

М. А. РОМАНОВСКАЯ, Г. В. БРЯНЦЕВА, А. И. ГУЩИН

ГЕОЛОГИЯ

Под редакцией профессора
Н. В. Короновского

*Учебник
для студентов учреждений
высшего педагогического профессионального
образования, обучающихся по направлению подготовки
«Педагогическое образование» профиль «География»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 55(075.8)
ББК 26.3я73
Р695

Рецензенты:

проф. *А. М. Никишин* (зав. кафедрой региональной геологии и истории Земли Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова);
проф. *Е. П. Дубинин* (зав. отделом Музея землеведения Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова)

Романовская М. А.

Р695 Геология : учебник для студ. учреждений высш. пед. проф. образования / М. А. Романовская, Г. В. Брянцева, А. И. Гуцин; под ред. Н. В. Короновского. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 400 с. — (Сер. Бакалавриат).
ISBN 978-5-7695-8158-8

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки «Педагогическое образование» профиль «География» (квалификация «бакалавр»). В учебнике отражены последние достижения мировой геологической науки и практики в изучении строения Земли, в понимании современных и древних геодинамических процессов, происходящих как на ее поверхности, так и в недрах.

Для студентов учреждений высшего педагогического профессионального образования.

УДК 55(075.8)
ББК 26.3я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

ISBN 978-5-7695-8158-8

© Романовская М. А., Брянцева Г. В., Гуцин А. И., 2013
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

В учебнике учтены новейшие материалы и отражены последние достижения мировой геологической науки и практики в изучении строения Земли, понимании современных и древних геодинамических процессов, происходящих как на ее поверхности, так и в ее недрах.

Учебник состоит из трех частей. В первой части рассматриваются современные космологические представления о строении и происхождении Вселенной, Солнечной системы, Земли как планеты, ее месте во Вселенной. Главное внимание обращено на форму, размеры, строение Земли, вещественный состав и физическую характеристику ее оболочек. Обсуждаются методы определения относительного и абсолютного возраста горных пород и их результаты, дается краткая характеристика геохронологических подразделений.

Вторая часть посвящена процессам, идущим на поверхности земной коры, — процессам внешней динамики (экзогенным) и их роли в развитии земной коры и формировании рельефа Земли: выветривания, деятельности ветра, текучих поверхностных вод, подземных вод, морей и океанов, озер, болот, ледников, карста и суффозии, гравитационных и криогенных процессов.

В третьей части наибольшее внимание уделено процессам, обусловленным внутренней энергией Земли, — процессам внутренней динамики (эндогенным): интрузивному магматизму и вулканизму, метаморфизму, тектоническим процессам. Кратко изложены общие сведения о полезных ископаемых, современных тектонических концепциях, раскрывающих возможные причины движений и деформаций земной коры, главных структурных элементах литосферы Земли. Приведены краткие сведения о геологическом строении, тектонике и полезных ископаемых России.

Учебник предназначен для студентов географических специальностей, которые находятся в самом начале знакомства с геологией. Учитывая это, авторы стремились объяснить даже самые сложные представления современной геологии в наиболее доступной форме, по возможности избегая слишком частого употребления узкоспециализированных терминов. При этом авторы пытались сохранить полноту и научный характер изложения материала. Предлагаемый учебник может быть полезен для всех студентов естественных специальностей, в программу обучения которых входит изучение общей геологии.

Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой динамической геологии геологического факультета МГУ профессору Н. В. Короновскому за консультации и помощь на всех этапах подготовки учебника. Авторы признательны профессору Е. П. Дубинину и профессору А. М. Никишину за ряд ценных замечаний, сделанных в ходе рецензирования учебника.

В связи со сложностью составления данного учебника, охватывающего огромный объем современных геологических знаний, авторы понимают, что предлагаемый учебник может вызвать ряд справедливых замечаний и пожеланий по его совершенствованию. Все конструктивные замечания будут приняты с благодарностью по адресу: 119234, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ им. М. В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии.

ЧАСТЬ I

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ГЕОЛОГИИ

Геология — одна из важнейших естественных наук о Земле, основным объектом изучения которой является верхняя твердая оболочка.

Для познания закономерностей эволюции Земли очень важно разобраться в основных понятиях и определениях, используемых в данной науке и отражающих современный научный уровень.

Основная цель геологии заключается в открытии закономерностей ее развития, условий и факторов, способствовавших ему, изучении современных функций геологии, а также в предвидении тенденций будущего развития, а главной задачей является раскрытие механизма становления новых знаний о строении и истории развития Земли.

Изучение геологического прошлого Земли, истории ее возникновения, закономерностей развития невозможно без общих представлений о зарождении и строении не только нашей планеты, но и всей Солнечной системы, Галактики Млечного Пути и Вселенной. Земля представляет собой сложную динамическую систему, сформированную под влиянием как экзогенных, так и эндогенных факторов, а современные геологические процессы происходят на наших глазах и масштабы их проявления впечатляющие.

Одной из основных проблем естествознания, в одинаковой степени касающейся интересов геологии, биологии и других смежных наук, является проблема происхождения жизни на Земле. Геологам надлежит ответить на два главных вопроса: когда появилась жизнь на Земле и каковы были условия на ранней стадии развития нашей планеты?

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЗЕМЛИ И ЕЕ МЕСТО ВО ВСЕЛЕННОЙ

1.1. Возникновение Вселенной и Галактики Млечного Пути

Вселенная — это весь существующий материальный мир, безграничный во времени и пространстве и бесконечно разнообразный по формам материи. Вопрос о происхождении Земли и самой Вселенной с давних времен интересовал человечество. По современным представлениям, Вселенная возникла около 13,7 млрд лет назад в результате *Большого Взрыва* из *сингулярного* (от англ. *singl* — единственный) состояния с бесконечно большой температурой и плотностью и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается. А.А. Фридман (1922) предсказал расширение Вселенной и предположил возникновение ее в результате взрыва. По мнению Г.А. Гамова (1948), первичное вещество Вселенной было не только очень плотным, но и очень горячим. Электромагнитное излучение первичного вещества не должно исчезнуть, т. е. в космосе должно существовать фоновое постоянное излучение.

