

## Атмосферы планет

В.Н. Витер

Наша планета покрыта слоем атмосферы толщиной в несколько сотен километров. Фактически мы живем на дне глубокого воздушного океана. Давление, которое оказывает воздух возле поверхности Земли, не постоянно: оно зависит от высоты над уровнем моря, географической широты и погоды. Однако эти колебания сравнительно невелики. Принято считать, что на уровне моря нормальное атмосферное давление равно  $101.3 \text{ кПа}^1$  (760 миллиметров ртутного столба или 1 атм), это примерно соответствует силе 1 кг, приложенной к площади в  $1 \text{ см}^2$ . Другими словами, воздух давит на каждый сантиметр поверхности с силой в 1 кг. Именно такое давление является для нас привычным. Пользуясь определением философов «человек – мера всех вещей» примем нормальное атмосферное давление за точку отсчета и попробуем совершить путешествие по нашей атмосфере и атмосферам других планет. Мы рассмотрим давление, температуру, состав и другие характеристики атмосферы Земли, атмосфер планет земной группы, спутников и космического пространства.

### Атмосфера Земли

Для начала познакомимся поближе с нашей атмосферой. Как мы уже упомянули, атмосферное давление не является строго постоянным. На уровне моря отмечены колебания в пределах 684 - 809 мм рт. ст. ( $91.19 - 107.86 \text{ кПа}$ ).

С высотой атмосферное давление постепенно уменьшается. Уже на высоте 2 км давление падает примерно до 600 мм рт. ст., на высоте 4 км – 460 мм рт. ст. Озеро Титикака расположено на плоскогорье между Перу и Боливией. Его высота над уровнем моря составляет 3812 м. Давление здесь примерно на треть ниже нормального. Потомки древних инков, которые живут на его берегах, имеют развитые легкие и повышенное содержание гемоглобина в крови. Туристы чувствуют себя на

<sup>1</sup> Паскаль (Па) – давление, которое оказывает сила в 1 Н на площадь в  $1 \text{ м}^2$ ,  $1 \text{ кПа} = 1000 \text{ Па}$ , 1 мм. рт. ст. равен  $133.32 \text{ Па}$ .

озере Титикака не совсем комфортно: в результате пониженного содержания кислорода наблюдается слабость, головные боли и быстрая утомляемость. Испанские конкистадоры после завоевания цивилизации инков столкнулись с неожиданной проблемой: на такой высоте европейские женщины не могли рожать здоровых детей. Чтобы адаптироваться европейцам понадобилось значительное время.





**Озеро Титикака – самое высокогорное среди судоходных озер**



**«Плавучий остров». Местные жители сооружают искусственные острова, которые дрейфуют по озеру**



Карта окрестностей озера Титикака



Вид озера Титикака из космоса

Согласно международным стандартам, начиная с высоты 4.7 км необходимо дополнительное снабжение кислородом пилотов и пассажиров самолетов. На высоте 5.5 км атмосферное давление составляет только половину нормального (примерно 380 мм рт. ст. или 50 кПа). Вода на такой высоте кипит при 81°C. Если мы поднимемся до высоты в 5.6 км, половина массы атмосферы останется внизу.



**Барометрический альтиметр (высотомер) – навигационный прибор, указывающий высоту полета**





Самая высокая точка Земли – вершина горы Эверест расположена на высоте 8.848 км над уровнем моря, но прежде, чем мы ее достигнем – на высоте 8.4 км, давление упадет до одной трети от нормального. На такой высоте вода закипает при 71°C. На высоте 16.1 км давление равно 1/10 атм, начиная с высоты в 16 км для пилотов одной кислородной маски уже недостаточно – необходимо искусственно поддерживать в кабине давление. Температура кипения воды при давлении 0.1 атм – всего 45°C.



