

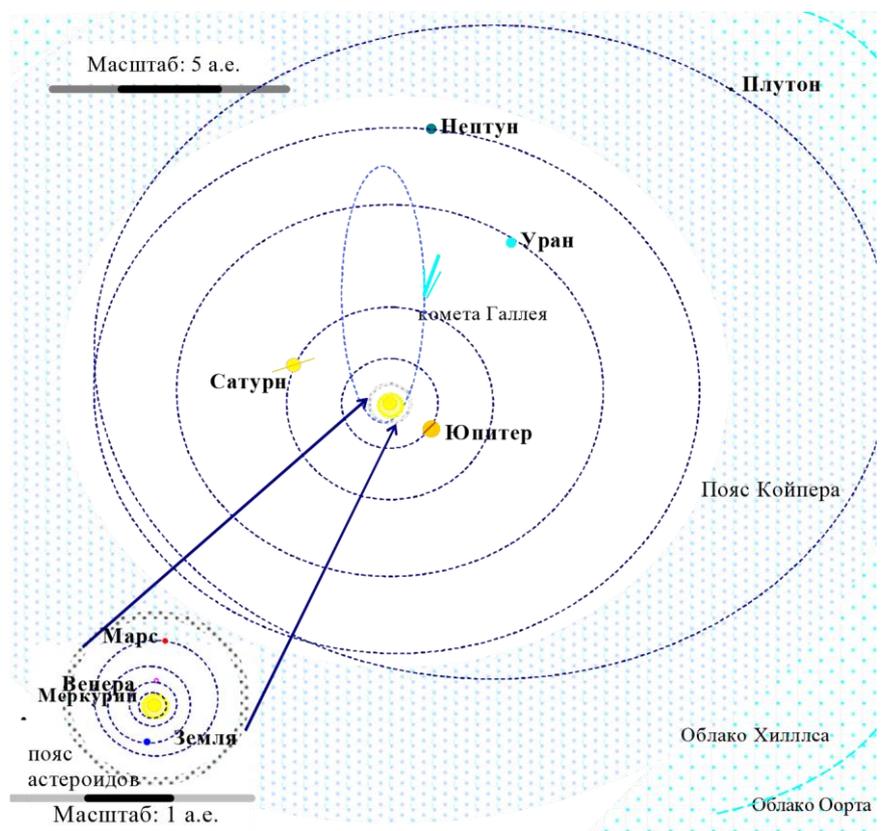
### Лекция 3. Структура Солнечной системы

**Солнечная система** – система космических объектов, состоящая из звезды класса G2 Солнце и вращающихся вокруг нее под действием сил тяготения планетных тел: 9 больших планет – Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна, Плутона; 128 известных спутников планет (планетоидов и астероидов);  $10^5$ - $10^6$  малых планет – астероидов;  $10^{13}$ - $10^{14}$  комет и бесчисленного множества метеорных тел, космической пыли и газа. Пространство Солнечной системы размерами свыше  $3 \cdot 10^{16}$  м является носителем гравитационных и магнитных полей и пронизано электромагнитным излучением и потоками элементарных частиц. Возраст Солнечной системы 4,5-5 миллиардов лет.

Солнце сосредоточивает в себе 99,866 % массы Солнечной системы, на долю больших планет приходится 0,134 % массы, спутников планет – 0,00004 %, астероидов – 0,0000001 %, комет – 0,0003 % и метеорных частиц 0,000000000001 %. Геометрический центр Солнечной системы почти совпадает с центром Солнца.

Большие планеты Солнечной системы обращаются вокруг Солнца в направлении его осевого вращения по почти круговым орбитам, слабо наклоненным друг к другу и лежащим вблизи плоскости солнечного экватора. Большинство планет вращается вокруг своей оси в том же направлении. Спутники планет в основном вращаются

вокруг планет в том же направлении, в котором происходит осевое вращение планет, но некоторые, самые далекие спутники планет обладают обратным движением. Большинство орбит астероидов лежит



между орбитами Марса и Юпитера. Открыты сотни силикатно-ледяных и ледяных планетоидов, кентавров и кометных ядер **пояса**

**Койпера**, орбиты которых лежат за орбитой Плутона на Рис. 69. **Строение Солнечной системы** расстояния около 50–70 а.е. от

Солнца. Общее число метеороидов размерами свыше 1 км на расстоянии до 100 а.е. от Солнца достигает 1 миллиона. В гигантском облаке кометных ядер, окружающем Солнечную систему, выделяют 2 слоя: сферическое **облако Хиллса** из  $10^{13}$ - $10^{14}$  ледяных метеороидов на расстоянии до 20000 а.е. и квазисферическое **облако Оорта** из  $10^{11}$ - $10^{12}$  объектов на расстоянии до  $10^5$  а.е. от Солнца. Под действием возмущений от проходящих вблизи звезд кометные ядра в облаке меняют свои орбиты и часть их устремляется внутрь Солнечной системы; орбиты известных комет обладают большим эксцентриситетом и наклоном к эклиптике.

За границу Солнечной системы принимают расстояние от Солнца до **гелиопаузы** – точки, в которой давление солнечного ветра уравнивается давлением межзвездной среды (около 100 а.е.).

Средние расстояния планет от Солнца подчиняются эмпирическому закону, сформулированному в конце XVIII в. астрономами И. Тициусом и И. Боде:  $r = 0,3 \cdot 2^n + 0,4$  (а.е.), где  $r$  – расстояние от планеты до Солнца. Для Меркурия  $n = -\infty$ ; для Венеры  $n = 0$ ; для Земли  $n = 1$ ; для Марса  $n = 2$ ; для Юпитера  $n = 4$  и т. д.

В настоящее время ближайшей к Солнечной системе звездой является Проксима Центавра, красный карлик ( $11,05^m$ ), компонент тройной звездной системы  $\alpha$  Центавра, расположенная на расстоянии 270 000 а.е. (4,2 световых года). В течение ближайшего миллиона лет около Солнечной системы на расстоянии до 0,5 св. года (30 000 а.е.) пройдет 8 звезд; наибольшее сближение испытает красный карлик Глизе 710 ( $M^* \sim 0,3M_{\odot}$ ) из созвездия Змееносца.

#### • **Планеты Солнечной системы**

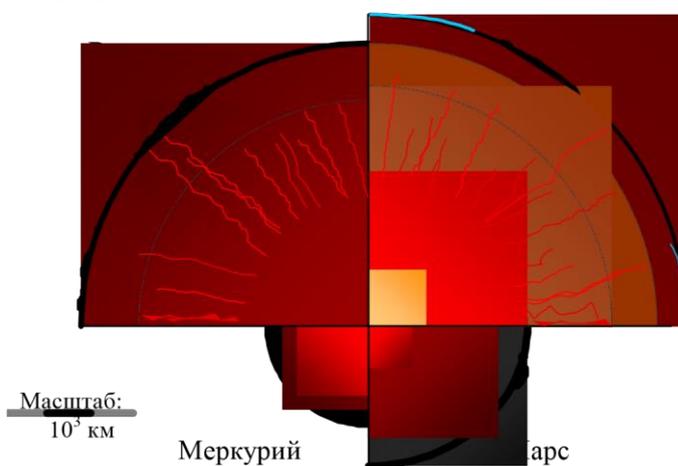
В группу землеподобных планет входят Меркурий, Венера, Земля и Марс, состоящие в основном из силикатных пород, соединений железа и других тяжелых химических элементов.

**Меркурий** – ближайшая к Солнцу планета Солнечной системы. Масса Меркурия 0,0551 земной, диаметр – 4878 км, средняя плотность 5,44 г/см<sup>3</sup>. Орбита Меркурия обладает большим эксцентриситетом (0,206) и наклоном к эклиптике (7°). Приливное действие Солнца придало планете резонансный несинхронный характер движения: сидерический период обращения Меркурия – 87,97<sup>d</sup>, а период вращения – 58,65<sup>d</sup>: Меркурий делает 3 оборота вокруг своей оси за 2 меркурианских года, поворачиваясь к Солнцу то одной, то другой стовидимого движения Солнца в небе планеты:

роной. Особенности орбитального движения Меркурия привели к неравномерности

**Рис. 70. Внутреннее строение планет земной группы Солнечной системы:**

Внутреннее твердое ядро планеты. в афелии Солнце перемещается в небе Мантия Внешнее: ■ - жидкое внутренняя (вязкое; - ) ядро средняя планеты; ■. - внешняя. очень медленно, а в перигелии, когда ско- Литосфера (кора) планеты. рость орбитального движения превышает



скорость вращения планеты, Солнце почти неделю движется по небу «вспять»; на некоторых долготах Солнце неделями неподвижно висит в меркурианском небе.

Меркурий получает в 6 раз больше солнечной энергии на единицу площади поверхности, нежели Земля – от 9,15 до 11 кВт/м<sup>2</sup>, поэтому на экваторе Меркурия в полдень температура поднимается до +427°С / +510°С, но в полночь опускается до -183°С / -210°С: у Меркурия практически нет атмосферы. Давление газовой оболочки, состоящей из натрия, калия, гелия, водорода, неона и аргона, в 500 млрд. раз слабее, чем у поверхности Земли (но в 200 раз плотнее лунной). Постоянно рассеивающаяся атмосфера Меркурия непрерывно пополняется газом из солнечной атмосферы и газами, выделяющимися из реголита поверхности и литосферы планеты. Тепловой поток из недр пренебрежимо мал. Меркурий обладает слабым магнитным полем (0,7-1,0 % напряженности земного).