Согласно теории Большого Взрыва, в первую секунду возникли электроны, нейтроны, протоны и лучевая энергия, температура Вселенной того периода оценивается в 100 млрд градусов. Затем в течение первых 4 минут при снижении температуры сформировались атомы гелия и дейтерия, и только уже потом при температуре несколько тысяч градусов в течение примерно 1 млн лет шло формирование всех других атомов. В течение следующего миллиарда лет происходило образование протогалактик (от греч. *protos* — первый), т. е. сгустков космической материи, на месте которых в последующие 5 млн лет формировались первичные галактики. Современная средняя температура Вселенной оценивается в 270 °С, т. е. приближается к абсолютному нулю по Кельвину (−273 °С). С момента Большого Взрыва до настоящего времени происходит непрерывное расширение Вселенной и уменьшение ее средней плотности, соответствующей на сегодня примерно 1 г вещества, распыленному в кубе с ребром, равным 40 тыс. км. Расширение Вселенной выражается в разбегании галактик друг от друга во всех направлениях и от центра Вселенной.

Впоследствии были получены фактические подтверждения теории Большого Взрыва. В 1929 г. американский астроном Э. Хаббл под-

тверждает общее расширение Вселенной и разбегание галактик на основании так называемого *красного смещения*. Согласно эффекту Доплера, если объект удаляется от наблюдателя, то спектр света от него смещается в красную сторону спектра, если приближается — в фиолетовую. В 1964 г. американские астрономы А. Пензиас и Р. Вильсон обнаружили фоновое космическое радиоизлучение с длиной волны 7,35 см. Интенсивность этого излучения постоянна и однородна и соответствует излучению абсолютного черного тела с температурой в 3°К. Это радиоизлучение считается реликтовым излучением Вселенной, пребывающей некогда в сингулярном состоянии. Состав современной Вселенной достаточно однороден и соответствует по массе $\frac{3}{4}$ гелия и $\frac{1}{4}$ водорода, что может свидетельствовать о едином первичном источнике ее вещества.

Относительно будущего нашей Вселенной существуют две основные космологические гипотезы: 1) в результате продолжающегося расширения и остывания Вселенной она рассеется и погибнет как единое целое; 2) расширение будет продолжаться до определенного момента, а затем сменится сжатием и Вселенная снова вернется в состояние высокой плотности вещества.

Часть Вселенной, доступная современным астрономическим методам наблюдения, называется *Метагалактикой* и содержит несколько миллиардов галактик. Видимый край Вселенной, или край Метагалактики, находится от нас на расстоянии приблизительно около 300 млн световых лет. Для измерения «космических» расстояний используют такие единицы, как *астрономическая единица* (а. е.), равная среднему радиусу орбиты Земли, или расстоянию от Земли до Солнца, — 149,6 млн км; *световой год* — расстояние, проходимое светом в вакууме за год, приблизительно равное 63 241,1 а. е., или 9 400 млрд км; парсек (пк) $\approx 206\,265$ а. е. $\approx 3,258$ св. года. Например, диаметр нашей Галактики ≈ 30 кпк $\approx 100\,000$ св. лет.

Галактики (от греч. *galaktikos* — молочный, млечный) — это гигантские, до сотен миллиардов звезд, звездные системы. Они подразделяются по своей форме на *спиральные*, *эллиптические* и *неправильные*. Подавляющее большинство Галактик спиральные. Расстояния между галактиками постоянно увеличиваются из-за непрерывного расширения Вселенной. Наша *Галактика Млечного Пути* (ГМП) содержит не менее 200 млрд звезд и имеет спиральную форму (рис. 1.1, А). Ближайшими к нам являются неправильная галактика Магеллановы Облака и спиральная туманность Андромеды. Галактики образуют группы галактик и сверхскопления галактик.

Галактика Млечного Пути, кроме 200 млрд звезд, общей массой около 10^{11} масс Солнца, содержит межзвездное вещество — газ и пыль, космические лучи, магнитные поля и различное излучение. Большинство звезд занимает линзовидную уплощенную по форме центральную часть Галактики, тяготея к плоскости симметрии (галак-

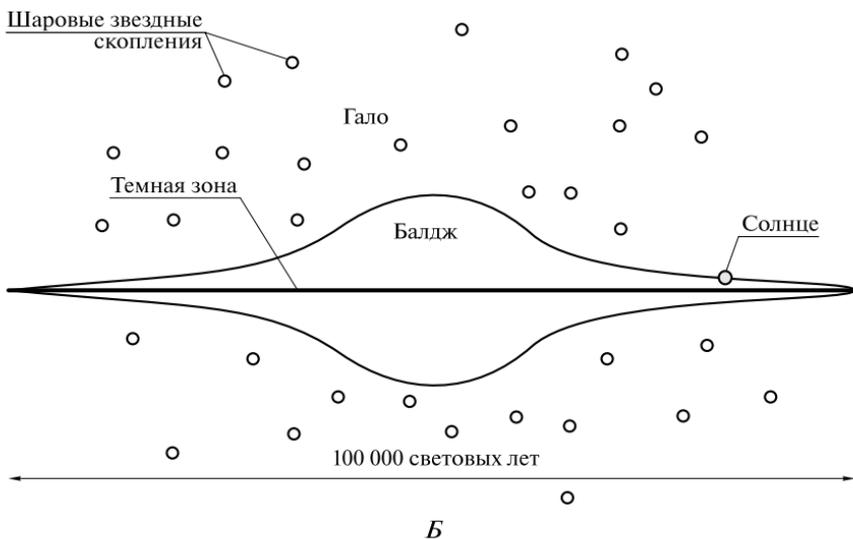
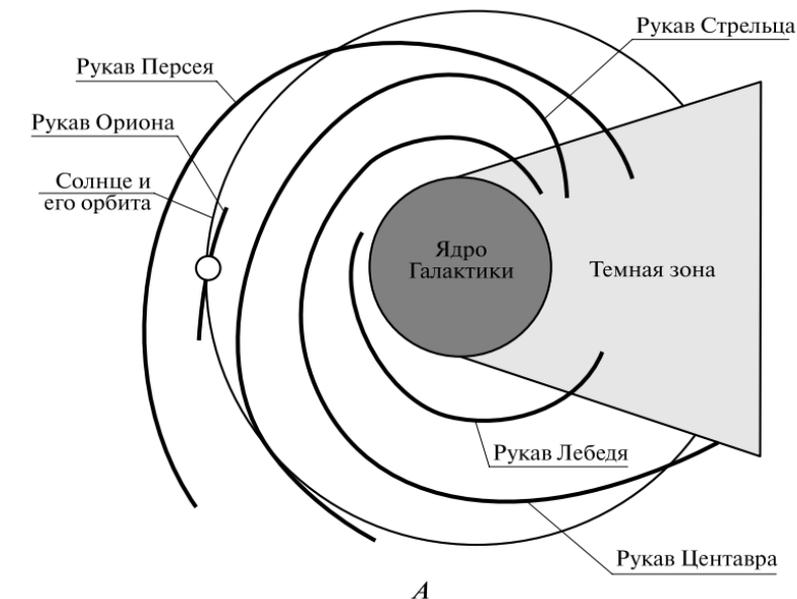


