земли химические реакции неосуществимы. Это связано с полным разрушением электронных оболочек атомов под действием давления. Ядро считается зоной «нулевого химизма» (по А.Ф. Капустинскому). В рамках последних гипотез весьма интересна гипотеза американского геофизика М. Херндона, предположившего, что в центре внутреннего ядра находится область диаметром 8 км, состоящая из урана и плутония. Эта гипотеза помогает объяснить, почему магнитное поле Земли претерпевает изменения (см. п.13.1), но для подтверждения требует тщательных исследований. В 2002 г. сотрудниками Гарвардского университета была предложена новая модель ядра, состоящая из трех частей: внешнего ядра, внутреннего ядра и «самого внутреннего ядра» диаметром около 600 км. Данная модель, объясняющая развитие внутреннего ядра, является гипотетической и пока еще не подтверждена.

10.2. Мантия

Скорость сейсмических волн резко возрастает на границе между корой и мантией. Эта граница – *раздел Мохоровичича* (раздел Мохо, поверхность М) – проходит повсеместно на глубине около 30 км.

Ниже границы Мохоровичича, до глубины 2900 км, находится *ман-тия*. Она занимает более 80 % объема и более 2/3 массы Земли. Из анализа сейсмических скоростей следует, что мантия имеет, по меньшей мере, трех-членное деление: верхняя мантия, переходная зона и нижняя мантия. Температура в пределах мантии возрастает с глубиной. Скоростные различия между разными глубинами в мантии или между разными ее слоями могут быть обусловлены различиями в температуре и давлении, изменениями в минеральном составе, различиями плотности в результате фазовых переходов между минералами либо сочетаниями этих факторов. В 1975 г. П. Уилли предложил модель мантии, в которой слой между глубинами 100 и 400 км сложен гранатовым перидотитом (57 % оливина, 29 % пироксена, 14 % граната). На глубине 400 – 700 км мантия должна состоять из шпинелево-гранатовых пород. На еще более глубоких уровнях материал должен состоять в основном из магния, железа и кремния в плотной упаковке с кислородом в шестерной координации.

Верхняя мантия. По скорости прохождения сейсмических волн верхнюю мантию принято разделять на следующие слои (прил., рис. 1):

- высокоскоростной слой толщиной до 50 км;
- средний слой пониженных скоростей толщиной 100 км;
- однородный (более глубокий) слой толщиной около 250 км, распространяющийся до глубины 400 км.

Полностью твердый верхний слой мантии и лежащая на нем земная кора представляют собой главный источник землетрясений.

Свойства верхней мантии имеют прямое отношение к геотектоническим процессам, вызывающим движение материков и океанических впадин. Большой интерес представляет собой высокоскоростной слой и слой пониженных скоростей.

Верхний высокоскоростной слой – это хрупкое твердое вещество; вместе с земной корой он образует прочную внешнюю оболочку Земли, называемую литосферой. Важнейшими минералами, слагающими этот слой,

являются (предположительно) фазы низкого давления пироксена, оливина, граната.

Слой пониженных скоростей, находящийся под литосферой, называют также *астеносферой* (слабой податливой оболочкой), или пластичным слоем. Характерные для астеносферы низкие сейсмические скорости нельзя объяснить минеральным составом или температурным градиентом. Свойства этого слоя лучше всего объясняются либо частичным (до 1–3 %) плавлением, дегидратацией, либо присутствием в его минеральной ассоциации воды. Под областями докембрийских щитов этот слой развит, по-видимому, плохо и уходит на чрезвычайно большую глубину, а возможно, и полностью отсутствует.

Переходный слой и нижняя мантия. В переходном слое, находящемся под слоем пониженных скоростей на глубине 400 – 800 км, имеется несколько горизонтов, где сейсмические скорости резко возрастают. Это явление связывают с перекристаллизацией под высоким давлением породообразующих минералов в более плотные, что доказывается лабораторными опытами. Полагают, что такого рода уменьшение объема продолжается и на более глубоких уровнях. Расчетная плотность вещества у подошвы мантии составляет от 5,5 – 5,8 до 9,4 г/см³.

Повышение давления и температуры в мантии приводит к изменению химических свойств веществ, из которых она состоит. По мнению ряда ученых, в верхней мантии преобладают вещества с ионными связями, а в нижней должен наблюдаться атомный или ковалентный тип связи. Предполагается также, что на глубине около 1000 км в веществе мантии происходит переход электронов на незаполненные внутренние уровни. По терминологии А.Ф. Капустинского, это – зона «вырожденного химизма» и процессы здесь происходят по неизвестным пока человечеству законам.

10.3. Земная кора

Земная кора является твердой оболочкой Земли и состоит из магматических, осадочных и метаморфических горных пород. Часто земную кору называют *литосферой* (прил., рис.1), или каменной оболочкой Земли (от греч. «литос» – камень). В составе литосферы выделяют три слоя: осадочный, гранитный и базальтовый. Общая мощность (толщина) земной коры достигает 80 км. Масса земной коры составляет около 0,5 % массы планеты.

Внешнюю часть Земли составляет осадочный слой. Этот слой состоит из осадочных горных пород, плотность которых колеблется в интервале от 1 до 3 г/см³. Мощность осадочного слоя невелика, а в некоторых участках этот слой отсутствует полностью.

Ниже осадочного располагается гранитный слой, сложенный магматическими и метаморфическими породами, имеющими плотность до 2,9 г/см³. Гранитный слой, выходящий на поверхность Земли, называют *щитом*. Обычно щиты не прикрыты осадочными породами. Мощность гранитного слоя достигает 40 км, но иногда этот слой полностью отсутствует (например, на дне Тихого океана). Именно по наличию гранитного слоя земную кору разделяют на континентальную (включает гранитный слой) и океаническую (не включает гранитного слоя). Под гранитным слоем располагается базальтовый слой, и граница раздела этих слоев носит название *границы Конрада*.

Базальтовый слой сложен породами, по составу и свойствам близким к базальту. Эти породы принято называть основными. Мощность базальтового слоя колеблется от 5 до 30 км, его плотность 2,9 – 3,3 г/см³.

Континентальная (материковая) кора имеет трехслойное строение. Слои выделяются на основании различия сейсмических скоростей, вероятной плотности, а также по вещественному составу обнаженных на поверхности пород. Континентальная кора, по данным сейсмического профилирования, меняется от места к месту. Установлено, что гранитный слой под горами и высокими плато значительно толще, чем под низменностями, но имеются и исключения. Максимально известная мощность коры (70 – 80 км) установ-

лена под Гималаями и под Тибетским плато, где Индийская литосферная плита пододвигается под Азиатскую. Обе плиты являются континентальными.

Океаническая кора. Земная кора под океанами состоит из:

- низкоскоростного слоя глубоководных осадков, толщина которого в Тихом океане составляет 300 – 400 м, а в Атлантическом – 600-700 м;
- слоя со средней скоростью, называемого фундаментом, который имеет мощность около 800 м и сложен потоками базальтовой лавы с тонкими крепкими прослойками уплотненных осадков;
- базального, или океанического, слоя мощностью 4,1 – 5,8 км, имеющего плотность и скорость базальта.

Океанический базальт образуется в спрединговых срединно-океанических хребтах (прил., рис.2), поэтому считается, что океанический слой в целом имеет такое же происхождение. Сиалические породы, похожие на породы континентальной коры, – отсутствуют.

Кроме основных типов земной коры, выделяют промежуточные: субматериковый и субокеанический. Ниже земной коры в верхней мантии выделяют еще один слой, называемый астеносферой, или волноводом (см. далее).

10.4. Плотность Земли и химический состав земной коры

Плотность Земли в целом равна $5,52 \text{ г/см}^3$. Средняя плотность пород большей части земной коры составляет $2,65 \text{ г/см}^3$, и эти породы недостаточно сжимаемы даже при громадных давлениях, господствующих в недрах Земли, чтобы достичь на любой глубине плотности $5,52 \text{ г/см}^3$. Поэтому материал глубинных областей Земли имеет другой состав.

Поскольку на долю коры и ядра приходится соответственно только 1,5 % и 16,2 % объема Земли, основной объем (82,3 %) и основная масса – это мантия. Требуемую среднюю плотность Земли должно обеспечивать сочетание умеренно тяжелой мантии и исключительно тяжелого железоникелевого ядра. В 1968 г. были проведены электронные вычисления различных ва-

риантов внутреннего строения Земли. В результате получено 5 млн. моделей. Шесть моделей удовлетворяли известным фактам, но только три были правдоподобными. Наилучшее соответствие дает модель, в которой плотность жидкого внешнего ядра располагается в интервале $9,4 - 10,0 \text{ г/см}^3$; плотность твердого внутреннего ядра составляет $13,3 - 13,7 \text{ г/см}^3$.

Неоднородность строения земной коры обусловлена неравномерным распределением в ней химических элементов. Множество известных геохимиков работало над вычислением среднего химического состава литосферы. Одно из последних уточнений этого состава выполнено акад. А.П. Виноградовым в 1962 г.

Таблица 3

Распространенность главных химических элементов
в земной коре до глубины 16 км

Элемент	Содержание в земной коре, %	
	по А.Е. Ферсману (1933 – 1939 гг.)	по А.П. Виноградову (1962 г.)
Кислород	49,13	47,00
Кремний	26,00	29,00
Алюминий	7,45	8,05
Железо	4,20	4,65
Кальций	3,25	2,96
Натрий	2,40	2,50
Калий	2,35	2,50
Магний	2,25	1,87
Другие элементы	2,97	1,47

Распределение химических элементов в земной коре подчиняется определенным закономерностям. В поверхностных слоях преобладающими элементами являются кислород, кремний и легкие металлы, по мере углубления увеличивается доля железа и магния.