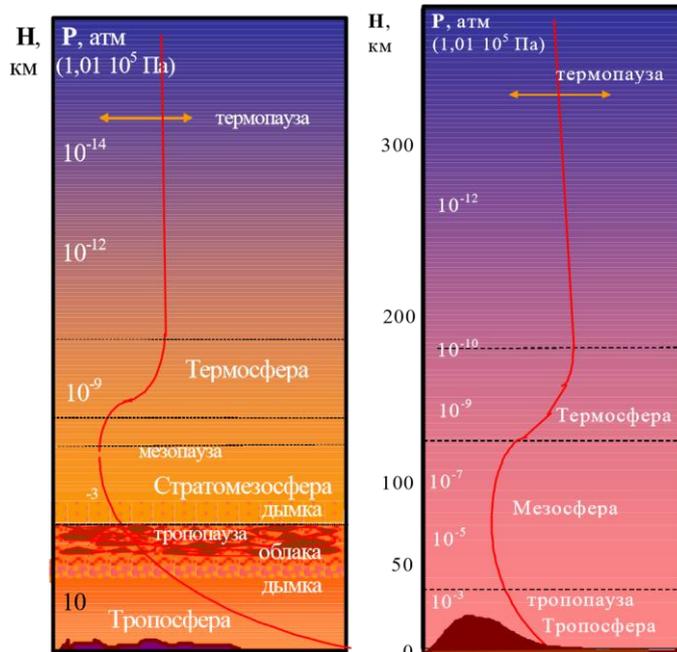
Поверхность Меркурия весьма напоминает поверхность Луны, она вся изрыта кратерами ударного происхождения, названными в честь писателей, художников, композиторов (Достоевский (600 км), Толстой (300 км), Бетховен, Роден, Пушкин и т.д.). Часть кратеров обладает светлыми лучевыми системами. Высота гор Антониади и Скиапарелли достигает 2 – 4 км; многочисленные эскарпы – обрывы (сбросы) имеют протяженность от 20 до 500 километров и высоту до 23 км. На исследованном участке поверхности обнаружены лишь небольшие «моря»- равнины Жары (диаметром 1300 км), Сусей, Тир, Будх, Собкоу и Северная равнина. Предположительно, породы литосферы сложены в основном обедненными железом габброидами, анортозитами, шпатами, плагиоклазами и щелочными базальтами.

**Венера** – ближайшая к Земле планета, почти совпадающая с ней по размерам и массе, но близость Венеры к Солнцу обусловила в 2 раза больший приток энергии на единицу площади поверхности и породила ряд существенных отличий в эволюции планет.

Приливное действие Солнца почти уравнило по продолжительности сидерический венерианский год ( $224,7^d$ ) и венерианские сутки ( $243,02^d$ ). Венера вращается вокруг своей оси в обратном направлении по отношению к большинству планет. Тепловой поток из недр планеты весьма значителен ( $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>) и поддерживает мощные вулканические процессы в литосфере Венеры, тектоническая активность недр планеты невысока. Венера обладает очень слабым магнитным полем,

захваченным и сжатым из магнитного поля межпланетного пространства. Как и у Меркурия, у Венеры нет спутников планеты.

Основной деталью рельефа Венеры являются равнины – плоские или слабохолмистые каменные пустыни, занимающие 75-80 % площади ее поверхности. Своеобразными формами венерианского рельефа являются тессеры (8 % площади планеты) – платообразные возвышенности, поверхность которых представляет собой хаотическое нагромождение тектонических структур, и венцы – кольцевые структуры диаметром в несколько сотен километров, возникшие вследствие действия поднимающихся мантийных плюмов. Выделяют три материка: земля Иштар, земля Афродиты, область Бета, и мощные горные массивы – высота крупнейших гор Максвелла достигает 11 км.



Число кратеров ударного происхождения и вулканов (в том числе действующих) относительно невелико. Физические характеристики

Почти все детали рельефа Венеры носят женские имена: равнины названы в честь мифологических персонажей (Русалки, Снегурочки, Бабы-Яги); крупные кратеры – в честь выдающихся женщин, а маленькие – личными женскими именами.

Состав венерианских пород в районах посадок АМС «Венера» и «Вега» близок к составу земных базальтов, встречающихся на океанских островах (толеитовые и субщелочные базальты).

Мощная атмосфера Венеры долго скрывала от земных наблюдателей поверхность планеты. Исследования химического состава и строения атмосферы и поверхности планеты были произведены с

помощью АМС «Венера» и «Вега» (СССР), «Маринер», «ПионерВенера» и «Магеллан» (США).

Состав атмосферы Венеры:  $\text{CO}_2$  – 95,5 %;  $\text{N}_2 \approx 3,5$  %, остальные газы около 0,1 %. Высокое содержание углекислого газа породило мощный парниковый эффект, благодаря которому температура вблизи поверхности составляет от  $+470^\circ\text{C}$  до  $+600^\circ\text{C}$  при давлении 93-95 атм. В результате явления суперротации почти вся атмосфера Венеры вращается, обгоняя вращение планеты.

В ярком, желто-зеленом у горизонта и оранжево-красно-багряном в зените, закрытом вечными тучами небе никогда не проглядывает Солнце. Трехслойные облака Венеры различаются размерами и концентрацией частиц, и состоят в верхнем ярусе в значительной мере из мельчайших капелек серной кислоты, а ниже – из кристалликов серы. Гремят грозы. Скорость воздушных потоков в главном слое облаков достигает 100 м/с, однако ниже высоты 45-50 км небо почти всегда безоблачно и почти безветренно. У поверхности планеты скорость ветра не превышает 1 – 5 м/с, осадков почти или совсем не выпадает.

**Марс** – самая знаменитая планета Солнечной системы. Марс имеет массу  $6,42 \cdot 10^{23}$  кг, почти в 9 раз меньше Земли по массе и вдвое по размерам: диаметр планеты 6776 км. Марс в 1,5 раза дальше от Солнца, орбита Марса обладает большим эксцентриситетом (0,0934); марсианский год вдвое дольше земного ( $687^{\text{д}}$ ), а сутки на Земле и Марсе ( $24,6^{\text{ч}}$ ) почти совпадают. На единицу площади поверхности Марса падает лишь 43 % от той энергии Солнца, что падает на земную поверхность. Современный тепловой поток из недр Марса составляет около  $4 \cdot 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>. У Марса обнаружено очень слабое магнитное поле.

Состав атмосферы Марса:  $\text{CO}_2 \approx 95$  %,  $\text{N}_2 \approx 2,5$  %, Ar – 1,6 %. Давление разреженной, почти целиком состоящей из углекислого газа и практически не содержащей кислорода (0,10,4 %) атмосферы Марса в 160 раз слабее, чем у поверхности Земли; парниковый эффект почти отсутствует, повышая среднюю температуру всего на 3–5 К.

Удаленность планеты от Солнца и разреженность атмосферы привели к тому, что даже летом на экваторе Марса температура редко поднимается днем выше  $0^\circ\text{C}$ , опускаясь ночью до  $-97^\circ\text{C}$ ; зимой морозы усиливаются до  $-130^\circ\text{C}$ . В северном полушарии лето ( $177^{\text{д}}$ ) длиннее зимы ( $156^{\text{д}}$ ). Наибольшее количество «снега»  $\text{CO}_2$  «выпадает» (осаждается) слоем глубиной до 60-80 см зимой в полярных районах.

Во время таяния полярных шапок грандиозные потоки воздуха «перетекают» из весеннего полушария в осеннее. Ветра со скоростью 40-70 м/с (до 100 м/с!) вздымают пыль массой до 1 млрд. тонн на высоту 7-15 км. Мощные пылевые бури продолжаются 50-100 суток, вызывая резкое глобальное похолодание на планете.

Рельеф Марса очень разнообразен и, как правило, не связан с окраской района (хотя наблюдаемые в телескоп 2/3 светлых участков поверхности Марса названы «материками», а темные – «морями»). Северное полушарие ниже южного на 3-5 км. Вокруг северного полюса Марса простирается Великая Северная равнина, к югу тянутся равнины Аркадия, Утопия и Ацидалийская. Почти на экваторе в стране Фарсида возвышаются гигантские, самые высокие в Солнечной системе, горы – потухшие щитовые вулканы Олимп (23 км), гора Аскрийская, гора Павлина и гора Арсия. Район южного полюса весьма кратеризован, густо покрытая кратерами всевозможных размеров (Скиапарелли – 470 км) область протянулась (с 50° северной широты, 40° западной долготы) на юг, к экватору (до 220° западной долготы). Кратерное море – равнина Аргир имеет размеры 900 км, еще крупнее равнина Эллада – гигантский палеократер диаметром около 2100 км и глубиной 9 км. К северо-западу от Аргира находится гигантский каньон – долина Маринера длиной 4500 км, шириной до 100 км и глубиной до 5-7 км. Красноватый цвет Марса объясняется большой распространенностью железосодержащих пород. По химическому составу марсианские породы близки к земным базальтам. На фотографиях поверхности Марса мы видим то каменистую, то песчаную пустыню под красноватым, почти всегда безоблачным небом.

В настоящее время основные запасы воды на Марсе (2,3-4,7 млн. км<sup>3</sup>) сосредоточены в криосфере – приповерхностном слое вечной мерзлоты толщиной до 100 м в крупных равнинных бассейнах на севере и юге Марса, занимающих до 15 % территории планеты, и в полярных шапках толщиной до 3-4 км, состоящих не только из льда (рыхлая и бугристая северная полярная шапка), но и замерзшего углекислого газа и газовых гидратов (равнинная, покрытая округлыми впадинами южная полярная шапка). На снимках, полученных с борта АМС, отчетливо видны сухие русла рек протяженностью до 1000 км и грандиозные каньоны, тянущиеся на тысячи километров при ширине до 200 км и глубине до 3 км. Возможно, под северной полярной шапкой сохранились реликтовые озера жидкой воды. Наиболее «влажные» районы на экваторе Марса –

земли Аравия и Мемнония. В восточной части равнин Амазония и земли Аравия могут быть подповерхностные, частично или полностью промерзшие озера. В некоторых местах (кратер Ньютон) истечения жидкой воды (типа мощных родников, образующих быстро замерзающие потоки на валу кратеров) наблюдаются до сих пор.

Существование жизни на Марсе в современную эпоху вполне вероятно; эксперименты, проведенные на борту посадочных модулей АМС «Викинг» (США) не дали однозначного ответа на этот вопрос.

У Марса есть 2 покрытых кратерами и бороздами спутника неправильной формы: Фобос (размеры  $22 \times 30$  км, расстояние от планеты 6000 км, период обращения  $7^h 30^m$ ), и Деймос (размеры  $15 \times 12$  км, расстояние от планеты 20070 км, период обращения  $30^h 18^m$ ) – вероятно, захваченные притяжением Марса астероиды.