Рис. 1.1. Строение Галактики Млечного Пути (А) и положение в ней Солнечной системы (Б)

тической плоскости) и к центру Галактики. Меньшая часть звезд занимает почти сферический объем, так называемый *балдж* (от англ. *bulge* — вздутие), концентрируясь вокруг центра — ядра

Галактики (рис. 1.1, Б). Предполагается, что в самом центре Галактики находится сверхмассивная черная дыра массой около 3,7 млн масс Солнца (UCLA Galactic Center Group, 2011). ГМП вращается вокруг своего центра. Для наблюдателя, находящегося на Земле, центр Галактики расположен в направлении созвездия Стрельца. Звезды, концентрирующиеся вокруг галактической плоскости, сливаются в пересекающую земной небосвод светлую туманную полосу, которая получила у греков название «Млечного Пути».

1.2. Происхождение Солнечной системы

Наша Солнечная система с центральной звездой по имени Солнце локализуется в галактическом рукаве Ориона вблизи галактической плоскости на расстоянии около $\frac{3}{5}$ ее радиуса от центра ГМП. Ближайшая к нам звезда, не считая Солнца, это звезда альфа Центавра, расстояние до нее составляет 4 световых года. Вопрос происхождения Солнечной системы с глубокой древности и до сих пор является одной из важнейших проблем естествознания и мироздания. Наука, изучающая происхождение и формирование всех небесных тел и их скоплений, называется *космогония* (от греч. *kósmos* — мир, Вселенная, и *gone, goneia* — рождение).

В настоящее время существует следующее представление об образовании Солнечной системы. Приблизительно 5 млн лет назад вещество, впоследствии ставшее Солнечной системой, представляло собой огромное облако космической пыли и газа. Такие туманности, называемые *небулами*, были открыты еще в XVIII в. В. Гершелем — выдающимся английским астрономом. Звезды типа желтых карликов, как наше Солнце, образуются при сжатии газопылевых облаков. Слабые силы притяжения между частицами пыли и газа вызвали формирование туманности почти сферической формы, в центре которой началось сгущение материи (протосолнце), ставшее потом Солнцем. Считается, что толчок к сжатию и последующему вращению туманности мог дать взрыв близкой сверхновой звезды; по другой версии — газопылевое облако начало сжиматься и вращаться вследствие общего вращения вещества вокруг центра Галактики Млечного Пути (рис. 1.2). В результате действия центробежных сил туманность уплощалась и от нее отделялись кольца, из которых потом образовывались протопланеты (зародыши современных планет). Эту космогоническую гипотезу образования Солнечной системы сформулировал и опубликовал в 1755 г. немецкий философ И. Кант, а в 1796 г. французский математик П. С. Лаплас ее доработал и математически обосновал. Она стала называться гипотезой Канта—Лапласа.

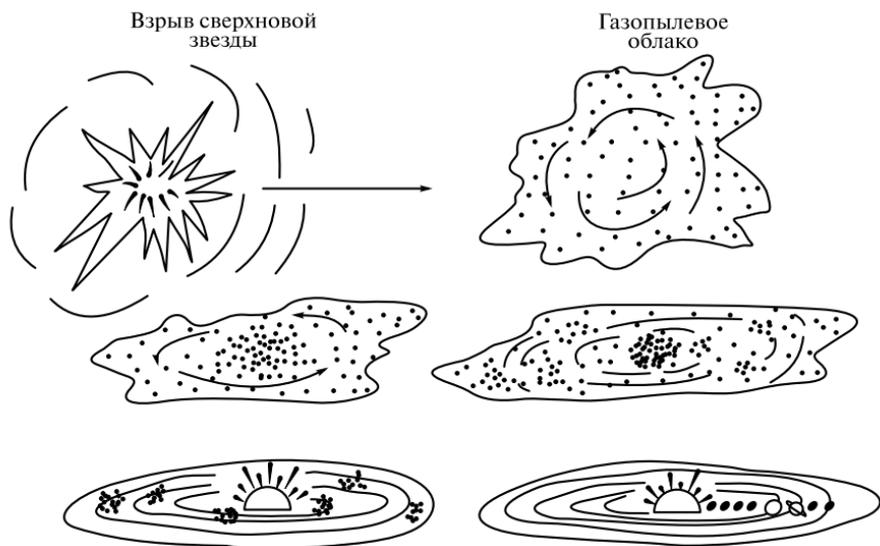


Рис. 1.2. Образование Солнечной системы

Астрономические исследования XX в. подтвердили, что причиной вращения и *аккреции* (от лат. *accretion* — приращение, увеличение), сгущения космического вещества действительно мог быть взрыв сверхновой звезды. В XX в. подобные взрывы звезд уже неоднократно наблюдались астрономами и даже были сфотографированы. Взрыв сверхновой звезды, вызвавший сжатие туманности будущей Солнечной системы, произошел, по-видимому, 4,8—4,7 млрд лет назад. Большая часть массы туманности (около 90 %) сконцентрировалась в центре первичной небулы, формируя *протосолнце*. Оставшаяся часть вещества продолжала уплощаться и вращаться вокруг него. Силы притяжения конденсировали вещество в отдельные сгустки — *планетезимали* — размером от нескольких метров до километров. В результате их слипания образовались *протопланеты*, ставшие затем современными планетами. Итак, приблизительно 4,6—4,5 млрд лет назад возникла наша Солнечная система.