Химические элементы в земной коре редко встречаются в чистом виде. Чаще всего они образуют химические соединения, входящие в состав минералов и горных пород. Под **минералом** понимают простое вещество или химическое соединение, возникающее в результате природных процессов либо искусственно получаемое в лабораторных условиях. Минералы могут состоять как из одного химического элемента (алмаз, графит, серебро, золото), так и из нескольких (кварц, доломит, полевой шпат и т.д.). Большинство минералов – это твердые тела: кристаллические (98 %) или аморфные. Но встречаются жидкие и даже газообразные минералы.

Минералы входят в состав сложных агрегатов – **горных пород**. В отличие от минералов, характеризующихся однородным составом, горные породы имеют весьма разнообразный состав и образуются из одного или нескольких минералов. Состоящие из одного минерала горные породы называют **мономинеральными** (мрамор). Если в состав горной породы входит несколько минералов, ее называют **полиминеральной** (гранит). Все минералы, составляющие горные породы, называются **породообразующими минералами**. Их количество очень невелико. Из известных на сегодняшний день 3 тыс. минералов к породообразующим относится менее 40, но 99% земной коры состоит именно из них (табл. 4).

В зависимости от происхождения выделяют три основных вида горных пород, которые, в свою очередь, состоят из различных типов минералов. К основным типам горных пород относят осадочные (5 % земной коры), магматические (95 % земной коры) и метаморфические породы. В поверхностных частях литосферы распределение пород выглядит несколько иначе: 75 % приходится на долю осадочных, 25 % – на долю магматических. Метаморфические породы относят к тому типу пород, за счет которых они образовались.

Общий минеральный состав земной коры

Вид минерала	Содержание в земной коре, %
Полевые шпаты	57,9
Железomagнезиальные силикаты	16,8
Кварц	12,6
Слюды	3,6
Кальцит	1,5
Минералы глин	1,1
Прочие минералы	6,5

Вопросы для самоконтроля

1. Какими методами пользуются при изучении строения Земли?
2. Из чего состоит ядро?
3. Что представляет из себя мантия?
4. Что называется астеносферой?
5. В чем заключается различие между верхней и нижней мантией?
6. Где расположены граница Гутенберга и граница Мохоровичича?
7. Какие слои выделяют в земной коре?
8. Чем различаются континентальная и океаническая земная кора?
9. Что называется минералом?
10. Что представляет из себя горная порода?
11. Какие минералы называют породообразующими?
12. В чем причины неоднородности строения земной коры?

11. ВОЗРАСТ И ВИДЫ ГОРНЫХ ПОРОД

11.1. Осадочные горные породы

Осадочные горные породы образуются на поверхности Земли в результате экзогенных процессов, т.е. совместного действия атмосферных, биосферных, гидросферных и литосферных факторов. Большинство осадочных пород является продуктом выветривания и размыва материалов ранее существовавших пород. Некоторые осадки образуются из органического материала, вулканического пепла, метеоритов, являются результатом осаждения твердого вещества из минерализованных вод. *Источники осадочного материала* разделяют на несколько групп. Осадки органического происхождения могут быть сложены скелетными частями организмов и представлены карбонатами кальция и магния, фосфатами и оксидами железа и кремния, либо созданы растениями и состоят из частично разложившихся растительных остатков. Осадки вулканического происхождения сложены вулканическим пеплом, пылью или более крупными частицами, иногда – продуктами размыва лавы. К терригенным осадкам относятся продукты выветривания и размывания всех горных пород. Они могут состоять как из твердых частиц, так и из химически осажденного вещества, и представлены карбонатами кальция и магния, оксидами железа и марганца, фосфатами, хлоридом натрия (поваренная соль). Магматические осадки переносятся в виде растворов или суспензий горячими магматическими водами. Часть магматических осадков выходит на поверхность в местах выхода горячих источников и гейзеров. Осадки внеземного происхождения являются результатом разрушения метеоритов, проходящих сквозь земную атмосферу.

Существует много подходов к *классификации осадочных пород*. Наиболее полный исходит из того, что все осадочные породы можно разделить на 4 типа: обломочный материал, перемещаемый в виде твердых частиц; глинистый материал; хемогенные осадки, образующиеся при выпадении из растворов; органогенные осадки, создаваемые в результате жизнедеятельности организмов.

Обломочный материал, в свою очередь, классифицируется по величине и форме обломков, а также по степени сцементированности.

Наиболее распространены среди осадочных пород глинистые. Это каолиновые глины (каолин), гидрослюдистые глины, монтморрилонитовые глины (бентонит) и аргиллиты. Глинистые горные породы широко используются в керамической промышленности, строительстве, нефтяной и пищевой промышленности.

Хемо- и органогенные породы тесно связаны взаимными переходами, поэтому их нередко объединяют в одну группу, а классифицируют обычно по химическому составу. С такой точки зрения выделяют карбонатные породы, известняки, мел, мергели, доломиты, туфы, гейзериты, яшмы, бокситы, фосфатные породы, железистые породы. К органогенным породам также относят каменную соль, гипс, торф, сапропель, угли, нефть и горючие сланцы.

11.2. Магматические горные породы

Образование магмы, как первая стадия магматической деятельности, происходит в недрах Земли за счет плавления пород при высокой температуре. Жидкий магматический расплав содержит как кристаллы, так и растворенные газы. Результатом излияния магмы на поверхность Земли является *лава*. Магматические породы образуются в процессе остывания и кристаллизации магмы.

Магматические (изверженные) горные породы – результат внутренних процессов, происходящих в недрах Земли. Выделяют две группы магматических процессов:

- интрузивные, образующиеся при застывании магмы в глубинных зонах земной коры;
- экструзивные, возникающие при излиянии магмы на поверхность.

В процессе застывания магма образует магматические горные породы разнообразных форм. Магматические породы характеризуются определенными особенностями – такими, как текстура и структура. По содержанию

кремнезема магматические породы разделяют на *кислые* (более 65% кремнезема), *основные* (45–55% кремнезема) и *ультраосновные* (менее 45% кремнезема). По структуре эффузивные и интрузивные породы хорошо различимы.

11.3. Метаморфические горные породы

Преобразование магматических и осадочных горных пород в глубине Земли под действием температуры, давления, химических реакций приводит к образованию нового типа горных пород. Это – *метаморфические породы*, к которым относятся сланцы, мрамор, кварцит и многие другие.

Понятие «метаморфизм» было введено Ч. Лайелем в 1825 г. для определения эндогенных процессов, при которых осуществляется преобразование горных пород. Метаморфические процессы, происходящие под действием упомянутых факторов, приводят к изменению структуры, текстуры, минерального и химического состава горных пород. В зависимости от этих факторов (факторов метаморфизма) производится *классификация метаморфических процессов*. Выделяют:

- динамометаморфизм, происходящий под воздействием высоких давлений без участия магмы;
- контактовый метаморфизм, происходящий при контакте горных пород с магмой;
- региональный метаморфизм, происходящий при совместном воздействии на горные породы таких факторов как температура, давление, химические процессы, расплав магмы.

Метаморфические горные породы широко используются в качестве строительного сырья различного назначения, поделочных материалов.

Геохронологическая шкала времени

Эра	Период	Эпоха	Возраст, лет
КАТАРХЕЙ			От 5 до 3,5 млрд.
АРХЕЙ			От 3,5 до 2,6 млрд.
ПАЛЕОЗОЙ			От 570 до 230 млн.
	Кембрий		От 570 до 500 млн.
	Ордовик		От 500 до 440 млн.
	Силур		От 440 до 410 млн.
	Девон		От 410 до 350 млн.
	Карбон		От 350 до 285 млн.
	Пермь		От 285 до 230 млн.
МЕЗОЗОЙ			От 230 до 67 млн.
	Триас		От 230 до 195 млн.
	Юра		От 195 до 137 млн.
	Мел		От 137 до 67 млн.
КАЙНОЗОЙ			От 67 млн. до нашего времени
	Палеоген		От 67 до 27 млн.
		Палеоцен	От 67 до 54 млн.
		Эоцен	От 54 до 38 млн.
		Олигоцен	От 38 до 27 млн.
	Неоген		От 27 до 3 млн.
		Миоцен	От 27 до 8 млн.
		Плиоцен	От 8 до 3 млн.
	Четвертичный		От 3 млн. до нашего времени
		Плейстоцен	От 3 млн. до 20 тыс.
Голоцен		От 20 тыс. до нашего времени	

11.4. Возраст горных пород

При определении возраста горных пород используются два понятия: относительный возраст и абсолютный возраст. Основной *закон стратиграфии*, с помощью которого определяется относительный возраст горных пород, был установлен Стено в 1669 г. Этот закон называется законом последовательности напластования и гласит, что «в любой ненарушенной толще полого залегающих слоев осадочных пород наиболее древние слои находятся в основании, а перекрывающие их слои вверх по разрезу становятся все моложе». Для определения относительного возраста используют определенные комплексы ископаемой флоры и фауны, возраст которых установлен. Такой способ называется законом фаунистической (флористической) последовательности. Определение возраста горных пород указанным методом достаточно точно на ограниченных территориях. В межрегиональных и глобальных масштабах применение метода фаунистической последовательности требует чрезвычайной осторожности. *Относительный возраст* горных пород оценивается понятиями «древнее», «моложе», «одновременно».

Изучение относительного возраста горных пород привело к созданию так называемой стратиграфической колонки, или, в современном определении, «шкалы геологического времени» (табл. 5). Временные границы шкалы установлены с помощью радиометрических методов. Обычно шкала геологического времени содержит данные об основных процессах, характеризующих эволюцию живых организмов.