#### Эволюция планет земной группы:

Эволюция **Меркурия** определялась близостью к Солнцу и малой массой планеты. Солнечный ветер и давление света уменьшили концентрацию легких элементов в протопланетном сгустке и способствовали быстрой аккумуляции планетного тела. Поверхность планеты нагревалась лучами близкого светила и взрывами при столкновениях Меркурия с мелкими планетезималями. Недра планеты, помимо гравитационного сжатия и распада радиоактивных элементов, нагревались под действием приливных сил со стороны Солнца, тормозивших вращение Меркурия вокруг оси. Все это способствовало быстрой дифференциации вещества: по-видимому, Меркурий был первой из полностью сформировавшихся планет Солнечной системы. Эволюция его закончилась 3,3-3 млрд. лет назад с образованием основных оболочек – массивного железоникелевого ядра радиусом около 1840 км ( $0,75-0,8$  радиуса планеты  $R_M$ ) и массой  $0,5-0,62$  массы планеты, мантии  $0,2-0,25 R_M$  и литосферы (коры) толщиной до 200 км, а также основных деталей рельефа (бассейнов, гор и кратеров). К настоящему времени толщина коры увеличилась до 500 км, а тектоническая и вулканическая деятельность почти прекратились.

Самые ранние стадии эволюции **Венеры**, ее внутреннее строение и химический состав, вероятно, очень сходны с земными, но в дальнейшем пути их развития сильно разошлись.

Дифференциация недр Венеры началась раньше, нежели у Земли. В настоящее время конвекция вещества в мантии, по-видимому, отсутствует или очень слаба. Тепловая энергия недр выделяется в

основном действующими вулканами. При высокой активности вулканических процессов на поверхности Венеры отсутствуют явные следы глобальной тектоники литосферных плит. Загадкой венерианского рельефа является его относительная молодость: возраст старейших образований не превышает 500 млн. лет. Ряд ученых считает это следствием катастрофического глобального переплавления всей литосферы планеты около 350 миллионов лет назад, когда тысячи сверхмощных вулканических излияний образовали моря и океаны расплавленной лавы. Так образовались базальтовые равнины – основной вид венерианского рельефа. Активный вулканизм значительно увеличил содержание паров  $H_2O$  и  $SO_2$  в атмосфере, породив плотную облачность. Эффект «ядерной зимы» вызвал остывание поверхности планеты до  $100^{\circ}C$ . Диссоциация водяных паров и поглощение двуокиси серы горными породами вело к разрушению облачного слоя 130 млн. лет назад – небо Венеры стало свободным от облаков – и новому нагреванию Солнцем поверхности планеты. Современный облачный покров сформировался около 30 млн. лет назад в результате новой вспышки вулканической активности. В качестве объяснения особенностей рельефа, внутреннего строения, эволюции и характеристик движения Меркурия и Венеры выдвинута гипотеза, согласно которой Меркурий является «потерянным» спутником Венеры, вращавшемся вокруг нее на расстоянии 400000 км 4 – 4,5 миллиарда лет назад. В дальнейшем Меркурий неоднократно сближался с Венерой и становился на время (десятки и сотни миллионов лет) ее спутником. Мощное приливное рассеяние энергии вызывало плавление литосферы или резко усиливало тектонические и вулканические процессы в недрах Венеры, и тормозило вращение обеих планет.

Эволюция **Марса** была обусловлена небольшой массой планеты и удаленностью от Солнца. Формирование железо-сульфидного ядра началось вскоре после завершения аккумуляции планеты и затянулось на миллиард лет. Гравитационная дифференциация вещества была не столь глубокой и полной, как у других планет земной группы, и подтверждается обогащенностью мантии сернистым железом и обилием железосодержащих пород в литосфере Марса, хотя концентрация железа в химическом составе планеты на 25 % ниже, чем у Земли. Процессы плавления вещества в мантии сопровождались интенсивной тектонической и вулканической деятельностью, с образованием на поверхности Марса базальтовых равнин и

вулканических щитов. Атмосфера Марса первые сотни миллионов лет состояла из водорода и гелия, а после ухода водорода – из углекислого газа, азота и других газов (CO, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O и др.). В небе ярко светили 2 звезды – Солнце и формирующийся Юпитер, желтая и красная.

В конце Нойской эры, 3,8-3,55 млрд. лет назад Марс достиг вершины своей эволюции. В этот период интенсивного горообразования возникли основные формы современного рельефа. Мощная вулканическая деятельность обусловила существование плотной атмосферы ( $p \approx 1,5$  атм) и обширной гидросферы.

В Гесперийскую эру (3,5-1,8 млрд. летназад) Северную равнину Марса занимал соленый океан объемом до 15 млн. км<sup>3</sup> глубиной 0,7-1 км; в отдельные промежутки времени он распадался на два – один, округлый, заполнял бассейн ударного происхождения в районе Утопии, другой, неправильной формы – район Северного полюса. В умеренных и низких широтах было много озер и рек, на Южном плато – ледники. Марс обладал плотной атмосферой, аналогичной той, которая в то время была у Земли, при температуре у поверхности до 50<sup>0</sup>С и давлении свыше 1 атм. Возможно, в ту эпоху на Марсе существовала биосфера: в трех метеоритах марсианского происхождения ALH 84001, Накла и Шерготти группой американских ученых были обнаружены образования, схожие с окаменелыми останками микроорганизмов возрастом от 4000 до 165 миллионов лет.

В Амазонийскую эру (2,5-1 млрд. лет назад) климат Марса стал катастрофически нестабильным; происходили мощные, но постепенно затухающие глобальные тектонические и вулканические процессы, в ходе которых возникли крупнейшие в Солнечной системе марсианские вулканы; несколько раз сильно изменялись характеристики гидросферы и атмосферы, появлялся и исчезал Северный океан. Катастрофические наводнения, связанные с таянием криосферы привели к образованию грандиозных каньонов: в долину Арес Валлис с южных нагорий Марса стекал поток полноводнее Амазонки; расход воды в долине Касей превышал 1 млрд. м<sup>3</sup>/с. Миллиард лет назад активные процессы в литосфере, гидросфере и атмосфере Марса прекратились и он принял современный облик. Виной глобальных катастрофических изменений марсианского климата считаются большой эксцентриситет орбиты и неустойчивость оси вращения, вызывающие огромные, до 45 %, колебания потока солнечной энергии, падающей на поверхность планеты; слабый приток тепла из недр Марса, обусловленный

небольшой массой планеты, и высокая разреженность атмосферы, обусловленная высокой степенью ее диссипации.

В группу планет-гигантов Солнечной системы входят Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Все они состоят в основном из водорода и гелия, быстро вращаются вокруг оси и сплюснуты у полюсов, обладают мощными протяженными атмосферами, магнитными полями и радиационными поясами, системами спутников и колец, и излучают в пространство больше энергии, чем получают ее от Солнца.

**Юпитер** – самая большая планета Солнечной системы, в 318 раз больше Земли по массе и в 11 раз по размерам. В телескоп хорошо видны полосы облаков, тянущиеся вдоль экватора, в тропических зонах и у полюсов планеты. Облака располагаются в несколько слоев, на уровне верхнего температура атмосферы 148 К, с глубиной она увеличивается. Состав верхних слоев атмосферы: 87 % водорода и 13 % гелия, вглубь ее растет содержание углеводородов – этана, метана, серы, углерода, азота и сложных органических молекул.

В атмосфере Юпитера скорость ветра вблизи экватора составляет 90-100 м/с, усиливаясь в тропиках до 160 м/с. В 80-100 км под аммиачными облаками экваториальной зоны над участками, где из глубин атмосферы восходят потоки газов, в облаках диаметром до 100 км гремят сильнейшие грозы. Энергия движения восходящих потоков преобразуется в горизонтальное вращательное

движение вихрей. Бушуют ураганы с порывами ветра до 1500 км/ч, возникают циклоны и смерчи – самый мощный из них, Большое Красное пятно в южном полушарии Юпитера, с воронкой в 15000 км, существует более 300 лет.

У Юпитера, в нашем понимании, нет твердой поверхности: на глубине  $0,02R_{Ю}$  (1400-1500 км) под действием колоссального давления ( $p = 5 \cdot 10^9$  Па,  $T = 6500$  К) атмосферный водород переходит в жидкое состояние, а на глубине  $0,22-0,24 R_{Ю}$  (16800 км) при  $p = 10^{11}$  Па и  $T = 10^4$  К водород становится твердым, «металлическим». Металлическая твердая оболочка простирается почти до границы с внешним ядром массой  $20 M_{\oplus}$ , предположительно состоящим из воды, метана, силикатов на глубине  $0,85 R_{Ю}$ , а глубже расположено внутреннее ядро из металлов (железа, никеля и др.) и силикатов. По расчетам ученых в центре Юпитера давление достигает  $2,66 \cdot 10^{12}$  Па при  $T = 2,3-2,5 \cdot 10^4$  К. Внутренний поток тепла из недр планеты на границе атмосферы и

космоса достигает  $5,6 \text{ Вт/м}^2$ ; общее количество излучаемой Юпитером энергии составляют  $10^{18} \text{ Вт}$  – в 2,5 раза больше, нежели Юпитер получает от Солнца.

В настоящее время (на 2003 г.) у Юпитера насчитывается 61 спутник, в их числе крупные планетоиды Ио, Ганимед, Европа, Каллисто; ряд ученых предполагает, что мелких (1-2 км) спутников у Юпитера больше (до 100). Юпитер окружен системой тонких колец, состоящих из мельчайших пылинок – микроосколков внутренних спутников.

**Сатурн** подобен Юпитеру по своим физическим характеристикам, но уступает ему по массе, размерам, мощности теплового потока из недр и активности атмосферы.

У Сатурна в 2003 г. насчитывалось 31 спутник, в том числе обладающий плотной атмосферой и углеводородной гидросферой планетоид Титан.

У Сатурна самая красивая и крупная система колец, состоящая в основном из большого количества обломков льда размерами меньше метра, камней и пыли. Предполагается, что кольца планет-гигантов образуются из мелких спутников, разрушенных приливными силами или представляющих собой остатки вещества, из которого в далеком прошлом сформировались планеты и их спутники. Радиус внешнего кольца Сатурна превышает 900000 км при толщине 4 км.