1.3. Строение Солнечной системы

Солнечная система состоит из центрального светила Солнца, восьми больших планет, вращающихся вокруг него и вокруг своей оси, их спутников, множества карликовых и малых планет — астероидов (около 50 000), комет и межпланетной пыли (рис. 1.3). Область

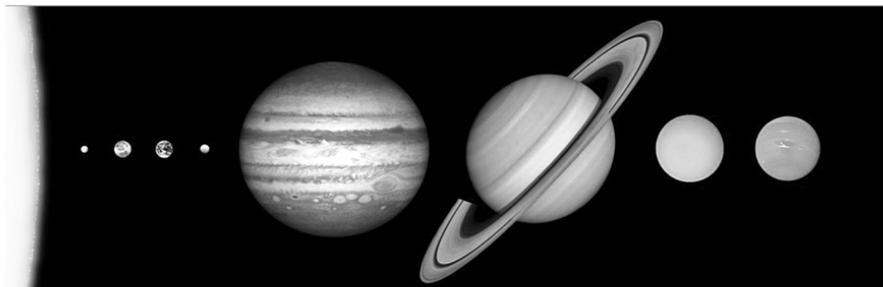


Рис. 1.3. Планеты Солнечной системы

Солнечной системы за пределами орбиты последней планеты, Нептуна, заселена так называемыми *транснептуновыми объектами*, сосредоточенными в *поясе Койпера*, *Рассеянном диске* и *облаке Оорта* (рис. 1.4). Границей Солнечной системы считается внешний край облака Оорта, располагающийся настолько далеко, что если Солнце представить шаром с диаметром в 10 см, то край облака будет находиться в 1,5 тыс. км от этого шара.

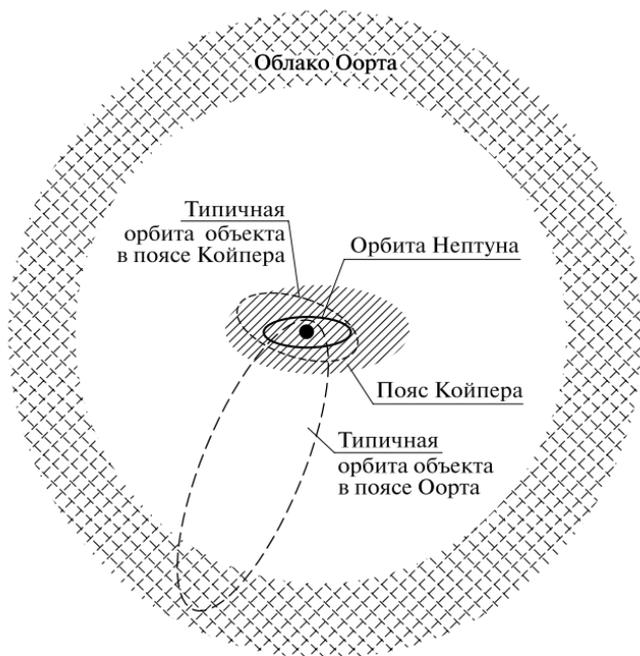


Рис. 1.4. Строение Солнечной системы (по <http://artefact2007.wordpress.com>)

1.3.1. Строение Солнца и его возможное будущее

Солнце — единственная звезда Солнечной системы, вокруг которой обращаются другие объекты этой системы. Это раскаленный плазменный шар, относящийся по звездной классификации к типичным желтым карликам класса G2. По сравнению с большинством звезд в нашей Галактике Солнце довольно большая и яркая звезда. Из звезд, принадлежащих 50 самым близким к нам звездным системам в пределах 17 св. лет, оно является четвертой по яркости звездой. Солнце находится на расстоянии около 26 000 световых лет от центра Галактики Млечного Пути и вращается вокруг него, делая один оборот более чем за 225—250 млн лет. Его орбитальная скорость равна 217 км/с. Масса Солнца составляет 99,866 % суммарной массы всей Солнечной системы, а плотность — $1,4 \text{ г/см}^3$. Солнце медленно вращается вокруг своей оси с запада на восток. Оно состоит из водорода (~73 % общей массы), гелия (~25 % массы) и других, более тяжелых, химических элементов: железа, никеля, кислорода, азота, кремния, серы, магния, углерода, неона, кальция, хрома и др. (всего 67 элементов).

Источником солнечной энергии являются термоядерные реакции превращения водорода в гелий, происходящие в центральной части звезды. Солнечная лучистая энергия достигает Земли в виде электромагнитного излучения: 1) рентгеновского, 2) ультрафиолетового, 3) видимого (свет), 4) теплового, 5) радиоволнового. Она играет очень большую роль не только в развитии жизни на Земле, но и в возникновении и протекании многих геологических процессов.

Солнце обладает сильным магнитным полем, которое меняется во времени, особенно ярко эти изменения проявляются во время максимума солнечной активности, приблизительно каждые 11 лет. Вариации магнитного поля Солнца вызывают разнообразные эффекты, такие, как солнечные пятна, солнечные вспышки, вариации солнечного ветра и т.д. *Солнечный ветер* представляет собой поток ионизированных частиц (в основном протонов, электронов и фотонов) и полей, в частности магнитных, и распространяется с постепенным уменьшением скорости и плотности до границ гелиосферы. *Гелиосфера* (от имени древнегреческого бога Солнца *Гелиоса*) представляет собой область околосолнечного пространства, в которой плазма солнечного ветра движется относительно Солнца со сверхзвуковой скоростью 1 200—1 300 км/с. Первые десять млрд км скорость ветра составляет более 1 тыс. км/с, плотность — несколько десятков частиц на 1 см^3 , на уровне орбиты Земли скорость составляет около 400 км/с. По мере того как ветер сталкивается с межзвездной средой, происходит его торможение и смешение с ней. Граница, вдоль которой уравнивается давление солнечного ветра и межзвездной среды, носит название *гелиопаузы*. По современным пред-

ставлениям, основанным на измерениях космического зонда «Вояджер», гелиосфера простирается на 100 — 150 а.е. Многие природные явления на Земле связаны с возмущениями в солнечном ветре, в том числе геомагнитные бури и полярные сияния.

В строении Солнца выделяют солнечную атмосферу, состоящую из солнечной короны и хромосферы, фотосферу, зону конвекции, зону лучистого переноса (зону радиации) и ядро (рис. 1.5). *Солнечная атмосфера* (хромосфера + солнечная корона) очень динамична. В ней наблюдаются *вспышки* и *протуберанцы* — выбросы солнечного вещества на расстояние в несколько сотен тыс. км. Происходит постоянное истечение плазмы короны, формирующее солнечный ветер. *Солнечная корона* — самая внешняя оболочка Солнца. Несмотря на ее очень высокую температуру, от 600 тыс. до 2 млн°К, она видна невооруженным глазом только во время полного солнечного затмения, так как плотность вещества в короне мала, а потому невелика и ее яркость. Для короны характерно постоянное интенсивное излучение в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. *Хромосфера* (от др.-греч. χρομα — цвет, σφαίρα — шар, сфера) — внешняя оболочка Солнца толщиной около 10 000 км, окружающая фотосферу. Верхняя граница хромосферы не имеет выраженной гладкой по-