Абсолютный возраст горных пород оценивается в годах, и для его определения используются различные методы, основанные на явлении радиоактивного распада. К методам определения абсолютного возраста относятся радиоуглеродный, уран-свинцовый (торий-свинцовый), калий-аргоновый, рубидий-стронциевый и др. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, и главный критерий при выборе метода – его пригодность по диапазону времени (зависит от скорости распада материнского элемента). Обычно для коротких диапазонов времени используют тритий и изотоп угле-

рода ^{14}C (радиоуглерод), для более продолжительных – уран-свинцовый ($^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$) и другие методы. Радиоуглерод, период полураспада которого составляет 5570 лет, используется для определения возраста углеродсодержащих организмов, древесины, угля и торфа.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды горных пород вы знаете? Приведите их краткую характеристику.
2. Что является исходным материалом для образования горных пород?
3. Какие факторы влияют на образование осадочных горных пород?
4. Как классифицируют осадочные породы?
5. Какие породы называют магматическими?
6. Какие процессы влияют на образование метаморфических горных пород?
7. Как классифицируют процессы метаморфизма?
8. Где используются различные разновидности горных пород?
9. Каким образом определяется возраст горных пород?
10. В чем различие между абсолютным и относительным возрастом горных пород?
11. Что называется шкалой геологического времени?

12. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ

Как и многие другие науки, геология основывается на наблюдениях, экспериментах и построении теоретических моделей. Но поскольку главный объект изучения геологии – Земля – имеет очень большие размеры, возможности его изучения крайне ограничены. Поэтому большая часть геологических исследований направлена на изучение отдельных областей Земного шара (в различных аспектах) для построения целостной картины развития и строения Земли. Изучение Земли как единого целого и процессов, на ней происходящих и изменяющих ее лик, привело к созданию ряда теорий. Наиболее полными и законченными являются геосинклинальная теория и теория дрейфа континентов.

Накопленные ко второй половине XX в. данные позволили создать различные модели Земли. Обобщающая теория развития планеты, на которой мы живем, была получена в 70-е гг. XX в. и носит название «Тектоника плит». Созданию этой теории предшествовали две другие, упомянутые ранее, теории: геосинклинальная теория развития горных систем и теория континентального дрейфа. С помощью этих теорий объяснялись многие особенности развития Земли, и именно на их основе с учетом новых данных об океаническом дне была построена теория тектоники плит.

Вообще все процессы, влияющие на изменение земной поверхности, делятся на внутренние (*эндогенные*) и внешние (*экзогенные*). Первые происходят под действием внутренней энергии Земли и проявляются в виде горообразования, землетрясений, колебательных движений земной коры, процессов метаморфизма и магнетизма. Именно в ходе эндогенных процессов образуются океанические впадины, возникают острова и материки. Внешние (*экзогенные*) процессы происходят при воздействии на поверхность Земли атмосферных, гидросферных и биосферных факторов при участии солнечной энергии. Сформированный в ходе эндогенных процессов рельеф земной поверхности постоянно сглаживается и изменяется в ходе экзогенных процес-

сов. Взаимодействие эндо- и экзогенных процессов – один из примеров проявления философского закона единства и борьбы противоположностей. Формирование земной коры происходит, в конечном итоге, при непрекращающемся взаимодействии эндогенных и экзогенных процессов.

12.1. Эндогенные процессы

Тектонические движения. Породы внешней части Земли испытывают дифференцированные движения в результате определенных качественных изменений. Породы, образовавшиеся в морской обстановке, могли подняться на тысячи метров выше уровня моря (например, в канадских Скалистых горах или на плато Колорадо). Другие области (дно Тихого океана к западу от острова Мидуэй) сильно опустились. Бывшие вулканические острова, называемые *гуйотами*, подвергшиеся волновой эрозии, располагаются в настоящее время на тысячи метров ниже уровня моря. Обширные континентальные области (побережье Мексиканского залива) были затоплены, а затем поднялись над уровнем моря. В других районах (Вайоминг или Аппалачские горы) залегавшие прежде горизонтально слои горных пород ныне изогнуты в складки. В районе Великих равнин слои горных пород полого наклонены, а в районе Большого бассейна (штаты Юта и Невада) крупные блоки пород перемещены вертикально на тысячи метров вдоль крутых трещин (разрывов или разломов), называемых *сбросами*. В Калифорнии крупные сегменты земной коры смещены на большие расстояния по горизонтали вдоль разрывных нарушений другого типа, из которых лучше всего известен разлом Сан-Андреас.

Все тектонические движения принято разделять на три вида. Первый из них – *колебательные движения*, проявляющиеся в результате радиальных перемещений в земной коре. Это длительные процессы, охватывающие значительные территории. Колебания представляют собой совокупность чередующихся (но не повторяющихся точно) восходящих и нисходящих движений. Результатом колебательных движений является в конечном итоге созда-

ние внешнего облика планеты. При опускании материков происходит трансгрессия моря (наступление моря на сушу), при поднятии – регрессия. Выделяют три вида колебательных движений, первым из которых являются движения древних геологических периодов. Примером может служить образование впадины Тихого океана. Выделяют также новейшие колебательные движения четвертичного периода и современные движения; складчатые движения земной коры, проявляющиеся в результате тангенциальных напряжений. Они называются также горообразовательными. Ко второму типу тектонических движений относят *складчатые движения*. Они происходят в более короткий временной период, чем колебательные, но характеризуются большей амплитудой и интенсивностью. Складчатые движения сопровождаются образованием крупных разломов и трещин в земной коре.

Создание ранее упомянутой геосинклинальной теории развития горных систем связано с изучением именно этого типа движений. Установлено, что складчатые движения проявляются только в определенных участках земной коры, представляющих собой подвижные ослабленные зоны. Такие зоны называются *геосинклиналями*, и в них активно проявляется магматическая деятельность (вулканизм). К геосинклинальным областям относятся горные цепи Кавказа, Крыма, Альп, Карпат и др. с прилегающими к ним морями.

На поверхности Земли выделяются также менее подвижные, чем геосинклинали, участки, называемые *платформами*. Платформы состоят из двух слоев: фундамента, сложенного магматическими и метаморфическими горными породами, и осадочного чехла. Выходы фундамента на поверхность называют *щитами*. Предполагается, что сначала вся земная кора представляла собой геосинклиналь, гораздо позднее появились платформы, с расширением которых произошло постепенное уменьшение геосинклиналей.

Третий тип тектонических движений – *землетрясения*, т.е. внезапные и резкие сотрясения земной поверхности в виде толчков различной силы, вызванные рядом факторов. Зоны, где происходят землетрясения, называются сейсмическими областями и связаны с разломами в земной коре. На сего-

днѣшний дѣнь выделяютъ двѣ основныя сейсмическія зоны: тихоокеанская, охватывающая побережье тихого океана въ видѣ кольца (до 70% землетрясеній) и средиземноморскій сейсмическій пояс, протянувшійся отъ острововъ Зеленаго мыса черезъ бассейны Средиземнаго и Чернаго морей, Кавказъ и Гималаи до Индонезіи (20% землетрясеній).

Тектоника плит и спрединг океаническаго дна. В 60 – 70-х гг. XX в. было установлено, что литосфера (внешняя оболочка Земли, объединяющая земную кору и верхній слой мантии) состоит из 6 (въ некоторых источниках – 7) крупныхъ и нескольких мелкихъ плит (прил., рис.3). Края плит очерчиваются глобальными системами распределения эпицентровъ землетрясеній. Крупныя плиты несут на себѣ континенты: Северную и Южную Америку, Евразію, Африку, Австралію, Антарктиду, а также большую часть Тихого океана. Эти плиты толщиной 75 – 125 км медленно перемещаются относительно друг друга. Вдоль узкихъ зон на ихъ краяхъ возникаютъ многочисленныя землетрясенія. Предполагается три типа относительнаго движенія плит. Плиты могут расходиться (***дивергировать***) въ разныя стороны, въ результатѣ чего образуется новая океаническая кора. Плиты могут двигаться навстрѣчу друг другу (***конвергировать***), могут проскальзывать относительно друг друга по трансформнымъ границамъ. Кора может перемещаться по океаническому дну въ горизонтальномъ направленіи (прил., рис. 4, 5) и опускаться въ мантию въ зонахъ океаническихъ желобовъ у конвергентныхъ границъ. Срединно-океанический хребетъ представляетъ собой гористое сводообразное поднятіе с ***осевымъ рифтомъ*** (англ. «rift») – трещина, щель).

Ниже литосферы располагается ***астеносфера*** («податливая» сфера). Въ ней сейсмическія колебанія замедляются и ослабеваютъ главнымъ образомъ потому, что поднимающееся изъ болѣе глубокихъ зонъ Земли тепло вызываетъ плавленіе. Расплавленный материалъ поднимается съ глубины болѣе 100 км и затвердеваетъ вблизи поверхности морскаго дна вдоль срединно-океаническихъ хребтовъ – такихъ какъ Срединно-Атлантическій, для котораго характерны обиліе разломовъ и горный рельефъ. Образующіеся при этомъ изверженныя (маг-

матические) породы раскалываются, и разные блоки движутся от хребта в противоположные стороны со скоростью несколько сантиметров в год. Такой процесс называется разрастанием океанического дна, или *спредингом*. Механизм этого процесса пока недостаточно изучен, но, по-видимому, он включает какой-то вид конвекции больших объемов пластичного мантийного вещества. Подъем магматического вещества в срединно-океанических хребтах способствует непрерывному образованию новой коры в месте раздвижения океанического дна. Раскол, возникший вдоль Срединно-Атлантического хребта, послужил началом образования впадины Атлантического океана и обусловил отделение Северной и Южной Америки от Европы и Африки. Спрединг в стороны от хребта вызывал медленное расширение океана до его нынешних размеров (в широтном направлении). По мере отдаления пород океанического дна от срединно-океанических хребтов происходит их передвижение в более глубокие части океана. После охлаждения на них накапливается осадочный чехол, мощность которого возрастает по мере удаления от срединно-океанических хребтов.