Уран и Нептун значительно меньше Юпитера и Сатурна по массе и размерам, но плотнее их, в химическом составе Урана и Нептуна возрастает доля гелия, метана, аммиака в атмосферах, воды и тяжелых химических элементов в глубоких слоях планет. Давление и температура на дне их атмосфер недостаточны для перехода водорода в жидкое молекулярное состояние.

**Уран** вращается вокруг Солнца «лежа на боку» ( $e = 97^\circ 55'$ ) в обратном, как Венера, направлении. На полюсах планеты полярный день и ночь длятся по 42 года. Тепловой поток из недр незначительно превышает энергию, получаемую планетой от Солнца.

Температура атмосферы  $T = 64 \text{ К}$  почти одинакова на уровне всей «видимой поверхности», представляющей собой оптически непрозрачную дымку из капель или кристаллов углеводородов в атмосфере, самой спокойной среди планет-гигантов. В атмосфере наблюдаются слабые вихри, струйные течения, пятна и метановые облака.

Магнитное поле Урана имеет очень сложную структуру, обусловленную особенностями его вращения. У Урана 21 спутник. Многочисленные кратеры обнаружены на Обероне, Титании, Ариэле, поверхность Умбриэля, наоборот, довольно гладкая. Наиболее сложным рельефом (борозды, хребты, разломы глубиной в несколько километров) обладает Миранда. 10 колец планеты шириной до 9300 км состоят из угольно-темных частиц размерами около 1 см.

**Нептун** – самая далекая из планет-гигантов, однако он излучает в пространство в 2,7 раза больше энергии, чем получает от Солнца; мощный тепловой поток из недр планеты обуславливает значительную метеорологическую активность атмосферы, вращающейся в обратную сторону от направления вращения планеты со скоростью ветров от 100 до 400–700 м/с; наблюдаются многочисленные облака, пятна и вихревой шторм диаметром до 12000 км. Плотная голубая атмосфера Нептуна содержит помимо водорода и гелия, метан (до 15 %), этан  $C_2H_6$ , ацетилен  $C_2H_2$ , этилен  $C_2H_4$  и другие газы. Предполагается, что на дне ее находится глобальный океан из воды, насыщенной различными солями. Дно океана – твердая или газо-жидкая ледяная мантия, ( $p = 10^{11}$  Па при  $T = 2-5 \cdot 10^3$  К) сосредоточившая в себе 70 % массы планеты. Ядро планеты предположительно состоит из оксидов кремния, сульфидов, магния и железа и составляет 25 % массы планеты. В центре планеты давление  $6-8 \cdot 10^{11}$  Па, температура  $7 \cdot 10^3$  К). У Нептуна 11 спутников. 5 колец Нептуна шириной от 15 до 5000 км на 17–40 % состоят из пыли.

#### • Планетоиды: Луна и другие спутники планет

**Плутон** по традиции считается одной из планет Солнечной системы, но по своим физическим характеристикам является планетоидом. Орбита Плутона обладает большим эксцентриситетом, среднее расстояние от Плутона до Солнца меняется от 29 до 48 а.е., наклон к эклиптике  $17^\circ$ ; год длится 247,7 земных лет. Периодически (с 1979 по 1999 г.) Плутон оказывается к Солнцу ближе Нептуна. Масса Плутона в 422 раза меньше массы Земли и в 5 раз меньше лунной. Диаметр Плутона около 2390 км. Плутон получает в 1600 раз меньше солнечной энергии на единицу площади поверхности планеты, нежели наша Земля; Солнце с его поверхности выглядит как самая яркая из звезд. Температура поверхности Плутона колеблется от  $-268^\circ\text{C}$  до  $-238^\circ\text{C}$ . Большой угол наклона оси вращения к плоскости орбиты ( $98^\circ$ ) ведет к мощным сезонным изменениям с полярными днями и ночами длительностью до 124 лет. На поверхности Плутона наблюдаются

области замерзших метановых морей  $\text{CH}_4$  и участки, покрытые слоем смеси замерзшего азота  $\text{N}_2$ , окиси углерода  $\text{CO}$  и этана  $\text{C}_2\text{H}_6$ . Обнаружена слабая атмосфера.

Внутреннее строение планетоидов – спутников планет зависит от Солнца, тем ниже будет температура и давление в его недрах, тем раньше угаснут тектонические процессы и тем однороднее будет его внутреннее строение. Таковы, вероятно, Плутон, крупнейшие объекты пояса Койпера и 4 крупнейших малых планеты (Церера, Паллада, Юнона и Веста).

На физико-химические характеристики, внутреннее строение и эволюцию планетоидов оказали значительное влияние приливные силы со стороны тех больших планет, спутниками которых являются эти планетоиды.

Приливные силы значительно уменьшили период вращения спутников вокруг оси, уравнивая его с периодом вращения вокруг планеты.

Приливные силы значительно разогрели недра планетоидов на ранних стадиях их образования, способствовали возникновению у них дифференцированного внутреннего строения и запасов внутреннего тепла. В недрах самых близких к планетам спутников-планетоидов приливные силы до сих пор генерируют мощный тепловой поток, усиливают тектоническую и вулканическую активность, повышают температуру поверхности и коры планетоидов, способствуют существованию у них гидросфер и атмосфер.

**Луна** – силикатный планетоид, спутник планеты Земля. Масса Луны  $7,348 \cdot 10^{22}$  кг, в 81,3 раза меньше массы Земли; радиус 1737,4 км; средняя плотность  $3,34 \text{ г/см}^3$ , в 1,5 раза меньше земной; возраст  $4,51 \pm 0,02$  млрд. лет. Среднее расстояние от Луны до Земли 384000 км (от 356400 км до 406740 км). Сидерический период обращения Луны  $27^{\text{d}}07^{\text{h}}43^{\text{m}}$  вокруг Земли совпадает с периодом вращения Луны вокруг своей оси. Мы видим всегда только одно полушарие Луны, 59 % лунной поверхности. Температура на лунном экваторе колеблется от  $+130^{\circ}\text{C}$  в полдень до  $-170^{\circ}\text{C}$  ночью.

Внутреннее строение Луны: кора толщиной 60 км на видимой и 100 км на обратной стороне Луны; верхняя мантия толщиной до 250 км; средняя мантия на глубинах 300-800 км; нижняя мантия толщиной от 200 до 500 км, и металлическое (Fe, Fe-FeS) ядро диаметром до 320-420 километров. Астеносфера (внутренняя мантия и ядро Луны) находится в частично расплавленном состоянии при температуре до  $1800 \text{ K}$ .

Сейсмическая активность Луны невелика и связана с подвижками лунной коры и, реже, с процессами на глубинах 600-800 км.

Крайне разреженная – в  $10^{13}$  раз по сравнению с земной – газовая оболочка Луны состоит из атомов и ионов водорода, гелия, неона, аргона, натрия, калия и кислорода.

Светлые области лунных «материков» занимают 60 % поверхности лунного диска. Древние материковые районы Луны сложены преимущественно светлыми горными породами – анортозитами, почти целиком состоящими из плагиоклазов с примесью пироксена, оливина, магнетита, титаномагнетита. Возраст лунных пород 3,13–4,4 млрд. лет. Лунные горные хребты, названные по аналогии с земными Кавказом, Альпами, Карпатами и т. д. имеют средние высоты 6–7 км.

Темные «моря» занимают 40 % поверхности Луны и представляют собой равнинные области, наполненные темным веществом – базальтами, сложенными в основном минералами плагиоклазами и моноклинными пироксенами (авгитами). Древнейший и крупнейший Океан Бурь образовался около 4,5 млрд. лет назад в результате столкновения пра-Луны с крупной планетезималью. Свыше 20 других лунных морей возникли по тем же причинам 4,5-4 млрд. лет назад. Заполнявшие чаши лунных морей массовые излияния базальтовых лав продолжались до 3,5-3 млрд. лет назад. Лунные базальты менее окислены, но более богаты тяжелыми элементами по сравнению с земными. Темными районы морей выглядят из-за примесей оливина и ильменита (TiO). Не залитые лавой низменности называются бассейнами; крупнейший из них – «Южный полюс-Эйткен» – имеет диаметр 2500 км и глубину 12 км. Близ лунных полюсов на глубине 0,4 – 2,0 м на площади до 2000 км<sup>2</sup> обнаружены залежи реликтового льда (около 6 млрд. тонн) в виде вечной мерзлоты.

Основной формой лунного рельефа являются кратеры. Только на видимом полушарии Луны насчитывается свыше 300000 кратеров диаметром свыше 1 км. Их кольцевые валы высотой до несколько километров окружают большие круглые впадины диаметром до 200 км. Всем крупным кратерам даны названия в честь ученых и выдающихся деятелей. Большая часть кратеров имеет ударное (метеоритное) происхождение и образовалась свыше 3,5-3,2 млрд. лет назад; последний максимум бомбардировки Луны метеорными телами произошел около 0,5 млрд. лет назад. Позднейшие кратеры образовались на валу и внутри более древних. В центре многих кратеров возвышаются горки. Часть

кратеров имеет вулканическое происхождение. Тектоническая активность наблюдается в районе кратеров Аристарх, Геродот, Альфонс и в других местах. Известны цепочки кратеров, тянущиеся на тысячи километров. Характерны протяженные системы лучей – выбросы лунных пород при падении на Луну комет и астероидов, гигантские борозды и трещины тектонического происхождения.

Поверхность Луны (и других безатмосферных планетных тел) покрыта тонким ( $10^{-2}$  – 10 м) рыхлым слоем реголита – верхним слоем лунной коры, измельченным до пылевидного состояния микрометеоритной бомбардировкой, воздействием космических лучей и большими суточными перепадами температур. По физико-химическим свойствам серый лунный реголит напоминает мелкий влажный песок.

**Ио** – ближайший спутник Юпитера, силикатный планетоид диаметром 3636 км, массой  $8,93 \cdot 10^{22}$  кг и средней плотностью 3,518-3,549 г/см<sup>3</sup>. В приливных возмущениях рассеивается мощность, в 25-45 раз выше значения теплового потока из недр Земли.