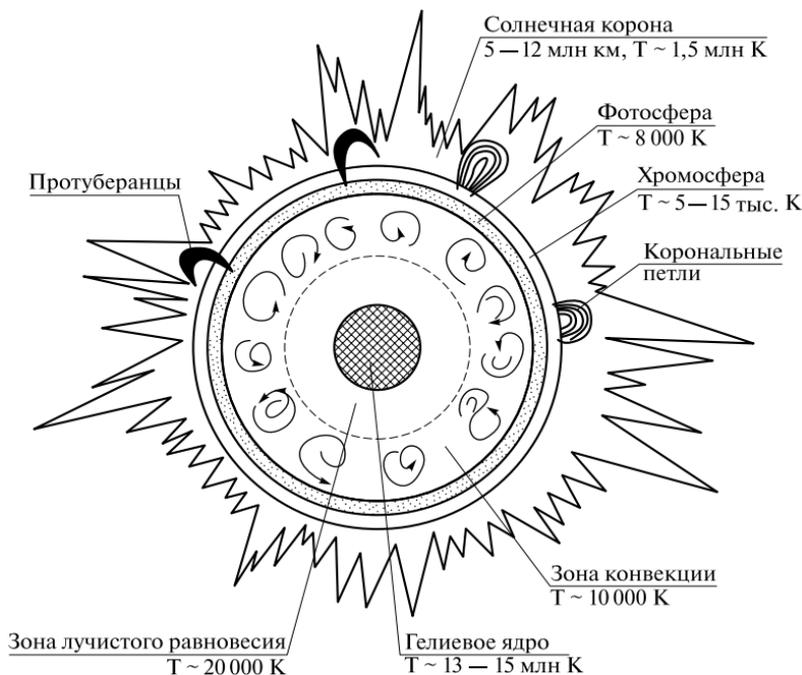


Рис. 1.5. Внутреннее строение Солнца

верхности, из нее постоянно происходят выбросы плазмы, называемые *стикулами*. Плотность хромосферы невелика, а температура ее увеличивается с высотой от 4 до 15 тыс. °К. Она, так же как и корона, становится хорошо видимой только при полном солнечном затмении или с помощью специальных оптических фильтров. *Фотосфера* (от др.-греч. *photo* — свет и *σφαίρα* — шар, сфера) — слой, который излучает свет, он достигает толщины ~320 км и образует видимую поверхность Солнца. Из фотосферы исходит основная часть оптического (видимого) и теплового излучения Солнца. Температура в фотосфере достигает в среднем 6 000 °К. Фотосфера образует видимую поверхность Солнца, от которой определяются его размеры, расстояние от поверхности и т. д. Она имеет гранулированную структуру за счет конвективных ячеек: светлых — горячих с температурой до 8 000 °К и темных — холодных. Области с температурой, пониженной до 1 500 °К, формируют *солнечные пятна*. Под поверхностью Солнца устанавливается зона вихревого перемешивания плазмы, и перенос энергии от центра к поверхности совершается преимущественно движениями самого вещества, т. е. *конвекцией* (от лат. *convectio* — принесение, доставка) — переносом теплоты потоками вещества. Этот слой Солнца, мощностью примерно 200 000 км, называется *зоной конвекции*, именно в ней зарождаются разнообразные движения солнечного вещества и магнитные поля. Ниже зоны конвекции над ядром, на расстоянии около 0,2 — 0,7 радиуса Солнца от его центра, находится *зона лучистого переноса*, или *зона радиации*, энергия переносится с помощью переизлучения фотонов. Это происходит следующим образом: фотон, приходящий из солнечного ядра, поглощается частицей вещества (атомным ядром либо свободным протоном), после чего возбужденная частица излучает новый квант света, т. е. происходит переизлучение фотона. *Солнечное ядро* — центральная часть Солнца с радиусом примерно 150 000 км, в которой протекают термоядерные реакции. Плотность вещества в ядре составляет примерно 150 000 кг/м³, а температура в центре ядра — более 14 млн °К. В ядре скорость вращения Солнца вокруг своей оси значительно выше, чем на поверхности.

В результате термоядерных реакций каждую секунду 4,26 млн т вещества превращаются в излучение, однако эта величина ничтожна по сравнению с массой Солнца, составляющей $2 \cdot 10^{27}$ т. Считается, что вещества Солнца хватит еще приблизительно на 5 млрд лет, а затем оно сильно расширится и превратится в звезду, относящуюся к красным гигантам. Однако существованию Земли и жизни на ней угрожает не похолодание в связи с тем, что «горючее» Солнца закончится, а как раз наоборот — расширяющийся шар Солнца достигнет орбиты Земли, и она сторит в его тепловом поле.

Считается, что Солнце образовалось на сравнительно поздней стадии развития Вселенной, так как в его составе кроме водорода и гелия устанавливаются более тяжелые элементы, сформированные в

ядрах звезд первого поколения. Предполагается, что именно наличие в первичной солнечной туманности тяжелых элементов и обусловило образование вокруг Солнца планетной системы, благодаря аккреции этих элементов в протопланетное вещество.

1.3.2. Планеты Солнечной системы

Планеты (от греч. *planets* — блуждающий) — это наиболее массивные, после Солнца тела, движущиеся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца и светящиеся отраженным светом. Среди планет выделяются внутренние планеты — Меркурий, Венера, Земля и Марс и внешние планеты — Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. Плутон, ранее считавшийся девятой планетой Солнечной системы, в 2006 г. был переведен в разряд карликовых планет. Внутренние и внешние планеты разделены поясом астероидов, находящимся между орбитами Марса и Юпитера. Планеты, как и большинство тел Солнечной системы, за исключением Венеры и некоторых спутников планет-гигантов, вращаются с запада на восток, т. е. против часовой стрелки. Расстояние от Солнца до самой внешней планеты Нептун составляет примерно 30 а. е.