Но иногда спрединговый конвейер наталкивается на серьезное препятствие – континент (пример – плита Наска в восточной области Тихого океана упирается в западное побережье Южной Америки). В этом случае океаническая плита изгибается вниз и погружается в мантию, образуя в морском дне глубоководный желоб в месте изгиба. Такое же изгибание плиты и образование глубоководных желобов, подобных Марианской впадине, происходит и перед дугообразными цепочками вулканических островов Тихого океана. Холодная хрупкая опускающаяся литосферная пластина движется вниз по наклонной плоскости, называемой *зоной субдукции (зоной Бенъоффа)*, достигая глубины 700 км и, вызывая на своем пути землетрясения, а затем окончательно поглощается мантией.

Какие бы глубоководные осадки ни накапливались на океанической плите при ее движении, все они обычно слишком легкие, чтобы погрузиться в мантию в зоне субдукции, и поэтому, подходя к континентальному масси-

ву, они сминаются в складки, осложненные разрывами, и образуют горные сооружения, подобные Андам. Все эти движения объединяются общим термином «тектоника плит».

Установлено, что скорость спрединга, направленного от центральных зон срединно-океанических хребтов, составляет 1 – 8 см/год (в Тихом океане). Скорость движения океанических плит в несколько раз больше, чем континентальных. Наблюдения показывают, что скорость спрединга непостоянна и в прошлом претерпевала изменения.

Представления о спрединге и тектонике плит явились настоящей революцией во многих областях геологии и дали этой науке новую жизнь. Появилась возможность разумного решения многих проблем, хотя и остался ряд трудностей, которые еще предстоит преодолеть. В настоящее время приводится множество аргументов в пользу спрединга океанического дна. Все они весьма убедительны и могут использоваться «в качестве основы для понимания процессов тектонической эволюции континентов и океанов».

Все происходящие в недрах Земли движения – поднятие, опускание, смятие пород в складки, наклон, образование разрывов, спрединг – это проявления *тектонических движений*, или *тектогенеза*.

12.2. Геосинклинальная теория

Одним из основоположников данной теории является Джеймс Холл. Идея выдвинута в 1857 г. Согласно геосинклинальной теории, за свою историю развития поверхность Земли несколько раз последовательно опускалась и поднималась. При опускании происходило образование морских осадков, проявлялась вулканическая деятельность, во время поднятий – образование складчатых гор. Причиной этих процессов считались *астенолиты* – «пузыри», насыщенные газообразными продуктами и веществом магмы, поднимающиеся вверх от внешнего ядра. Достигая литосферной плиты такой «пузырь» вызывает поднятие земной поверхности. По истечении времени асте-

нолит остывает, теряет часть газа и уменьшается в размерах – поверхность опускается.

По определению Аллисона и Палмера *геосинклиналью* называется «удлиненная область осадков, которая позднее превращается в горную систему». В развитии геосинклинали предполагаются следующие стадии:

- Образование геосинклинали происходит в зоне субдукции и начинается с опускания большой территории под воду.
- Далее происходит накопление мощных отложений на этой территории. Стадия накопления может длиться несколько млн. лет.
- Следующей стадией является деформация геосинклинали, образование в породах складок и разрывов. Осадочные породы подвергаются метаморфизму. Метаморфические процессы происходят за счет высоких температур и сжатия при сближении литосферных плит в зоне субдукции. Если температура и сжимающие силы недостаточны для метаморфизма, происходит пластичное смятие слоев или их разрывы, если породы являются хрупкими. Все эти процессы продолжаются до тех пор, пока не прекращается сближение литосферных плит.
- В дальнейшем возможно поднятие отдельных областей геосинклинали с последующим размывом и (или) накоплением осадочных пород.

Такой процесс горообразования, обусловленный движением литосферных плит, называется *орогенезом*.

Интенсивное изучение дна Мирового океана в 60-е г.г. XX века привело к необходимости пересмотра ряда положений геосинклинальной теории, так как полученные данные плохо с ней коррелировали. Недостатки геосинклинальной теории относят к тому, что она основана на исследованиях Западной Европы, которая на сегодняшний день считается аномальной геологической областью. Сейсмологические данные второй половины XX в. не подтвердили возможности процессов интенсивного образования астенолитов.

12.3. Дрейф континентов (теория мобилизма)

Возможность процессов перемещения континентов предполагалась еще в XV в. Ф.Беконом. Предположения основывались на сходстве очертаний береговой линии западного берега Африки и восточного берега Южной Америки и базировались на трактовке Библии. Высказывались гипотезы о разделении континентов в результате всемирного потопа (Ф. Плассе, середина XV в.). Идею раскола некогда единого материка предложил в середине XIX в. итальянский ученый А. Снيدر-Пеллегрини.

Теория *дрейфа континентов* сформировалась в 1910 – 1940 г.г. Наиболее существенный вклад в ее развитие внесли А. Вегенер, А. Холмс, А. Дю Тойт. В 1965 г. предпринята наиболее удачная попытка совмещения границ континентов (Э. Буллард, Дж. Эверетт, А. Смит, 1965 г.).

В основе теории лежит предположение о существовании древнего единого материка – Пангеи (в другой редакции – двух материков – Лавразии и Гондваны). После раскола континентального массива начинается движение континентальной коры по твердой (симатической) коре океанов. Этот процесс и является дрейфом континентов, причем на фронтальных краях континентов происходит образование горных массивов.

В пользу этой теории свидетельствует совмещение береговых линий Африки и Южной Америки; Северной Америки, Гренландии и Северо-западной Европы.

Геологические исследования показывают и сходство внутреннего строения континентов, состава, структуры и возраста горных пород. Палеонтологические данные также подтверждают возможность протекания подобных процессов (близость флоры и фауны континентов палеозойского и раннего мезозойского, особенно – триасового – периодов).

Проведение различных исследований привело к объединению теории геосинклиналей и теории дрейфа континентов в единую теорию, получившую название *теории тектоники плит и орогенеза*. Важную роль в появлении этой теории сыграли морские исследования, начавшиеся во второй по-

ловине XX в. после второй мировой войны. Результатом этих исследований стала теория спрединга океанического дна. Наиболее существенный вклад в указанную теорию внесли: Б.Хизен, Р. Дитц, Г. Хесс, В.В. Белоусов, отец и сын Мейергофы.

Аллисон и Палмер приводят убедительные аргументы в пользу данной теории и считают, что к 1967 г. теории спрединга и тектоники плит стали «основой для понимания процессов тектонической эволюции континентов».

Современные исследователи, развивая теорию дрейфа континентов, предлагают рассматривать процесс эволюции земной коры как циклический. Цикличность эволюции земной коры, сформировавшейся, по данным исследований, более 3 млрд. лет назад, обусловлена процессами разогрева и охлаждения вещества мантии. Начало данного процесса относят ко времени формирования земного ядра (около 2,8 млрд. лет назад). Предполагается также, что континентальные плиты в процессе их перемещения около 2,6 млрд. лет назад образовали единый суперконтинент, названный *Моногея*. Моногея просуществовала около 200 млн. лет и распалась на отдельные континентальные плиты, продолжившие свой дрейф. Исследователи полагают, что такой циклический процесс образования и распада суперконтинентов повторялся неоднократно, и в истории Земли существовало несколько континентов: Моногея (около 2,6 млрд. лет назад), *Мегагея* (около 1,9 млрд. лет назад), *Мезогея* (около 1,2 млрд. лет назад), двухконтинентная система *Лавразия – Гондвана* (около 0,8 млрд. лет назад) и *Пангея* (около 0,2 млрд. лет назад). Каждый из этих континентов просуществовал около 150 млн. лет.

Процесс циклической эволюции земной коры не завершен, и выдвигается гипотеза образования нового суперконтинента – *Гипергеи* – примерно через 1,6 млрд. лет. Тем не менее, считается, что большая часть континентальной земной коры (до 80%) сформирована более 1,5 млрд. лет назад, а с момента образования Моногеи, одновременно с циклическими преобразованиями земной коры происходит ее реювенация. Под *реювенацией* понимают

процессы омоложения сформированной ранее континентальной земной коры, сопровождающиеся магматизмом, метаморфизмом и рудообразованием.

12. 4. Экзогенные процессы

К экзогенным процессам относятся: выветривание и геологическая деятельность ветра; геологическая деятельность поверхностных текучих и подземных вод; геологическая деятельность снега и льда и многолетняя мерзлота; геологическая деятельность моря. Рассмотрим эти процессы несколько подробнее.

Выветривание и геологическая деятельность ветра. Согласно определению В.В. Добровольского, под **выветриванием** понимают суммарное воздействие на горные породы, находящиеся на поверхности, факторов и условий географической среды. Этот процесс гораздо сложнее, чем просто деятельность ветра, и поэтому его часто называют **гипергенезом**. Любая горная порода представляет собой состояние равновесия между химическим составом и физическими условиями существования, причем факторами равновесия являются температура, давление и концентрация компонентов данной породы (системы). При изменении факторов равновесия система будет стремиться к новому равновесному состоянию, т.е. – выветриваться. Выветривание магматических и метаморфических горных пород приводит, в конечном итоге, к образованию осадочных пород. Они, в свою очередь, тоже подвергаются выветриванию. В результате процессов выветривания в первую очередь происходит преобразование минералов. Процессы выветривания тесным образом связаны с климатическими условиями нахождения пород и зависят от сезонных и суточных колебаний температуры, гравитационных процессов, кристаллизации из растворов солей, наличия электрических разрядов (молний), пожаров, лучистой энергии Солнца. Под воздействием всех этих факторов горные породы интенсивно разрушаются.