Приливные силы и электрический ток, возникающий при взаимодействии Ио с магнитосферой Юпитера, очень сильно разогревают недра спутника. Ио наполовину состоит из раскаленного жидкого металлического (Fe, Fe-FeS) ядра диаметром, по разным оценкам, от 880-1440 км до 1660-1780 км. Трехслойная мантия состоит из обогащенных железом силикатных пород; ее раскаленный свыше 1500 К верхний жидкий слой имеет толщину до 300 км. Тонкая 60-километровая кора Ио пульсирует вместе с приливами и отливами. Литосфера состоит из силикатов (базальтов), серы и ее соединений (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, S<sub>2</sub> и т.д.); под поверхностью Ио скрываются настоящие серные моря с температурой свыше 110°C, а на поверхности температура ниже и не превышает -150°C. Высота гор Ио достигает 16 км. Обнаружено свыше 100 вулканических кальдер поперечником до 200 км; общее число вулканов достигает 300. Температура насыщенной железом и магнием лавы достигает 1500 К. Ученые предполагают, что Ио переживает период высокотемпературного «силикатного» вулканизма, завершившийся на Земле 2 млрд. лет назад. Вулканизм Ио породил разреженную сернистую атмосферу, в которой наблюдаются вызванные ионизацией красные, синие, зеленые сияния и свечения. Обнаружено слабое магнитное поле.

**Европа** – силикатно-ледяной планетоид массой  $4,8 \cdot 10^{22}$  кг, радиусом 1561 км и средней плотностью 3,014 г/см<sup>3</sup> – второй после Марса кандидат на обнаружение живых организмов. Крупное железное ядро

Европы окружает силикатная мантия ( $\rho \sim 3,0-3,5 \text{ г/см}^3$ ). Близость к Юпитеру, мощное действие приливных сил делает возможным существование гидросферы – глобального океана глубиной до 50 км. Поверхность Европы имеет возраст от 2 до 50 миллионов лет и покрыта панцирем из водяного льда с примесью  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , карбонатов, сульфатов натрия и магния, толщиной от 2-3 км до 80-200 км, в трещинах, дугах и волнистых линиях, возникающих во время приливов и отливов. Отмечены следы движения крупных блоков льда, аналогичных тектонике плит литосферы Земли. Европа обладает крайне разреженной кислородной атмосферой и слабым магнитным полем.

**Ганимед** – спутник Юпитера, крупнейший силикатно-ледяной планетоид Солнечной системы массой  $1,482 \cdot 10^{23}$  кг, радиусом 2634 км и средней плотностью  $1,94 \text{ г/см}^3$ , на 500 км превышает размерами Меркурий. Поверхность спутника – ледяные горы, ледяные поля и гладкие широкие бассейны, порожденные тектоническими процессами. Равнины перекрыты слоем грязе-ледяной лавы, припорошены обломками силикатных пород и пылью, на них выделяется множество структур ударного (кратеры и борозды) и вулканического происхождения. Внутреннее строение: сульфидно-железное ядро Ганимеда ( $\rho \sim 5-6 \text{ г/см}^3$ ) окружает силикатно-ледяная мантия, возможно с тонкой прослойкой глобальной гидросферы, поверх которой лежит ледяная кора толщиной до 800 километров. Ганимед обладает слабым магнитным полем и крайне разреженной атмосферой ( $\text{O}_2$  и др.).

**Каллисто** (масса  $1,07 \cdot 10^{23}$  кг, радиус 2408 км, средняя плотность  $1,84 \text{ г/см}^3$ ) состоит на 60 % из силикатных пород и на 40 % из льда. Молодой рельеф четвертого крупного спутника Юпитера сформировался всего лишь сотни миллионов лет назад. Силикатное ядро Каллисто окружено слоем смеси камней и льда ( $\rho \sim 1,7-2,4 \text{ г/см}^3$ ) и толстой водно-ледяной мантией. Под ледяной корой толщиной от 200 до 500 км, возможно, скрыта 10-километровая глобальная водяная оболочка. Каллисто обладает очень слабым магнитным полем и крайне разреженной атмосферой ( $\text{CO}_2$  и др.), в которой наблюдаются довольно яркие полярные сияния.

**Титан** – спутник Сатурна, один из самых крупных силикатно-ледяных планетоидов диаметром 5150 км, массой  $1,35 \cdot 10^{23}$  кг и средней плотностью  $1,88 \text{ г/см}^3$ .

Поверхность Титана почти неразличима сквозь его плотную оранжевую атмосферу, состоящую из азота (90 %), аргона и метана (> 1

%), с давлением у поверхности 1,5 атм. Парниковый эффект увеличивает температуру лишь на 3–5 К, поэтому на Титане довольно холодно – около -179 °С. Облака атмосферы на 15-километровой высоте почти целиком состоят из капелек метана: возможно, на Титане идут метановые дожди. Титан обладает своеобразной гидросферой. На поверхности планетоида существуют открытые этано-метановые бассейны – озера, моря и океан, занимающий целое полушарие; на их дне накапливаются тяжелые органические соединения. Крупнейший из материков сравним по размерам с Австралией. Вершины ярко-белых (возможно, водно-ледяных) горных массивов покрыты метановым снегом.

Внутреннее строение Титана: тяжелое силикатное ядро окружено мантией из водяного и аммиачного льда и аммонийных гидросульфатов. Кора состоит из аммиачного льда. Азотная атмосфера образовалась при дегазации недр планетоида.

**Тритон** – силикатно-ледяной спутник Нептуна массой  $2,14 \cdot 10^{22}$  кг, диаметром 2700 км и сравнительно высокой средней плотностью  $2,07 \text{ г/см}^3$ . Тритон имеет очень большое (1000 км) силикатное ядро, окруженное тоненькой (25–30 км) ледяной мантией, над которой простирается глобальный водяной океан глубиной 150 км, прикрытый толстой ледяной корой (180 км). На поверхности Тритона обнаружены кратеры, горы, каньоны и вулканы.

Температура поверхности планетоида всего 38 К, равнины Тритона покрывает 6-метровый слой снега из замерзшего азота, этана и этилена. В сильно разреженной (в 67000 раз разреженнее земной) атмосфере, состоящей из азота и метана, наблюдается дымка и легкие облака. У полюсов в небо бьют 8-километровые гейзеры.

Торможение приливным трением ведет к медленному сближению с Нептуном. Через 3,6 млрд. лет (по другим данным – позже) Тритон войдет в пределы зоны Роша и будет разрушен (упадет на Нептун).

**Транснептуновые объекты.** В 1977 г. был открыт Хирон размерами около 200 км, двигавшийся на расстоянии 16,7 а.е. от Солнца – первый представитель группы «кентавров» (в настоящее время известно свыше 10 подобных планетных тел). К началу XXI в. было открыто свыше 300 силикатно-ледяных и ледяных планетоидов размерами от 150 до 800 км. Крупнейшие объекты пояса Койпера (при альбедо 4 %) имеют размеры: 2000 WR<sub>106</sub> Варуна – до 1100 км, 2001 KX<sub>76</sub> около 960-1270 км, 2002 LM<sub>60</sub> Квавар – 1300 км. Вблизи перигелия они могут обладать разреженной атмосферой. Все они движутся за

пределами орбиты Нептуна, на расстоянии свыше 6,5 млрд. км (43 а.е.) от Земли и входят в состав пояса Койпера, существование которого было предположено в 1949 г. К. Эджвортом и в 1951 г. Дж. Койпером. По предварительным оценкам пояс Койпера состоит из 100 000 ярко-красных реликтовых планетезималей и объектов, большая часть которых по своему химическому составу представляют собой нечто среднее между кометами и силикатными астероидами и состоят в основном из льда и замерзших газов  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  и других сложных углеводородов и органических соединений, насыщенных углеродом и азотом. Общая масса объектов пояса Койпера около  $10^{26}$  кг ( $100 M_{\oplus}$ ). Объекты пояса Койпера подразделяются сейчас на два семейства: «классические объекты» (60 %) и «Плутино» (40 %), имеющих орбиты в резонансе 3/2 с орбитой Нептуна, с большой полуосью около 39 а.е. и периодом обращения около 240 лет. Так, объект 2000 WR106 обладает следующими орбитальными характеристиками: большая полуось орбиты  $a = 43,27$  а.е., эксцентриситет  $e = 0,055$ , период обращения вокруг Солнца 285 лет. Не исключено существование нескольких слоев – колец, разделенных промежутками, в которых движутся особо массивные планетоиды. Возможно, крупнейшими объектами пояса Койпера являются Плутон, Харон, а также Тритон и некоторые другие спутники планет-гигантов, захваченные ими в давние времена. Значительная часть транснептуновых объектов имеет спутники или является двойными (бинарными) и даже кратными системами (1998 WW31 и др.), компоненты которых сравнимы по массе и размерам. Пояс Койпера является источником большинства короткопериодических комет.

• **Метеороиды: астероиды, кометы, кентавры. Метеоры, болиды, ме-**

**теориты. Проблемы метеороидной бомбардировки Земли**

В настоящее время известно более 130 000 астероидов, в том числе около 20 000 крупных, размерами свыше 1 км. Ежегодно открывается десятки новых «малых планет». Первая сотня астероидов была названа именами древнеримских и древнегреческих богинь, затем астрономы обратились к именам богов из мифов других народов, когда же их запасы иссякли, ученые стали давать астероидам имена героев эпоса. В наши дни астероиды именуются в честь великих людей, выдающихся ученых, философов, национальных героев. Астероид № 852 назван Владлена в честь В. И. Ленина, № 1000 – Пиация, № 1001 – Гауссия, № 1772 –

Гагарин, № 1709 – Руднева и т. д. Право дать название астероиду принадлежит его первооткрывателю и утверждается затем решением международной комиссии ученых. К началу XXI в. пронумеровано свыше 56 000 астероидов, 9000 из них даны имена.

Группы астероидов, движущиеся по сходным орбитам и, вероятно, связанные общностью происхождения (для некоторых из них ученые реконструировали родительские тела), называются семействами астероидов. Так, семейство Эос насчитывает 477 астероидов, семейство Фемиды – 550 и т.д.