Внутренние планеты, называемые также *планетами земной группы*, Меркурий, Венера, Земля и Марс, представляют собой каменные тела, близкие по своим размерам и химическому составу, их плотность колеблется от 3,93 до 5,52 г/см³. Четыре внутренние планеты состоят преимущественно из тяжелых элементов, имеют малое количество спутников: Луна у Земли, Фобос и Деймос у Марса. В значительной степени они состоят из минералов силикатов, которые формируют их мантию и кору. Высокая плотность внутренних планет, по-видимому, свидетельствует о наличии у них железных ядер. У трех внутренних планет — Венеры, Земли и Марса — имеется атмосфера. Поверхность всех планет несет следы метеоритной бомбардировки, имевшей место 3,9 млрд лет назад. В рельефе всех планет устанавливаются пониженные (моря) и повышенные (континенты) участки, свидетельства тектонических процессов — трещины, рифтовые впадины и др., и признаки потухшего вулканизма. Внутренние планеты характеризуются сравнительно небольшими диаметрами, причем Венера и Земля по своим размерам очень близки, Марс в два раза, а Меркурий почти в 3 раза меньше Земли (табл. 1.1). Большая часть газов этими планетами потеряна, вероятно, из-за близости к Солнцу. Считается, что солнечный ветер сдул газовые оболочки этих планет. Меркурий практически не имеет атмосферы, а атмосферы Венеры, Земли и Марса составляют лишь очень малую часть относительно масс этих планет. Среди внутренних планет только Земля обладает существенным магнитным полем. Образование планет длилось относительно короткое время, оцениваемое менее чем в 100 млн

Таблица 1.1. Сравнительная характеристика планет Солнечной системы (Из кн.: Очерки сравнительной планетологии, 1981; Энциклопедия..., 2004)

Планета	Диаметр относительно Земли	Масса относительно Земли	Орбитальный радиус	Период обращения, земных лет	Период вращения (сутки, относительно земных)	Плотность, кг/м ³	Спутники
Меркурий	0,382	0,06	0,38	0,241	58,6	5 427	Нет
Венера	0,949	0,82	0,72	0,615	243	5 243	Нет
Земля	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5 515	1
Марс	0,53	0,11	1,52	1,88	1,03	3 933	2
Юпитер	11,2	318	5,20	11,86	0,414	1 326	65
Сатурн	9,41	95	9,54	29,46	0,426	687	62
Уран	3,98	14,6	19,22	84,01	0,718	1 270	27
Нептун	3,81	17,2	30,06	164,79	0,671	1 638	13

лет. Из планет земной группы наиболее похожими на Землю являются Венера и Марс.

Земля — третья от Солнца планета Солнечной системы, обращающаяся вокруг Солнца по эллиптической орбите, близкой к окружности, со средней скоростью около 30 км/с. Период обращения вокруг Солнца составляет — 365,24 сут, период вращения вокруг своей оси — 23 ч 56 мин 4,1 с. Ось вращения отклонена от перпендикуляра к плоскости орбиты на угол 23° 27', что вызывает на нашей планете в течение земного года, т. е. времени обращения вокруг Солнца, смену сезонов. У Земли есть один естественный спутник — Луна. Земля имеет мощную атмосферу. Она обладает магнитным, гравитационным и тепловым полями.

Во внутреннем строении Земли выделяются три основные оболочки: *земная кора*, до глубины в среднем 33 км, *мантия*, до глубины 2 900 км и внутренняя часть — *ядро*. Земная кора и мантия, подразделяемая на *верхнюю* и *нижнюю*, состоят из твердого каменного (преимущественно силикатного) материала. Ядро имеет в основном железо-никелевый состав и состоит из двух частей — *внешнего* жидкого ядра, до глубины 5 200 км, и *внутреннего* твердого, составляющего центральную часть Земли. Подробнее внутреннее строение Земли, ее параметры, вещественный состав и физические поля рассмотрены в гл. 3.

Между внутренними и внешними планетами находится *пояс астероидов*, описанный далее.

Внешние планеты, или **планеты группы Юпитера**, — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун отличаются огромными размерами, в сотни и даже тысячи раз превышающие размеры внутренних планет, иногда их называют *планетами-гигантами*. Эти планеты содержат более 99 % массы планетного вещества. Все планеты внешней группы являются газовой-жидкими. В отличие от планет земной группы лишь ядра этих внешних планет предположительно каменные, а внешние оболочки состоят из водорода и гелия, с примесью метана и аммиака. Для внешних планет характерны быстрое осевое вращение и наличие сильного магнитного и радиационного полей. Эти планеты отличаются большим количеством спутников и наличием газовой-пылевых колец (см. табл. 1.1).

Почти все внешние планеты обладают мощной плотной водородно-гелиевой атмосферой со средней плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$, близкой к плотности Солнца. Считается, что планеты-гиганты были достаточно велики и удалены от Солнца для того, чтобы благодаря своей гравитации удержать легкие компоненты первичной небулы. И поэтому хотя они и имеют каменное ядро, но состоят, как и Солнце, главным образом из водорода, гелия и других легких небулярных компонентов.

Возможно, что газы внутренних планет были перенесены в более удаленные от Солнца холодные участки Солнечной системы, где они вошли в состав газовой-ледяных планет-гигантов. Под атмосферой Юпитера и Сатурна располагаются сферические оболочки из молекулярного жидкого и затем металлического водорода. У Урана и Нептуна под газовой оболочкой из водорода, гелия и метана предполагается оболочка, состоящая из льда этих же газов. Иногда Уран и Нептун называют ледяными гигантами. Уран выделяется среди всех планет тем, что ось его вращения практически лежит в плоскости его орбиты, т. е. его можно сравнить с катящимся по орбите мячом. Ядра внешних планет состоят предположительно из силикатов и льда.

Карликовые планеты представляют собой небесные тела, занимающие по своему статусу промежуточное положение между планетами и малыми телами Солнечной системы. К ним относятся тела, которые не являются спутниками и имеют достаточную массу для того, чтобы под действием сил гравитации поддерживать округлую форму, но они не способны очистить пространство вокруг себя. Категория этих планет выделена относительно недавно, в августе 2006 г. три планеты сразу получили статус карликовых: Плутон (радиус 1 147 км), Церера (радиус 471 км) и Эрида, открытая в 2005 г., ранее была известна под именем Ксена (радиус более 1 200 км).

По своему составу карликовые планеты больше похожи на планеты земной группы. Всего на сегодняшний день известно 45 тел, которые потенциально могут квалифицироваться как карликовые планеты.

1.3.3. Малые тела Солнечной системы

К малым телам Солнечной системы относятся спутники планет, астероиды, кометы и различные транснептуновые объекты.