Процессы выветривания подготавливают, в буквальном смысле этого слова, почву для геологической деятельности ветра. Именно ветер переносит

обломки пород на значительные расстояния и продолжает при этом их разрушение. **Геологическая деятельность ветра** проявляется в процессах переноса и аккумуляции (отложения), корразии (обтачивания) и дефляции (выдувания). Наиболее сильно деятельность ветра проявляется в пустынях и полупустынях, т.е. там, где отсутствует растительный покров.

Геологическая деятельность вод. Поверхностные текущие воды – это совокупность всей воды (дождевой, талой, рек, ручьев), изменяющей земную поверхность. Эти воды подразделяются на две группы: временно текущие и постоянно действующие потоки. Процессы разрушения горных пород обоими типами водных потоков называют **эрозией**, для борьбы с которой ежегодно проводится множество мероприятий. К геологической деятельности постоянно текущих потоков (рек) относится также перенос (транспортировка) и аккумуляция продуктов разрушения горных пород.

Геологическая деятельность подземных вод складывается из двух основных процессов – созидания и разрушения. При химическом взаимодействии подземных вод с горными породами возникают новые (вторичные) минералы и горные породы, подземные воды участвуют в переносе и переотложении вещества. Это, несомненно, созидательная деятельность. Разрушительная деятельность подземных вод заключается в растворении и выносе мелких минеральных частиц, в результате чего возникают пустоты и проседания горных пород, а в конечном итоге, происходят оползни и обвалы. В некоторых случаях созидательная деятельность подземных вод (образование новых минералов в почвах) приводит к весьма плачевным результатам, – например, к образованию солончаков.

Геологическая деятельность моря. Как поверхностные и подземные воды, Мировой океан также является частью гидросферы. Его геологическая деятельность проявляется в разрушении горных пород, транспортировке и аккумуляции разрушенного материала. Эти процессы осуществляются за счет движения морской воды (гидравлических ударов, течений, ударов обломков переносимых пород, химического воздействия). Наиболее сильное

разрушительное воздействие оказывает прибой, сокрушающий берега и прибрежные сооружения. Созидательная работа моря заключается в аккумуляции осадочных пород, содержащих полезные ископаемые. Морские отложения представляют собой совокупность терригенных и органогенных отложений.

Разрушение и накопление горных пород. В результате разрушения горных пород под влиянием силы тяжести, деятельности воды, ветра и льда происходит снос и выравнивание возвышенностей и заполнение впадин на земной поверхности. Этот процесс называется градацией, и в нем различают две стороны: деструктивную (*деградация*) и конструктивную, созидательную (*аградация*). Чаще при описании этих преобразований используются термины *выветривание, эрозия* (размыв) и *отложение* (осадкообразование). Дождевая вода вызывает физическое размельчение или химическое разложение некоторых горных пород на месте их залегания, а бегущие по склонам водные потоки уносят частицы этих размельченных пород и откладывают их вдоль русел рек, в озерах, во впадинах пустынь или в морях и океанах. Прибой, ударяющий в морской берег, размывает его и переносит рыхлый материал на подводные склоны или в район пляжей. Ветер переносит мелкие частицы горных пород как пыль во взвешенном состоянии или перекачивает песчаные зерна по поверхности, откладывая их в виде слоев тонкой пыли или в виде песчаных дюн. Движущиеся скопления льда – ледники – переносят обломки пород, нередко достаточно крупные. При таянии льда происходит отложение этого материала. Подобные изменения обычно происходят очень медленно, но непрерывно, и за длительное время результаты такого рода деятельности оказываются весьма значительными и охватывают большие площади.

12.5. Основные процессы образования горных пород

Магматизм. Процессы, включающие в себя движение расплавленного металла под поверхностью Земли, образование магматических горных по-

род, выброс лавы, шлака, пемзы и вулканического пепла на земную поверхность, называются магматической деятельностью или магматизмом. Если магматическая деятельность происходит на поверхности, ее называют *эффузивной*, на глубине – *интрузивной*.

Метаморфизм. Метаморфизмом именуется процесс, в результате которого под влиянием высоких температур и давления или действия химически активных флюидов значительно изменяется химический и минеральный состав, а также структура существовавших ранее пород. Этот процесс напоминает магматическую деятельность, но его отличие в том, что существовавшие ранее породы претерпевают изменения, находясь в твердом, а не в расплавленном состоянии.

Вопросы для самоконтроля

1. Как подразделяются процессы, изменяющие внешний вид Земли?
2. Какие процессы относятся к эндогенным?
3. Что называют тектоническими движениями земной коры?
4. Охарактеризуйте виды тектонических движений.
5. Что такое геосинклинали?
6. Что называют спредингом океанического дна?
7. Что такое “зона Бенъоффа” ?
8. В чем проявляется геологическая деятельность ветра?
9. В чем проявляется геологическая деятельность вод?
10. В чем проявляется геологическая деятельность моря?
11. Для вопросов 8 – 10 охарактеризуйте созидательную и разрушительную деятельность.
12. Как происходит разрушение и накопление горных пород?
13. Что такое магматизм?
14. Что такое метаморфизм?

13. ОБОЛОЧКИ ЗЕМЛИ И ИХ ФУНКЦИИ

13.1. Магнитосфера

Земля окружена магнитным полем, захватывающим обширное пространство и очень похожим на поле, создаваемое простым двухполюсным магнитом. Оно служит «передовой линией» Земли в защите от частиц высокой энергии, с большой скоростью летящих из космического пространства. Эти частицы (электроны, протоны и ядра химических элементов) являются ионизирующим фактором, который оказывает серьезное влияние на живые организмы, в том числе – на их генетический аппарат. На сегодняшний день доказано, что магнитное поле является необходимым условием существования жизни на Земле, так как эволюция всех живых организмов происходила именно в условиях магнитного поля. Опыты по действию измененного магнитного поля на жизнедеятельность различных организмов показывают нарушение обмена веществ, репродуктивных функций, нейромоторной активности.

Магнитное поле Земли испытывает сильные вариации: небольшие изменения в масштабе дней или лет оказываются очень большими в масштабе миллионов лет. Установлено, что в течение геологического времени существования Земли ее магнитное поле неоднократно изменяло свою напряженность и меняло знак. Изменение знака магнитного поля сопряжено с изменением местоположения северного и южного полюсов. Этот процесс сопровождается сначала значительным снижением напряженности поля (до нулевого значения), а затем ее постепенным нарастанием, но с противоположным знаком. В настоящее время Земля переживает эпоху «прямой полярности», но напряженность магнитного поля медленно понижается. Изменение напряженности магнитного поля должно будет привести к изменению биосферы: вымиранию групп организмов, увеличению количества мутаций и т.п.

13.2. Атмосфера

Это газовая оболочка Земли. От распределения в ней тепла, давления и содержания водяного пара зависят погода и климат Земли. Количество выпадающих осадков зависит от пути и характера перемещений воздушных масс. Атмосфера поддерживает на Земле различные формы жизни, выполняет функцию термического щита, отражая или поглощая большую часть солнечной радиации, здесь происходит распределение тепла и рассеяние солнечного света. Поэтому атмосфера – своеобразный «зонтик», защищающий Землю от избыточного ультрафиолетового излучения и от метеоритов.

Немаловажной составляющей атмосферы является углекислый газ, содержание которого связано с жизнедеятельностью растений и техногенной деятельностью человека. Атмосфера наравне с биосферой принимает участие в круговороте основных биогенных элементов: углерода, кислорода, азота, серы.

Атмосфера – важный геологический фактор, так как процессы, происходящие в ней, способствуют выветриванию горных пород, образованию новых минералов за счет химических реакций.

В атмосфере выделяют ряд слоев, определяемых температурой. Нижний слой, тропосфера, характеризуется уменьшением температуры на 1°C на каждые 160 м высоты. В тропосфере происходит основная конвекция воздушных масс, что обусловлено разностью температур и различной плотностью теплого и холодного воздуха. Физические процессы, происходящие в тропосфере, оказывают значительное влияние на климат Земли. Здесь сосредоточены пыль и водяной пар, так как количество воды уменьшается с понижением температуры. Следовательно, все облака расположены в тропосфере. На высоте 10 – 13 км начинается зона постоянной температуры (от -50 до -55°C). Это основание стратосферы. Стратосфера представляет собой область холодного чистого разреженного воздуха. В отличие от тропосферы здесь отсутствует конвекция, так как существует постоянное равновесие между излучаемой и поглощаемой радиацией. Сквозь стратосферу постоянно падает ме-

теоритная пыль, кроме того, сюда выбрасывается вулканическая пыль и продукты ядерных взрывов. Большое количество вулканической пыли снижает солнечную радиацию, и существует предположение, что избыток такой пыли может привести к глобальному похолоданию, вплоть до нового ледникового периода. Толщина стратосферы достигает 20 км.

Выше стратосферы располагаются мезосфера и термосфера.

13. 3. Гидросфера

Так называют водную оболочку твердой Земли. Общий объем природных вод около 1,39 млрд. км³. Более 70% поверхности Земли покрыто водой.

Гидросфера Земли является открытой системой и объединяет различные формы существования воды. Вода может быть жидкой (океаны, моря, реки, подземные воды), твердой (ледники) и газообразной (пары воды в атмосфере). Различают свободную (все, что перечислено выше) и связанную воду: в виде кристаллогидратов вода входит в состав различных горных пород и минералов. В гидрологическом цикле принимает участие именно свободная вода. В.В. Орленок в своей книге «История океанизации Земли» приводит следующее распределение свободной воды:

Таблица 6.