Орбиты 98 % астероидов лежат между орбитами Марса и Юпитера, на расстоянии от 2,2 а.е. до 3,2 а. е. от Солнца и представляют собой незамкнутые эллиптически подобные витки с небольшими периодическими колебаниями основных характеристик (большой полуоси, эксцентриситета, наклона к плоскости эклиптики и т.д.), аналогичными прецессии земной оси. Линейная скорость движения астероидов около 20 км/с, период обращения вокруг Солнца от 3 до 9 лет, эксцентриситет орбит  $0 < e < 0,2$ ; наклон орбит к плоскости эклиптики  $5^{\circ}$ – $10^{\circ}$ . Приливное воздействие Юпитера и Марса разделило пояс астероидов на несколько колец «люками Кирквуда» – областями, в которых малые планеты почти не встречаются.

Известно свыше 100 из предположительно 200000 астероидов, периодически сближающихся с орбитой Земли, из них свыше 500 имеют размеры более 1 км (16 % из них – двойные). Большая часть их принадлежит к семейству Амура, Аполлона и Атона, проникающих внутрь земной орбиты. Некоторые могут сближаться с Землей до опасного расстояния менее 1 миллиона километров; в том числе 40 километровый Ганимед и 20километровый Эрос. Некоторые астероиды имеют орбиты, сближающиеся в перигелии с Венерой или даже Меркурием. Астероид Икар проходит перигелий в 28 миллионах км от Солнца. Теоретически возможно существование астероидов-«вулканоидов», вращающихся вокруг Солнца внутри орбиты Меркурия. Известны астероиды (названные в честь героев Троянской войны), орбиты которых лежат в точках Лагранжа на орбите Юпитера. Есть астероиды, вращающиеся между Юпитером и Сатурном.

Размеры и масса самых крупных астероидов: Церера – 1020×940 км; Паллада – 600 км,  $2,2 \cdot 10^{20}$  кг; Юнона – 525 км. Веста имеет поперечник 530 км, массу  $2,8 \cdot 10^{20}$  кг, на его поверхности обнаружен кратер диаметром 460 км и глубиной 13 км – результат столкновения с другим

гигантским астероидом. Они имеют почти сферическую форму и по своим физическим характеристикам являются силикатными планетоидами. Большая часть известных астероидов имеет размеры в несколько десятков километров и бесформенную структуру, поверхность их изрыта кратерами ударного происхождения. По расчетам ученых в поясе астероидов между Марсом и Юпитером должно быть до  $10^6$  тел размерами свыше 1 км и миллиарды мелких каменных глыб. Средняя плотность вещества большинства астероидов 3-3,5 г/см<sup>3</sup>. Общая масса астероидного вещества до  $4,2 \cdot 10^{21}$  кг (до 1/1000  $M_{\oplus}$ ).

Химический состав астероидов весьма разнообразен. В зависимости от него астероиды делятся на группы P, D, C, B, F, G, T, S, M, Q, A, V, R, E. Наиболее многочисленны каменные, силикатные S-астероиды с альбедо  $0,08 < d < 0,4$ ; базальтовые или углистые, почти черные C-астероиды ( $0,03 < d < 0,6$ ), и металлические, почти целиком состоящие из никелистого железа M-астероиды ( $0,07 < d < 0,23$ ). Ряд малых планет «выпадает» из общей классификации и объединяется в особую U-группу: такова Церера, поверхность которой сложена своеобразными минералами, напоминающими земные глины и содержащими до 10 % воды; Церера обладает весьма разреженной атмосферой, газы которой непрерывно выделяются из недр планетоида. Некоторые астероиды обладают пористым строением – так, 52-километровая Матильда имеет плотность около 1,3 г/см<sup>3</sup>.

Некоторые астероиды имеют в качестве спутников астероиды меньшей массы: у 56-километровой Иды обнаружен 1,5-км спутник Дактиль; вокруг Евгении (214 км) вращается Маленький Принц (13 км) и т. д. Астероид Антиопа – двойной, состоящий из обращающихся вокруг общего центра тяжести 170-км объектов.

По опровергнутой гипотезе Г. Ольберса астероиды являются осколками разрушенной планеты (в результате приливного действия Юпитера или, по С.К. Всехсвятскому, вулканических процессов). С точки зрения современных ученых, астероиды являются обломками планетезималей, сформировавшихся на границе горячей и холодной зон протопланетного облака.

**Кометы** значительно отличаются от других планетных тел Солнечной системы характеристиками своего движения (элементами орбит). Наряду с кометами, вращающимися вокруг Солнца по эллиптическим орбитам с различным эксцентриситетом – от  $e \approx 0,1$  (кометы Швассмана-Вахмана-1, Отерма и др.) до  $e \approx 0,95$  (кометы Галлея,

Ольберса и т. д.), существуют кометы, движущиеся по параболическим ( $e = 1$ ) и даже гиперболическим орбитам ( $e > 1$ ), проникающие внутрь Солнечной системы единственный раз за всю историю своего существования. Столь же разнообразны углы наклона кометных орбит к плоскости эклиптики – от  $i \approx 1^\circ$  (комета Кодзимы и др.) до  $i \leq 180^\circ$  (кометы Хейла-Боппа, Галлея и т. д.). Известно свыше 150 комет, «царапающих Солнце», которые в перигелии проникают внутрь орбиты Меркурия (комета Икейя-Секи, комета 1882 г. и др.). Многие кометы сближаются с Солнцем на расстояние свыше 2–3 а. е. (кометы Вольфа, Нейумина и т. д.).

В настоящее время известно свыше 2000 комет, у половины которых вычислены характеристики орбит. Кометный каталог Б. Марсдена содержит сведения о 947 комете, наблюдавшихся до 1997 г. Из них около 25% (свыше 200 известных) комет являются **короткопериодическими**, с периодом обращения до 200 лет. Все короткопериодические кометы можно разделить на **семейства комет** по близости афелия кометной орбиты к орбитам планет. Большая часть «царапающих Солнце» комет объединяется в семейство Крейца (по фамилии ученого, указавшего на их сходство в конце XIX в.). Семейство Юпитера насчитывает свыше 120 комет ( $1,4 \leq a \leq 8,5$  а.е.;  $T \approx 3,3\text{--}15$  лет); семейство Сатурна свыше 15 комет (период обращения  $T \approx 10,99\text{--}17,93$  лет); семейство Урана свыше 5 комет; семейство Нептуна – более 10 комет (в том числе комету Галлея). Кометы с периодом обращения свыше 200 лет называют **долгопериодическими** (более 230 комет). К концу XX в. ученым стало известно свыше 380 комет с параболическими орбитами и более 150 комет с гиперболическими орбитами. Предполагается существование «кометных колец» Казимирчак-Полонской, подобных кольцу астероидов, между орбитами планет-гигантов. Элементы орбит комет при сближении с планетами-гигантами сильно изменяются под действием возмущений со стороны планет.

Источником подавляющего числа короткопериодических комет являются «кометные пояса» и пояс Койпера, расположенный на расстоянии 35-50 а.е. от Солнца и содержащий до 200 миллионов кометных ядер. Орбиты кометных ядер в облаке Хиллса относительно устойчивы.

Гипотеза Лагранжа-Всехсвятского предлагает в качестве источника хотя бы части короткопериодических комет вулканические извержения на поверхности силикатно-ледяных спутников планет-

гигантов: согласно этим предположениям, «родительским телом» кометы Галлея может быть спутник Нептуна Тритон; кометы Хейла-Боппа – спутники Урана Миранда или Ариэль и т.д.

Источником параболических и гиперболических комет является облако Оорта. Гравитационные поля звезд, перемещающихся вблизи Солнечной системы, изменяют почти круговые орбиты кометных ядер облака Оорта и некоторые из них влетают вглубь Солнечной системы, попадая под возмущающее действие планет-гигантов, другие покидают Солнечную систему навсегда. Ежегодный приток комет внутрь Солнечной системы составляет от 5 до 10 в год. По расчетам некоторых ученых за время существования Солнечной системы облако Оорта вдвое поредело.

Существует гипотеза о межзвездном происхождении части комет, ядра которых конденсируются в плотных газопылевых туманностях ГМО. При прохождении Солнечной системы сквозь спиральные рукава Галактики некоторое количество кометных ядер захватывается из межзвездного пространства гравитационными полями Солнца и планет.

Хотя известны десятки комет, сделавших свыше 10 оборотов вокруг Солнца, гибель периодической кометы в результате полного испарения и разрушения ядра всего лишь вопрос времени: согласно расчетам, при прохождении перигелия они теряют 0,1-0,5 % массы, при этом их блеск уменьшается на  $0,04^m - 0,01^m$  за один оборот. Короткопериодические кометы «живут» 300-600 лет, долгопериодические – до 1 миллиона лет. Полное испарение летучих компонентов или образование тонкой тугоплавкой коры на поверхности ядра может оттянуть ее смерть, уподобить короткопериодическую комету астероиду с эксцентричной орбитой.

В последние годы открыты десятки «промежуточных» объектов, сочетающих свойства астероидов и комет: движущихся по типично «кометным» орбитам, но лишенных кому и хвоста; или кометообразных, но вращающихся вокруг Солнца по орбитам с малым эксцентриситетом. Вероятно, они представляют собой «угасшие» кометы, ядро которых покрыто спекшимся тугоплавким слоем пыли и минеральных пород. В их число входят периодически сближающиеся с Землей Ра-Шалом ( $D \approx 3,4$  км), Адонис и Фаэтон ( $D \approx 6,9$  км) – прародитель метеорного потока Геминид.

Ежегодно открываются десятки новых комет, причем 90 % из них – любителями астрономии. Дж. Бредфилд (Австралия) открыл к 1988 г. 13

комет, К. Икейя (Япония) – 11 комет, К.И. Чурюмов (СССР) – 2 кометы и т.д. Каролина Шумейкер открыла к концу 2000 г. 30 комет. Комете присваивается имя ее первооткрывателя: комета Бредфилда, комета ИкейяСеки, комета Чурюмова-Герасименко (до 3 имен первооткрывателей). В последние годы большое число комет было открыто в околосолнечной области с помощью космических обсерваторий SOHO (100 комет к концу 2000 г.) и LINEAR (50 комет).