Спутники планет представляют собой тела естественного происхождения, обращающиеся вокруг планет. Общее их количество составляет около 150. У планет внутренней группы только три спутника, которые являются каменными телами и в целом похожи на свои планеты. Планеты внешней группы насчитывают значительно большее количество спутников. Благодаря стремительно развивающейся в связи с освоением космоса астрономии, все новые и новые спутники планет гигантов открываются в последние годы. Наличие колец у этих планет раньше затрудняло наблюдение спутников, находящихся близко к кольцам или вообще внутри них. У Юпитера, например, сейчас насчитывается 65 спутников (если считать все тела диаметром от 2 км, вращающиеся вокруг планеты). Первые четыре спутника Юпитера были известны еще древним грекам, затем были изучены Галилеем и носят название Галилеевых спутников (в порядке убывания размеров): Ганимед, Каллисто, Ио, Европа. Ганимед по своим размерам сопоставим с Меркурием. У Сатурна насчитывается 62 спутника, причем в конце прошлого века их количество составляло всего 17. У Урана известно 27 спутников, у Нептуна — 13. На некоторых спутниках обнаружена атмосфера (спутник Сатурна Титан), на некоторых — современная активная вулканическая деятельность (спутник Юпитера Ио), на Тритоне — спутнике Нептуна — известны гейзеры жидкого азота. Форма спутников разнообразная, часто неправильная. По составу и строению спутники внешних планет ближе к планетам земной группы, чаще всего они обладают каменным составом, а основным отличием является широкое развитие в их строении льда.

Луна — это один из самых больших спутников Солнечной системы и единственный естественный спутник Земли, он находится на расстоянии 384 400 км от Земли и движется вокруг нее в направлении против часовой стрелки. Период обращения Луны вокруг Земли равен 27 сут 7 ч 43 мин, или около 27,3 земных суток (*звездный*, или *сидерический*, период).

Период вращения Луны вокруг своей оси совпадает с периодом обращения вокруг Земли, из-за чего Луна всегда повернута к Земле одной и той же стороной. По-видимому, такое положение обусловлено взаимодействующими гравитационными силами Луны и Земли. Масса Луны составляет $\frac{1}{81}$ массы Земли, средний радиус 1738 км, средняя плотность 3,33 г/см³, которая незначительно увеличивается с глубиной, т. е. в отличие от Земли в центре Луны нет большой концентрации масс. Сила тяжести в 6 раз меньше земной. Температура на ее поверхности весьма контрастна: от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ночью до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ днем. Луна светится отраженным солнечным светом. Каждые

24 ч 50 мин Луна вызывает на Земле приливы и отливы. В строении рельефа Луны выделяются моря и континенты, а внутренняя структура сопоставима с земной. В ее строении выделяются кора, мантия и ядро.

По поводу происхождения Луны существует несколько гипотез, из которых самыми разработанными являются следующие. 1. В конце XIX в. Дж. Дарвин выдвинул гипотезу, согласно которой Луна и Земля первоначально составляли одну общую расплавленную массу, скорость вращения которой увеличивалась по мере ее остывания и сжатия; в результате чего эта масса разорвалась на две части: большую — Землю и меньшую — Луну. 2. Гипотеза захвата, разработанная немцем К. Вейцзеккером, шведом Х. Альфвенем и американцем Г. Юри, предполагает, что Луна первоначально была малой планетой, которая при прохождении вблизи Земли под воздействием земного тяготения превратилась в спутник. 3. Гипотеза, разработанная в середине XX в. советским ученым О. Ю. Шмидтом, предполагает, что Луна и Земля образовались из единого скопления мелких частиц. Первой начала формироваться Земля, концентрируя в себе более тяжелые частицы, а затем из ее мощной атмосферы, обогащенной силикатами, сконденсировалось кольцо планетезималей, из которых и образовалась Луна. В настоящее время эта гипотеза является предпочтительной, так как хорошо согласуется с тем фактом, что плотность Луны меньше земной.

Астероиды (от греч. *asteroeidis* — звездоподобный), несмотря на свое название — больше похожи на планеты земной группы, иногда их называют малыми планетами, хотя в настоящее время этот термин считается устаревшим. Форма астероидов часто неправильная, напоминает картофелины, размер может колебаться от 50 м до несколько сотен км. В зависимости от размера астероидам присваивается порядковый номер, а самым крупным из них — название (Паллада — № 2, Юнона — №3, Веста — № 4, Астрея — № 5, Эрот, Икар и т. д.). Орбиты астероидов располагаются преимущественно между орбитами Марса и Юпитера на расстоянии 2,2—3,2 а. е. от Солнца, формируя главный **пояс астероидов**. Однако некоторые из них двигаются по сильно вытянутым орбитам, пересекающим орбиту Земли или выходящим даже за пределы орбиты Нептуна. Поэтому астероиды могут представлять реальную опасность из-за возможного столкновения с Землей. Некоторые астероиды имеют спутники. Пояс астероидов является источником метеоритов. О вещественном составе астероидов ориентировочно можно судить по составу метеоритов. По-видимому, он главным образом железоникелевый и силикатный. Однако значительная часть вещества метеоритов сгорает и испаряется при прохождении земной атмосферы.

Одной из распространенных гипотез происхождения пояса астероидов является представление о разрушении гипотетической планеты Фаэтон. Большинство современных исследователей, однако,

отвергают эту гипотезу из-за малой суммарной массы астероидов и сомнительности формирования крупного объекта в области, испытывающей сильное гравитационное воздействие Юпитера. Согласно другой гипотезе, астероиды являются остатками вещества, из которого сформировалась Солнечная система, т.е. сохранившимися до наших дней планетезималями.

Помимо главного пояса известны астероиды, сопровождающие Нептун, это так называемые *нептунские троянцы*, а также группа астероидов, находящаяся между орбитами Юпитера и Нептуна, называемая *кентаврами*. Кентавры обладают переходными свойствами между астероидами главного пояса и кометами, объектам этой группы даются имена кентавров античной мифологии.

Метеориты (от греч. *meteora* — атмосферное явление) — астероиды, попавшие в сферу земного притяжения и не сгоревшие в плотных слоях земной атмосферы. Следует различать метеориты и метеоры. *Метеором* называется небесное тело, пролетающее атмосферу Земли и оставляющее в атмосфере яркой светящийся след независимо от того, пролетит ли оно по касательной к Земле, сгорит ли в атмосфере или упадет на Землю. Если оно очень яркое (ярче звезды 4-й величины), то называется *болидом*. Метеор, достигший поверхности Земли, становится метеоритом. Большинство найденных метеоритов имеет массу от нескольких граммов до нескольких килограммов. Крупнейшим из них, массой 60 т, является метеорит Гоба, найденный в Намибии. На месте падения метеорита может образоваться кратер — *астроблема* (звездная рана, от греч. *astrum* — звезда и *blema* — рана). На Земле установлено около 100 астроблем, одна из самых известных — кратер Каньон-Дьябло в Аризоне (США) имеет поперечник 1 220 м при глубине 184 м. Предполагают, что наибольший метеоритный кратер диаметром 500 км — кратер Земли Уилкса — расположен в Антарктиде. На территории России самой крупной астроблемой диаметром более 100 км является Попигайская астроблема, находящаяся на северо-востоке Сибирской платформы. Возраст метеоритов соизмерим с началом формирования Солнечной системы и оценивается разными изотопными методами примерно в 4,5 млрд лет.