Распределение свободной воды

Элемент гидросферы	Масса воды, кг
Мировой океан	$1,42 \cdot 10^{21}$
Реки и озера суши	$5,0 \cdot 10^{17}$
Ледники	$3,5 \cdot 10^{19}$
Атмосфера	$1,3 \cdot 10^{16}$
Почва	$8,5 \cdot 10^{18}$
Морские осадки (увлажнение верхних слоев)	$1,0 \cdot 10^{20}$
Вся свободная вода Земли	$(1,564 - 1,6) \cdot 10^{21}$

Основная масса воды – это соленая вода Мирового океана. Средняя соленость воды составляет 35%. Химический состав океанической воды схож с

составом человеческой крови и включает в разных пропорциях практически все известные химические элементы. Основная часть приходится на кислород, водород, натрий и хлор. В водах Мирового океана растворено большое количество углекислого газа, потребляемого растениями в процессе фотосинтеза.

Гидрологический цикл (круговорот воды) начинается именно в гидросфере. Однако приводится этот цикл в действие атмосферными факторами. Специфические элементы гидросферы – такие как волны и прибрежные течения – изменяют берега и пляжи. Водяные пары атмосферы являются фильтром для солнечной радиации, регулируют климат Земли.

Гидросфера выполняет ряд экологических функций. Она является важнейшей составной частью всех живых организмов, важнейшим минеральным сырьем и главным природным ресурсом; осуществляет взаимосвязи всех процессов в экосистемах; принимает участие во всех экологических циклах.

Гидрологический цикл. Под этим термином понимают перемещение влаги из моря в атмосферу, выпадение влаги в виде осадков на сушу и обратный сток в море. На суше гидрологический цикл представляет собой совокупность нескольких стадий (прил., рис. 6). Во-первых, это испарение влаги с поверхности источников воды; во-вторых, ее распространение над землей при помощи ветра в виде пара или облаков; в-третьих, – выпадение осадков; в-четвертых, – сток выпавших осадков в море. Но на суше осуществляется еще несколько второстепенных замкнутых циклов, поэтому обратно в море возвращается только 1/5 часть выпавших осадков.

Последние исследования показывают, что баланс воды на планете является более сложным, чем схема гидрологического цикла, в которой объем воды, испарившейся над океаном равен объему воды, поступившей за счет речного стока, дождевых осадков и подземных вод. В этом балансе необходимо учитывать участие вод, поступивших в результате сейсмической и вулканической деятельности из недр Земли (эндогенные воды), а также потери воды на фотолиз. **Фотолизом** называется процесс разложения молекул воды

на водород и кислород в верхних слоях атмосферы под действием солнечных частиц с высокой энергией. Полученный при фотолизе кислород остается в атмосфере, так как имеет достаточно большую массу, а легкие молекулы водорода «уходят» в космическое пространство. Кроме того, вода попадает на поверхность планеты с космическими телами. По расчетам /Орленок, стр. 66/ эндогенные поступления воды составляют $3,6 \cdot 10^{12}$ кг, а потери на фотолиз – $0,7 \cdot 10^{12}$ кг.

13.4. Геосфера и литосфера

Геосферой называют твердую оболочку Земли – основной объект работы геолога. В геосфере выделяют три главные части, различные по своим свойствам:

- тонкая (5 – 40 км) внешняя оболочка, или земная кора;
- внутренняя оболочка, или мантия;
- ядро, которое делится на жидкое внешнее и твердое внутреннее.

Именно в геосфере происходят наиболее заметные геологические изменения. Процессы, протекающие в коре и верхней мантии, влияют на размещение и рельеф континентов и океанических бассейнов. В составе геосферы принято выделять литосферу – каменную оболочку Земли. Литосфера включает в себя земную кору, границу Мохоровичича и верхний слой верхней мантии. Толщина литосферы на континентах и под океанами различна и, по некоторым оценкам, колеблется в пределах 25 – 200 км и 5 – 100 км соответственно. В составе литосферы основную часть составляют изверженные магматические породы (до 95%), а кроме них – осадочные и метаморфические. Так как литосфера играет существенную роль в жизнеобеспечении и эволюции биоты, говорят об экологических функциях литосферы. Изучением этих функций занимается экологическая геология. К *экологическим функциям литосферы* относятся: ресурсная, геодинамическая, геохимическая и геофизическая функции. Под *ресурсной* функцией понимают потенциальную способность литосферы обеспечивать потребности экосистем абиотическими

ресурсами, в т.ч. – полезными ископаемыми. Реализация этой функции предполагает, что потребности человека не должны вступать в противоречие с потребностями биоты в целом. Нерациональное использование природных ресурсов, особенно в области энергетики, требует перехода человечества к системному ресурсному мышлению, разработка теоретической базы которого – одна из важнейших задач экологической геологии.

Геодинамическая функция литосферы – это различные геологические процессы эндо- и экзогенного характера, влияющие на экосистемы и человеческое общество. Эти процессы могут носить как природный, так и антропогенный характер. Так как антропогенное действие на окружающий мир, в том числе – на литосферу, существенно превосходит природные аналоги, важной задачей является прогнозирование техногенных воздействий на природную среду.

Геохимическая функция литосферы предполагает участие этой оболочки Земли в процессах круговорота веществ в природе. В реализации этой функции выделяют механическую, физико-химическую, биогенную и техногенную миграцию веществ.

13. 5. Биосфера

Важнейшая особенность планеты Земля – это существование жизни. Область существования живых организмов называется биосферой. Биосфера выполняет множество различных функций, рассмотрение которых не относится к тематике данного пособия. Но воздействие этой оболочки, в которой протекает жизнь, на геологические процессы представить проще всего. Живые организмы от мельчайших одноклеточных, составляющих океанический планктон, до крупнейших млекопитающих оказывает сильное влияние на геологическое развитие Земли: от образования осадочных пород до их выветривания и эрозии. Немаловажное влияние на окружающий мир, и на геологические процессы в том числе, оказывает человек.

В настоящее время говорят о формировании принципиально новой оболочки Земли – *ноосфере*, или сфере разума. Под ноосферой понимают качественно новую форму организации взаимодействия общества и природы, основанную на их тесной взаимосвязи. Ноосфера – это качественно новое эволюционное состояние биосферы.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите сферы Земли и дайте им краткую характеристику.
2. Как влияет магнитное поле Земли на процессы, происходящие на планете?
3. Из чего складывается баланс воды на планете?
4. Что такое гидрологический цикл?
5. Какие еще циклы вы знаете?
6. Какие слои выделяют в атмосфере? В чем они различаются?
7. Какие функции выполняет атмосфера?
8. Что такое ноосфера?
9. Каковы функции гидросферы?
10. Каковы границы расположения биосферы? Чем это объясняется?
11. Какие функции выполняет литосфера?
12. В каких сферах происходят процессы, влияющие на формирование рельефа? Перечислите эти процессы.
13. Какая из оболочек Земли подвержена изменениям больше всего? Почему?

В заключение следует сказать, что геология имеет большое практическое, хозяйственное и культурное значение. Она способствует пониманию того, что представляет собой Земля, и формирует правильное отношение к планете, на которой мы живем. Геология помогает открывать и осваивать разнообразные минеральные ресурсы и защищать окружающую среду от загрязнения. Геология изучает минералы, горные породы, руды, окаменевшие органические остатки, а также их изменения во времени. При этом она исходит из предположения, что закономерности, управляющие происходящими ныне изменениями, действовали и в прошлом. Таким образом, геология основана на принципе актуализма. Этот принцип принят для атмосферы, гидросферы, геосферы и биосферы. Главные процессы, с которыми связаны изменения, – это разрушения горных пород и отложение осадков, магматическая деятельность, метаморфизм и тектонические движения (включая процессы, описываемые тектоникой плит).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аллисон А., Палмер Д. Геология. М.: Мир, 1984.
2. Бакулин П.И. Курс общей астрономии. М.: Наука, 1995.
3. Бондарев В.П. Геология. М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2002.
4. Милютин А.Г. Геология. М.: Высшая школа, 2004.
5. Монин А.С. Популярная история Земли. М.: Наука, 1980.
6. Орленок В.В. История океанизации Земли. Калининград: Янтарный сказ, 1998.
7. Анкудинов Л.А. Образование Земли и других тел Солнечной системы в новом представлении. М.: КомКнига, 2006.
8. Тихонов Н.А. Считаем звезды. Звездные гало спиральных галактик // Природа. 2006. № 6. Сетевая версия: <http://www.courier.com.ru/priroda/index.html>
9. Королев В.А.. Современные проблемы экологической геологии // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 4. С. 60 – 68.
10. Гнедин Ю.Н. Современная астрономия: новые направления и новые проблемы // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 8. С. 72-83.
11. Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания. М.: Культура и спорт, ЮНИТИ, 1997.
12. Концепции современного естествознания / Под ред. проф. В.Н.Лавриненко. М.: Культура и спорт: ЮНИТИ, 1997.
13. Липунов В.М. Искусственная Вселенная // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 6. С. 82-89.
14. Липунов В.М. Гравитационно-волновое небо // Соросовский образовательный журнал. 2000. № 4. С. 77-83.
15. Найдыш В.М. Концепции современного естествознания: Учеб. пособие. М.: Гардарики, 1999.
16. Струве О.И. Элементарная астрономия. М.: Наука, 1967.
17. Тейлер Р.Дж. Галактики: строение и эволюция. М.: Мир, 1981.