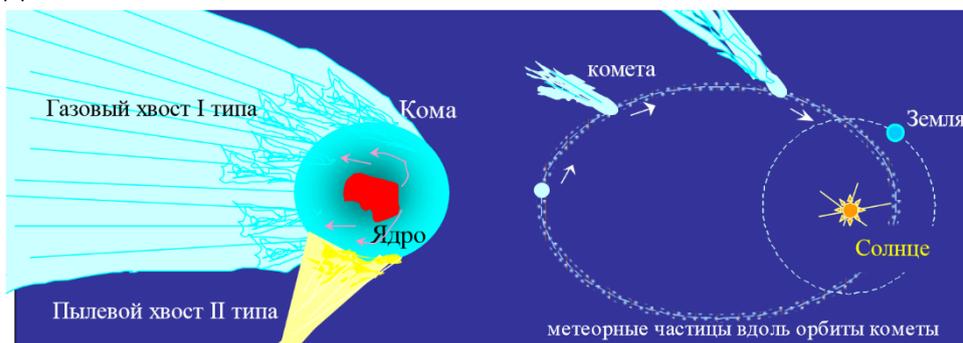
С давних времен появление кометы на небе вызывало среди людей ужас и панику (кроме Древнего Китая, где кометы рассматривались как чрезвычайные послы Неба к его Сынуимператору). В Европе считали, что кометы предвещают смерть монархов и других правителей, а также всевозможные стихийные бедствия и войны. Суеверия дожили до конца XX в.

В 1986 г. советские АМС «Вега» прошли на расстоянии 8500 км от ядра кометы Галлея, проведя исследования ядра и атмосферы кометы совместно с АМС «Сакигаке» (Япония) и «Джотто» (ЕЭС). В 2001 г. были проведены исследования ядра кометы Борелли (АМС «Дип Спейс-1», США).

По современным данным на больших расстояниях от Солнца кометы представляют собой глыбы твердого вещества: смеси водяного и метанового льда, замерзших газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{CH}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{CS}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$  и др.) с замороженными в нее обломками горных пород и мелкой пылью. Плотность кометного ядра около  $1,0 \text{ г/см}^3$ . Размеры кометных ядер от 50 м до 50 км. Родительское тело семейства Крейца, вероятно, имело размеры около 120 км. Ядро «суперкометы» 2000 CR<sub>105</sub> может достигать в размерах 400 км.

С приближением к Солнцу на расстояние менее 11 а.е. вещество кометного ядра начинает нагреваться и сублимироваться, образуя газопылевую атмосферу кометного ядра – кому или оболочку кометы размерами  $10^4$  -  $10^6$  м. Дополнительными источниками энергии вещества кометных ядер могут быть химические реакции, в том числе взрывного характера. Взаимодействие солнечного ветра и давление солнечного света на разряженное вещество – ионизированный газ и пыль оболочки – на расстоянии 3 – 4 а.е. от Солнца порождает кометные хвосты протяженностью до 500000000 км, плотностью  $10^{-18}$  атм (1 частица/100 м<sup>3</sup>) и называемых потому «видимым ничто». Согласно классификации Ф. А. Бредихина, хвосты комет разделяются на 3 типа: Хвосты I типа образованы ионизированными атомами и молекулами газа, которые со

скоростью 10– 102 км/с уносятся от ядра потоками солнечного ветра и давлением солнечных лучей.



Хвосты I типа имеют цилиндрическую форму, поперечник  $2-3 \cdot 10^4$  км и голубоватый цвет.

Хвосты II типа – пылевые, желтые, изогнутые, отклоняющиеся назад по отношению к орбитальному движению.

Хвосты III типа образуются в результате мощного выброса пылевых частиц из ядра.

При различных взаимных положениях Солнца, Земли и кометы основные, газовые хвосты I типа всегда направлены в противоположном от Солнца направлении; хвосты II типа и III типа могут по-разному проецироваться на небо, иногда даже в направлении Солнца (такой аномальный хвост наблюдался у кометы Аренда-Ролана).

Пространство Солнечной системы заполняет **межпланетная среда**: разреженная материя, концентрирующаяся в плоскости эклиптики и составляющая до 0,000000000001 % массы нашей планетной системы; основными ее компонентами являются: 1) **солнечный ветер**: потоки заряженных частиц (e, p) со скоростью  $10^2 - 10^4$  м/с и плотностью до  $10^3$  частиц/см<sup>3</sup>, «выдувающие» частицы космического газа за пределы Солнечной системы; 2) галактические космические лучи с энергией  $10^6 - 10^9$  эВ; 3) **межпланетное магнитное поле** – уносимое солнечным ветром магнитное поле Солнца, его напряженность вблизи Земли составляет от  $2 \cdot 10^{-5}$  Э до  $8 \cdot 10^{-4}$  Э и зависит от уровня солнечной активности; 4) **межпланетная пыль** – метеорные частицы массой

$10^{-17} - 10^{-14}$  кг, размерами  $10^{-9} - 10^{-4}$  м и концентрацией от  $10^{-25}$  до  $10^{-19}$  кг/м<sup>3</sup> (1 частица на 1-50 км<sup>3</sup>).

Общая масса космической пыли в Солнечной системе  $10^{16} - 10^{17}$  кг; 2/3 пылинок имеют массы 0,00001–0,001 г, округлую форму и силикатный или органический состав. Межпланетная пыль образует облако в форме эллипса с соотношением осей 1:7 с максимальной

концентрацией частиц в плоскости эклиптики по направлению к Солнцу; на расстоянии свыше 5 а.е. космическая пыль почти отсутствует. Частицы движутся по спиральным траекториям, сталкиваясь с планетными телами, падают на Солнце (время жизни отдельных частиц составляет  $10^4$ - $10^5$  лет).

Отраженный и рассеянный пылью солнечный свет создает очень слабое свечение, наблюдаемое на земном небе после захода Солнца в виде светового конуса вдоль эклиптики и называется **зодиакальным светом**. Рассеяние солнечного света более далекими от Солнца пылинками порождает еще более слабое пятно света – **противосияние** в противоположной от Солнца точке неба.

Часть межпланетных пылинок генерируется системой Юпитера; обнаружен поток межзвездных пылинок, пересекающих Солнечную систему со скоростью свыше 42 км/с. Основным поставщиком космической пыли в Солнечной системе являются кометы. При прохождении вблизи Солнца комета теряет часть своего вещества: мелкие силикатные обломки, пыль и газ растягиваются вдоль всей орбиты кометы и постепенно под действием возмущений рассеиваются в межпланетном пространстве. Скорость движения этих метеорных тел (пылинок и камешков) по отношению к Земле составляет от 11,2 до 76 км/с в зависимости от того, догоняют ли они Землю или летят ей навстречу.

При вторжении метеорного тела в атмосферу Земли наблюдается световое явление – **метеор**. При торможении метеорного тела в атмосфере на высоте от 120 до 80 км над землей оно нагревается, плавится, дробится на мелкие части, распыляется и испаряется. При столкновениях испарившихся молекул с молекулами и атомами воздуха происходит их распад на атомы, возбуждение и ионизация. Наблюдатель видит свечение раскаленных паров метеорного тела и газов атмосферы вокруг него.

Ежесуточно во всем небе Земли наблюдается до  $10^6$  метеоров.

Яркость метеора зависит от его массы и скорости. Видимые невооруженным глазом метеоры порождаются частицами массой от 0,5 г до 0,1 кг. Более массивные и крупные порождают особо яркие метеоры ( $V \geq -3^m$ ), называемые **болидами**. Блеск болидов доходит до  $-19^m$ .

98 % метеоров порождаются частицами кометного вещества, 1-2 % обломками астероидов, менее 0,001 % метеоров могут быть пылинками галактического происхождения. Полный суточный приток

метеороидного вещества в интервале масс  $10^{-15}$  -1 кг составляет от  $3 \cdot 10^4$  до  $10^5$  кг. За год в атмосфере и на поверхности Земли осаждается  $3 - 6 \cdot 10^7$  кг метеорного вещества. За счет этого притока за последние 4 миллиарда лет масса земной коры увеличилась на 5 %.

Ежегодно в определенные даты при пересечении Землей орбиты какой-либо кометы, вдоль которой растянулось облако метеорных частиц, в атмосфере Земли наблюдаются потоки метеоров, порождаемые большим количеством частиц со сходными физико-химическими характеристиками (состав, скорость и др.), движущимися по почти параллельным траекториям. Вследствие явления перспективы земному наблюдателю кажется, что все эти метеоры вылетают из одной точки (чаще – небольшого участка) небесной сферы – **радианта (площади радиации)** метеорного потока. Известно около 1000 метеорных потоков. Так, комета Галлея порождает 2 ежегодно наблюдаемых метеорных потока – Ориониды (с 15 по 25 октября) и Майские Аквариды (с 28 апреля по 9 мая) с часовым числом  $n$  до 35 метеоров в час. Названия метеорным потокам даются по созвездиям, в которых находится их радиант, иногда с указанием ближайшей к нему звезды созвездия.

В **звездный дождь** наблюдается до 10000 метеоров в час. В дождь Леонид 16 – 17 ноября 1966 г. ежечасно наблюдалось от 60 000 до 140 000 метеоров!

Мельчайшие, не испарившиеся до конца, пылинки плавают в верхних слоях атмосферы и служат центрами конденсации водяных паров. Так из крохотных льдинок на высоте до 80 км образуются **серебристые и жемчужные облака**.

В отдельных случаях крупные метеорные тела не успевают полностью разрушиться и испариться при своем движении в атмосфере и после полного торможения выпадает на поверхность Земли **метеоритами** (до 2000 в год). В настоящее время в различных районах Земли найдено свыше 20 000 метеоритов. Почти все они являются мелкими обломками астероидов. Известны метеориты – осколки ядер комет, десятки метеоритов являются обломками лунных пород, выброшенных в космос взрывами на поверхности Луны, найдено 14 метеоритов марсианского происхождения. Вплоть до настоящего времени метеориты являются едва ли не единственными образцами вещества внеземного происхождения, которые ученые могут подробно изучать в земных лабораториях. Масса обнаруженных метеоритов от долей грамма до десятков и сотен тонн.