По составу метеориты разделяются на каменные, железокремнистые и железные. В минеральном составе метеоритов выявлено около 150 минералов и среди них нет новых неизвестных на Земле. Наиболее часто встречаются *каменные метеориты* (92,8 % падений), среди которых выделяются хондриты (92,3 %) и ахондриты (7,7 %). *Хондриты* названы так из-за наличия в них *хондр* (от греч. *χόνδρος* — зерно) — округлых силикатных образований размером в среднем 0,5 — 1,0 мм, которые находятся в обломочной или мелкокристаллической матрице. Считается, что хондриты образовались непосредственно из протопланетного облака, окружавшего Солнце. *Ахондриты* являются обломками протопланетных и, возможно, планетных тел, прошедших

плавление и дифференциацию по составу. *Железные метеориты* (5,7 % падений) состоят из железоникелевого сплава (никелистое железо). Содержание никеля в железе бывает различно — от 6—7 до 30—50 %. Иногда в значительных количествах присутствуют сульфиды железа. Изредка встречаются и чисто железные метеориты. Сравнительно редкие *железокаменные метеориты* (1,5 % падений) имеют промежуточный состав между каменными и железными метеоритами.

Транснептуновые объекты представляют собой небесные тела Солнечной системы, которые обращаются вокруг Солнца за пределами орбиты Нептуна. Они образуют *пояс Койпера*, *Рассеянный диск* и *облако Оорта* (см. рис. 1.4). В общей сложности на начало 2012 г. известно около 1 400 транснептуновых объекта, крупнейшими из которых являются карликовые планеты Эрида и Плутон.

Пояс Койпера, или *пояс Эджворта — Койпера*, находится на расстоянии 30—50 а. е. от Солнца. Объекты пояса Койпера движутся приблизительно в плоскости орбит планет, по составу представляют собой лед с небольшими примесями углеродного и каменного вещества, т. е. близки к кометному веществу. Пояс Койпера считается источником комет, главным образом короткопериодических. Совокупная масса объектов в нем в сотни раз превышает массу пояса астероидов, однако, как предполагается, существенно уступает массе облака Оорта. *Рассеянный диск* — удаленный регион Солнечной системы с редкими малыми телами, состоящими в основном из льда. Внутренняя область рассеянного диска частично перекрывает пояс Койпера начиная с 35 а. е. от Солнца, а его внешняя часть распространяется широкой полосой гораздо дальше и шире пояса Койпера на расстояние до 100 а. е. *Облако Оорта* — гипотетическая область Солнечной системы, являющаяся источником комет с длинным периодом обращения. Объекты облака Оорта в значительной степени состоят из водяных, аммиачных и метановых льдов и распределены в виде сферического облака вокруг Солнечной системы. Предполагаемая внешняя граница облака Оорта является гравитационной границей Солнечной системы и составляет около 2 св. лет.

Кометы (от греч. *kometes* — длинноволосый) — периодические малые тела Солнечной системы, движущиеся вокруг Солнца по сильно вытянутым параболическим орбитам, становясь видимыми с Земли через определенные промежутки времени (рис. 1.6, А). На большом расстоянии от Солнца кометы выглядят как небольшие светящиеся пятна, а с приближением к Солнцу у них выделяются основное тело — *голова*, или *кома*, и *хвост* (рис. 1.6, Б). Центральная часть головы — *ядро*, со средним диаметром 0,5—20 км и массой до 10^{10} кг, состоит из льда замерзших газов — диоксида углерода, метилового спирта, аммиака, паров воды и космической пыли. *Хвост* представляет собой кометное вещество, состоящее из газа и пыли, дуваемое солнечным ветром, поэтому он всегда направлен в проти-

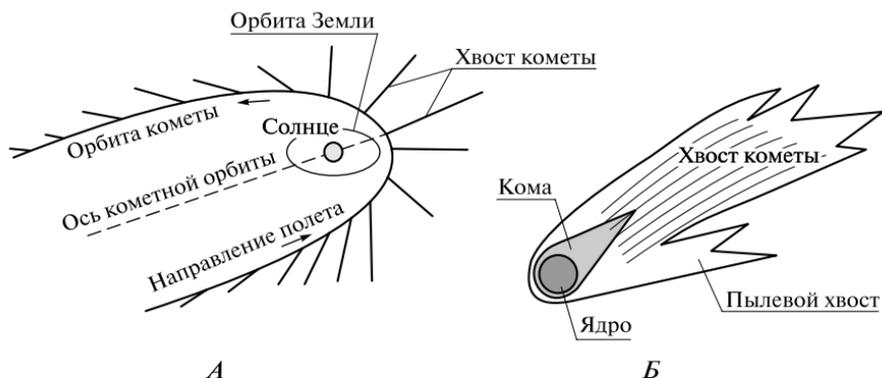


Рис. 1.6. Движение и строение кометы:

А — движение по параболической орбите, ее хвост всегда направлен в сторону, противоположную от Солнца; *Б* — строение кометы

воположную от Солнца сторону. Его длина может достигать несколько десятков миллионов километров. Наиболее известными кометами Солнечной системы являются комета Галлея (период около 76 лет) и комета Швассмана — Вахмана (период около 3,3 года). У короткопериодических комет период обращения составляет менее 200 лет, а у длиннопериодических — более 200 лет. Под влиянием излучения Солнца кометы постепенно испаряются и со временем прекращают свое существование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Короновский Н. В.* Общая геология. — М.: Издательский центр «Академия», 2011. — 480 с.
2. *Очерки сравнительной планетологии.* — М.: Наука, 1981. — 326 с.
3. *Солнце // Физика космоса: Маленькая энциклопедия.* — М.: Советская энциклопедия, 1986. — 37с.
4. *Энциклопедия для детей.* — Т. 8. *Астрономия.* — М.: Аванта+, 2004. — 688 с.