18. Хогинс С. От большого взрыва до черных дыр. М.: Мир, 1990.
19. Черепашук А.М. Черные дыры в двойных звездных системах // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 3. С. 87-93.
20. Чернин А.Д. Физика времени. М.: Наука (Гл. ред. физ.-мат. лит.), 1987.
21. Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1987.
22. Энциклопедический словарь по астрономии. М., 1994.
23. Материалы сайта www.ngeo.ru
24. Лейзер К. Создавая картину Вселенной. М. Мир. 1988.
25. Рис. М., Руффини Р., Уиллер Дж. Черные дыры, гравитационные волны и космология. М. Мир. 1977.
26. Назаретян А.П. Интеллект во Вселенной. М. Недра. 1990.
27. Хоровиц Н. Поиски жизни в солнечной системе. М. Мир. 1988.
28. Новиков И.Д. Эволюция Вселенной М. 1979.
29. Хокинг С. От Большого взрыва до черных дыр. Краткая история времени. М. Мир. 1990.
30. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М. 1976.
31. Тейлер Р.Дж. Происхождение химических элементов. М.: Мир, 1975.
32. Рыжов В.Н. Эволюция Вселенной и происхождение атомов. Саратов: МВУИП "Сигма-плюс", 1998.
33. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М. 1975.
34. Вейнберг С. Гравитация и космология. пер. с англ. М. 1975.
35. Вейнберг С. Первые три минуты. пер. с англ. М. 1981.
36. Пиблс Г. Г. Физическая космология. пер. с англ. М. 1975.
37. Происхождение и эволюция галактик и звезд. Под ред. С. Б. Пикельнера. М. 1976.
38. Звезды и звездные системы. М. 1981.

39. *Пиблс Ф. Дж. Э.* Структура Вселенной в больших масштабах. пер. с англ. М. 1983.
40. *Силк Дж.* Большой взрыв. М. Мир. 1982.
41. *Долгов А.Д., Зельдович Я.Б.* Вещество и антивещество во Вселенной // *Природа*. 1982. No 8. С. 33 - 45.
42. *Зельдович Я.Б.* Современная космология // *Природа*. 1983. No 9. С. 11 - 24.
43. *Линде А.Д.* Физика элементарных частиц и инфляционная космология. М. Наука. 1990.
44. *Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В.* Космология ранней Вселенной. М. Изд-во МГУ, 1988.
45. *С. В. Житомирский.* «Античная астрономия и орфизм». М. Янус-К, 2001.
46. *А. И. Еремеева, Ф.А. Цицин.* «История астрономии». М. Изд-во МГУ. 1989.
47. *Г. М. Идлис.* «Революции в астрономии физике и космологии». М. Наука. 1985.
48. *И. Д. Рожанский.* «История естествознания в эпоху эллинизма и Римской империи». М. Наука. 1988.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1.

Основные характеристики Солнца и планет

	Расстояние (а.е.)	Радиус (Земля = 1)	Масса (Земля = 1)	Период обращения (Земля = 1)	Количество спутников	Наклон плоскости орбиты	Эксцентриситет	Наклон оси вращения	Плотность
Солнце	0,00	109	332,80	25 – 36	9	–	–	–	1,410
Меркурий	0,39	0,38	0,05	58,8	0	7	0,2056	0,1 ⁰	5,43
Венера	0,72	0,95	0,89	24,4	0	3,394	0,0068	177,4 ⁰	5,25
Земля	1,00	1,00	1,00	1,00	1	0,000	0,0167	23,45 ⁰	5,52
Марс	1,50	0,53	0,11	1,029	2	1,850	0,0934	25,19 ⁰	3,95
Юпитер	5,20	11,00	318	0,411	16	1,308	0,0483	3,12 ⁰	1,33
Сатурн	9,50	9,00	95	0,428	18	2,488	0,0560	26,73 ⁰	0,69
Уран	19,20	4,00	17	0,748	15	0,774	0,0461	97,86 ⁰	1,29
Нептун	30,10	4,00	17	0,802	8	1,774	0,0097	29,56 ⁰	1,64
Плутон	39,50	0,18	0,002	0,267	1	17,15	0,2482	119,6 ⁰	2,03

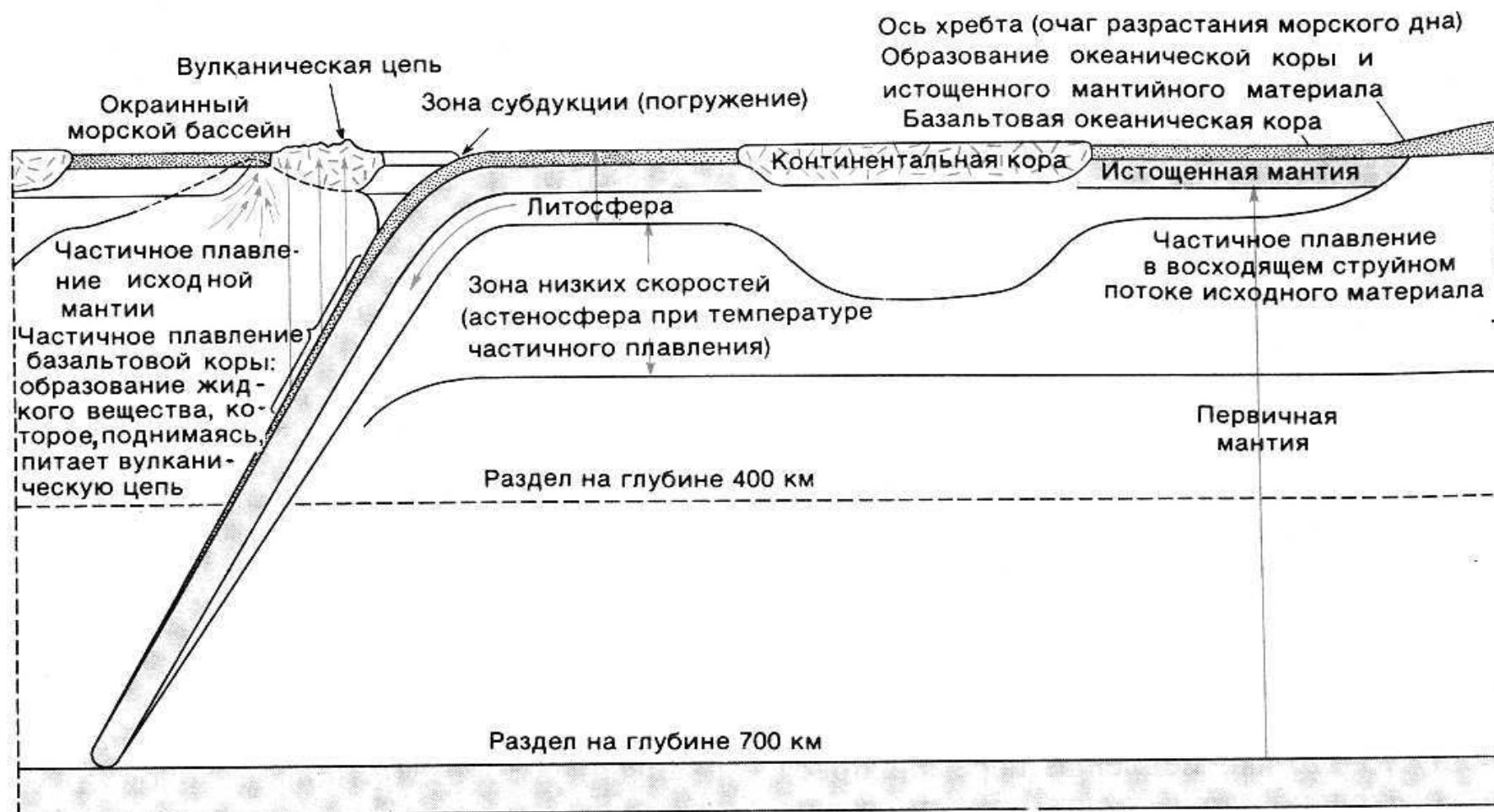


Рис.1. Строение земной коры и верхней мантии.



Рис.2. Формирование земной коры.