В зависимости от химического состава метеориты делятся на 3 группы:

1. **Каменные** метеориты (92 % от общего числа). Подразделяются на: хондриты (85,7%), состоящие из железомagneзиальных силикатов (оливина  $(\text{Fe},\text{Mg})\text{SiO}_4$  – 25–60 %, гиперстена и бронзита  $(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$  (20–35 %), никелистого железа (8–21 %) и сульфата железа  $\text{FeS}$  (5 %). Углистые хондриты содержат от 2 до 8 % углистого вещества, 20 % воды и, предположительно, наиболее близки по составу к веществу протопланетной туманности. Некоторые ученые считают эти редкие метеориты обломками кометных ядер. Ахондриты (7,2 %) отличаются малым содержанием железа, никеля, кобальта, хрома и, предположительно, образуются при переплавке хондритового вещества в недрах массивных родительских тел.

Родительским телом базальтовых ахондритов (6 % метеоритов) является астероид Веста.

2. **Железокаменные** метеориты (2 % от общего числа) состоят наполовину из металла, наполовину из силикатов и представляют собой металлическую (оливиновую) губку, в порах которой расположены силикаты или, наоборот, силикатную губку с включениями никелистого железа.

3. **Железные** метеориты (6 %) на 98 % состоят из никелистого железа. Крупнейшим из найденных метеоритов является Гоба размерами 2,95×2,84 м, массой 60 тонн (ЮАР).

Предполагается, что вещество железокаменных и железных метеоритов сформировалось соответственно в мантии (на границе мантии и ядра) и в ядре планетных тел с дифференцированным внутренним строением, разрушенных около 4,3 млрд. лет назад в результате катастрофического столкновения со сравнимым по массе объектом или приливного действия планеты-гиганта.

Повышенное по сравнению с земными породами содержание никеля (от 3 до 21 %) является одним из главных отличительных признаков метеорита. Другими являются наличие коры плавления, вмятины (регмаглипты), образовавшиеся при полете в атмосфере и т.д.

Метеорные тела массой в сотни и тысячи тонн, астероиды и кометные ядра пробивают атмосферу Земли и сталкиваются с ее поверхностью со скоростью от 1 до 75 км/с. Происходит мощный взрыв с образованием воронки – кратера ударного происхождения.

В настоящее время известно около 200 астероидов, периодически сближающихся с Землей на расстояние менее 1 млн. км; общее число таких астероидов ученые оценивают в 20-30 тысяч. 9 декабря 1994 г. астероид 1994XM<sup>1</sup> был обнаружен за 9 часов до максимального сближения – 100 000 км от Земли.

Вероятность столкновения Земли с астероидом оценивается по формуле:

$N(D) = 2 \cdot D^{1.58}$ , где  $N(D)$  – период времени (лет),  $D$  – размеры астероида (м).

Объекты размерами до 50 м сталкиваются с Землей в среднем раз в 600 лет (масса Сихоте-Алиньского метеорита, упавшего в 1947 г. на Дальнем Востоке, составляла 100 тонн) и способны произвести разрушения на площади до 100 км<sup>2</sup>. Астероиды размерами до 500 м падают на Землю раз в 60000 лет и вызывают локальные повреждения ее поверхности взрывом мощностью до 10 Мт (Аризонский метеорит, кратер имеет диаметр 200 м и возраст 5000 лет). Падение астероида от 0,5 до 2 км ведет к взрыву мощностью до 10<sup>6</sup> Мт тротилового эквивалента и катастрофе регионального характера: разрушения и пожары охватывают площадь до 10<sup>7</sup> км<sup>2</sup>. Столкновение Земли с астероидом размерами более 2 км происходит реже, чем раз в 1 миллион лет, однако взрыв мощностью свыше 2·10<sup>4</sup> Мт ведет к катастрофам глобального масштаба. Помимо разрушений, вызванных ударной волной, пожарами и цунами, опустошающими континенты на сотни километров от берега, в атмосфере значительно возрастает концентрация окислов азота, взрыв выбрасывает в стратосферу миллионы тонн мельчайшей пыли, порождающих эффект «ядерной зимы» или, наоборот, разогревающих атмосферу. Столкновение Земли с объектами размерами свыше 10 км происходит в среднем каждые 63 миллиона лет.

При столкновении Земли с 10-километровым астероидом, движущимся со скоростью 16–17 км/с, мощность взрыва составляет десятки тысяч мегатонн тротилового эквивалента. Образуется кратер диаметром до 100 км, глубиной 1–2 км. Миллиарды тонн пыли, выброшенной взрывом в верхние слои атмосферы Земли, преграждают путь солнечным лучам и вызывают эффект «ядерной зимы» с глобальным падением среднегодовых температур на 10–40 К на протяжении десятков и сотен лет и вызывают массовое вымирание живых организмов. На поверхности Земли обнаружено свыше 250

кратеров-астроблей («звездных ран») размерами от 1 до 150 км. Кратер Мороквен размерами 120×340 км образовался на границе между юрским и меловым периодом 142,8 – 147,7 миллионов лет назад. Возникший на границе мезозойской и кайнозойской эры 65 млн. лет назад кратер Хиксулуб (полуостров Юкатан) имеет размеры 180×280 км. Кратеры Попигай и Чесапик-Бей возникли на границе эоцена и олигоцена 35,2 – 35,7 миллиона лет назад.

В 1992 г. в Санкт-Петербурге при институте теоретической астрономии был создан международный институт проблем астероидной опасности. Почти одновременно в США был издан труд: «Космическая бомбардировка: способы и соображения об эффективной системе перехвата объектов, бомбардирующих Землю».

Предлагается создание глобальной системы контроля космического пространства, начало развертывания которой намечено на первое десятилетие XXI в. Для защиты Земли от небольших объектов эффективно применение термоядерного оружия: для полного распыления объекта размерами в 50 м достаточен заряд мощностью 0,8 Мт. Для полной безопасности взрыв должен производиться за 40 и более суток до столкновения. Более крупные, свыше 500 м, астероиды следует отклонять от «роковой» траектории полета серией последовательных взрывов на их поверхности. Взрыв мощностью 1 Кт на поверхности объекта диаметром 1 км изменяет его скорость на 0,15 м/с. Для управления движения астероида диаметром до 45 км требуются заряды мощностью до 100 Мт. Другими вариантами противодействия могут стать воздействие на астероид мощным лазерным или СВЧ-излучением, столкновения с ним астероидов меньшей массы, создание на его пути облака мелких частиц. Если до столкновения астероида с Землей остается достаточно много времени, траекторию его движения можно изменить за счет эффекта Ярковского, изменив альбедо поверхности (перекрасив ее или побелив).

Разработана шкала астероидной опасности (Р. Бинзел, США), утвержденная в 1999 г. Международным астрономическим союзом. Все потенциально опасные объекты с учетом их массы, размеров, геоцентрической скорости и вероятности столкновения с Землей делятся на 11 категорий. Объекты нулевой категории не представляют опасности (не могут столкнуться с Землей или (при размерах до 10 м) практически полностью разрушаются в атмосфере); объекты 1-4 категории требуют внимания; объекты 5-7 категорий являются

угрожающими; объекты 8-10 категории сталкиваются с Землей, вызывая катастрофу различных масштабов; объекты 11 категории становятся причиной глобальных катастроф.

Наиболее рационально не уничтожать, а изменять орбиты астероидов так, чтобы они становились спутниками Земли для последующей добычи полезных ископаемых. Для транспортировки астероида может быть использован бескамерный солнечно-термический реактивный двигатель (СТРД). Реактивная струя (газопылевой выброс) возникает при нагревании небольшого участка поверхности астероида до высоких температур зеркальным солнечным отражателем.

Каменный астероид диаметром 1 км имеет массу около 2 млрд. тонн и на 88% состоит из кремния, магния, кислорода, на 10% из железа и на 2% из никеля и кобальта.

Железный астероид диаметром 1 км имеет массу 8,5 млрд. тонн и на 90% состоит из чистого железа, на 9,3% из никеля, на 0,69% из кобальта, на 0,01% из золота, платины и других элементов.

Для 4-5-летней транспортировки астероида диаметром 1 км с гелиоцентрической на геоцентрическую орбиту потребуется зеркало из тончайшей металлизированной полимерной пленки диаметром до 1 км массой до 100 кг.

Астероиды могут стать неисчерпаемыми рудниками человечества, местом постройки космических заводов, лабораторий и электростанций. Энергозатраты пилотируемого полета к астероиду на околоземной орбите существенно ниже, чем для полета на Луну.

Вещество астероида может быть использовано для создания экрана для глобального управления климатом Земли и предотвращения ее перегрева. Круглый полупрозрачный ячеистый экран, позволяющий изменять затеняющий эффект от нуля до расчетного значения, будет иметь массу от 200 до 800 млн. тонн и устанавливаться на расстоянии 2,36 млрд. км от планеты, в точке, где центробежная, гравитационная сила и сила светового давления уравновешивают друг друга. Экран для Венеры будет тяжелее – 32,5 млрд. тонн, но позволит снизить температуру ее поверхности до 56,6 °С, при которой углекислый газ атмосферы сконденсируется и выпадет в осадок, давление лишенной парникового эффекта, почти целиком состоящей из азота атмосферы понизится у поверхности до 2 атм. Венера станет доступной для колонизации землянами. Другими (более экономичными и реальными)

способами изменения венерианского климата является распыление в верхних слоях ее атмосферы большого количества мелкой пыли с целью вызвать эффект «ядерной зимы» с глобальным похолоданием и (или) «засев» атмосферы культурами генетически преобразованных фотосинтезирующих микроорганизмов (дальними родственниками сине-зеленых водорослей). Отражательные экраны-рефлекторы могут увеличить освещенность поверхности Марса. Значительное увеличение среднегодовых температур повысит, за счет испарения полярных шапок, плотность марсианской атмосферы и «включит» в ней парниковый эффект. Растаявшая криосфера возродит гидросферу Марса и увеличит содержание водяных паров в его атмосфере. Деятельность специально созданных высокопродуктивных фотосинтезирующих микроорганизмов, сине-зеленых водорослей и других растений приведет к изменению химического состава атмосферы – обогащения ее кислородом до приемлемого для дыхания состава. Люди смогут заселить Марс.