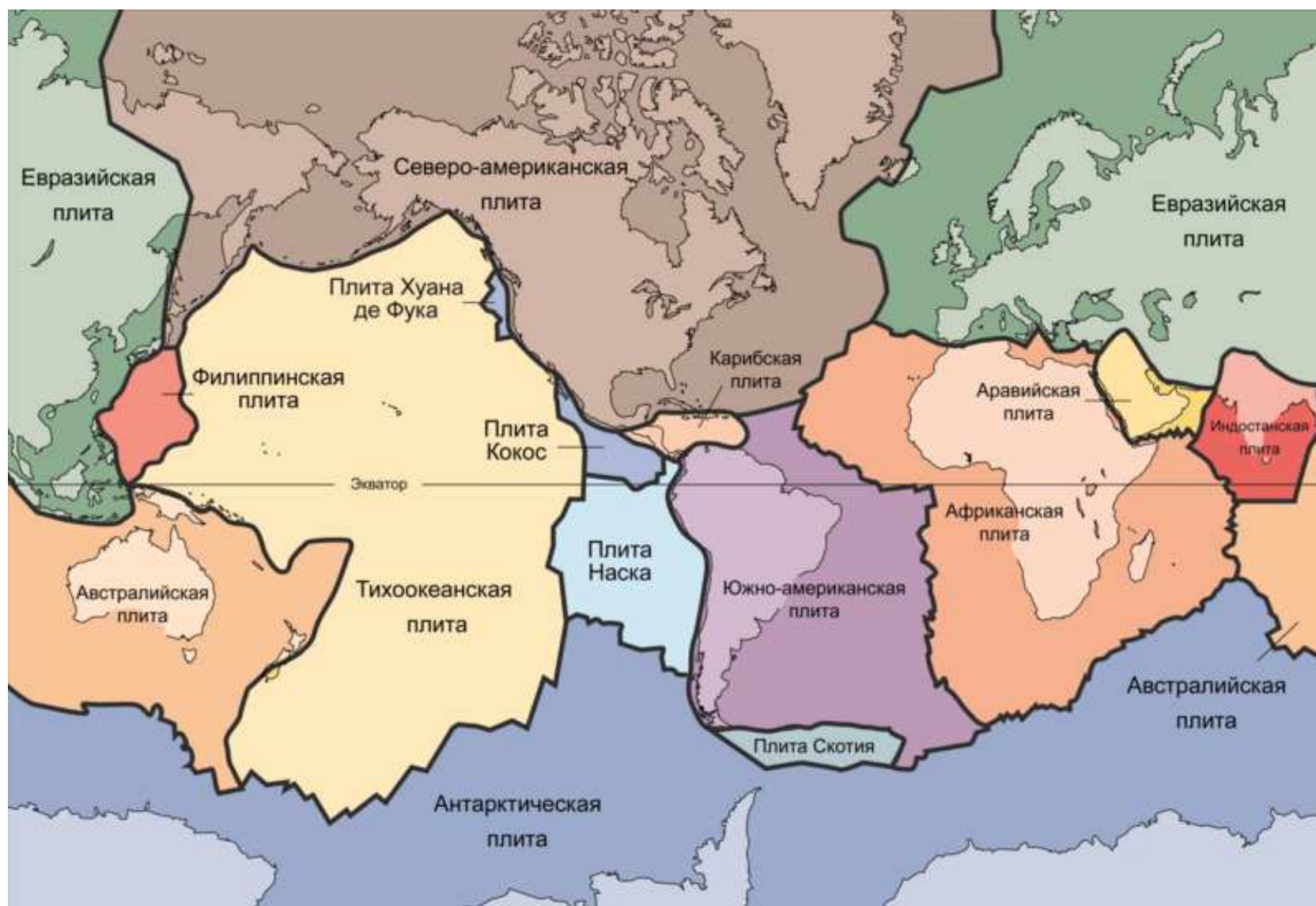


Рис.3. Схема расположения литосферных плит

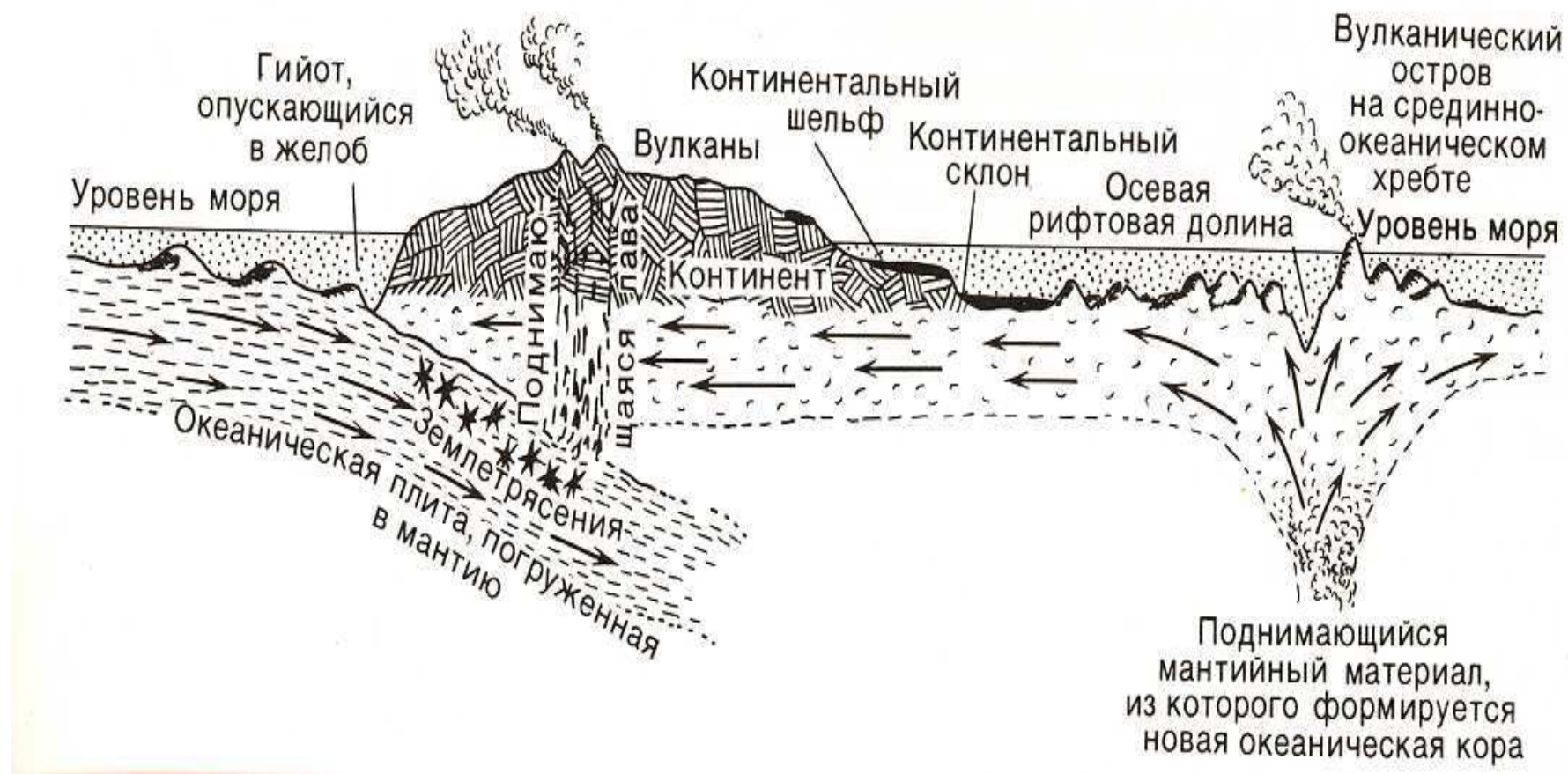


Рис.4. Спрединг океанического дна (по Хессу).

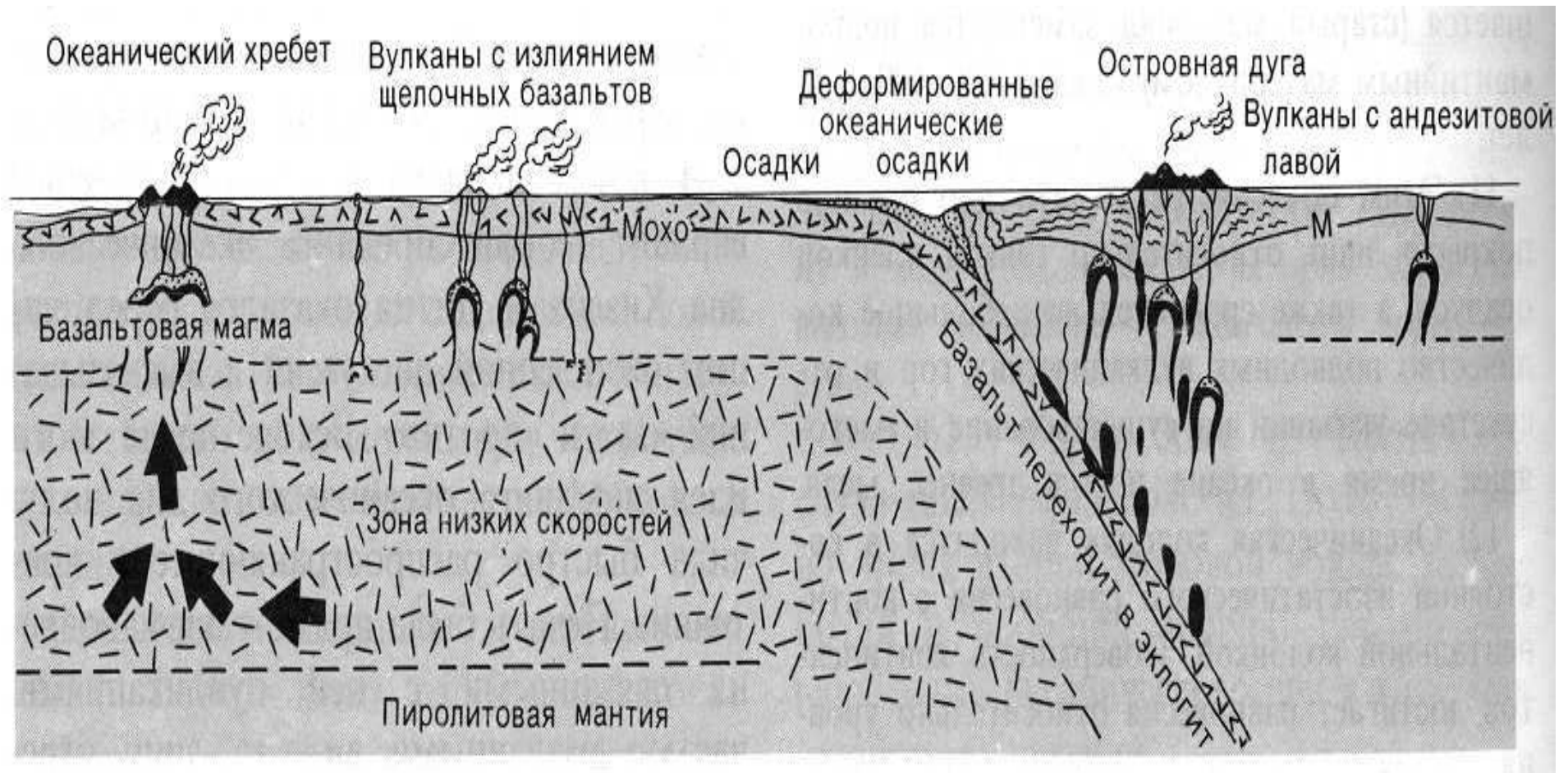


Рис.5. Срединно-океанический хребет и зона субдукции.



Рис.6. Гидрологический цикл.

Охотникова Галина Генриховна,

доцент кафедры химии и естествознания АмГУ, канд. техн. наук

Родина Татьяна Андреевна,

доцент кафедры химии и естествознания АмГУ, канд. хим. наук

Концепции современного естествознания. Часть III. Концепции биологии.

Учебное пособие