**Гора Джомолунгма (Эверест) – самая высокая точка Земли**



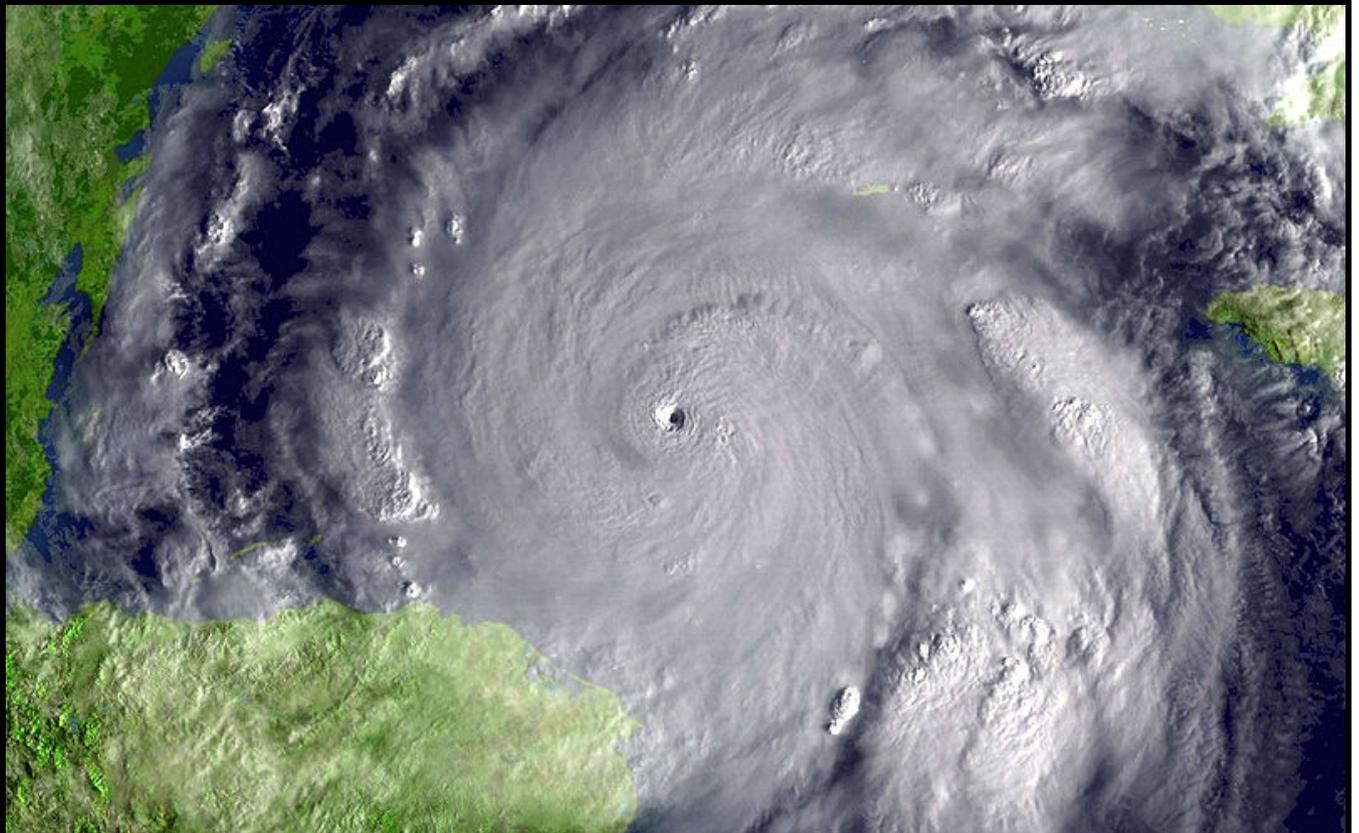


Пластиковая бутылка, которую закрутили на высоте 4.3 км, а потом опустили на высоту 2.7 км (рис. в центре) и 0.3 км (рис. справа). В результате возрастания давления бутылка сжимается



Сравнительно недавно люди использовали чернильные ручки. Такие ручки могли стать причиной серьезных неприятностей в самолете. Если заправленную чернилами ручку положить в карман и сесть в самолет, то в результате падения давления воздуха на высоте чернила вытекали наружу и пачкали одежду

Нижний слой атмосферы называется тропосферой. Ее верхняя граница находится на высоте 8-10 км в полярных, 10-12 км в умеренных и 16-18 км в тропических широтах, причем в зимнее время граница расположена ниже, чем летом. Тропосфера содержит более 80 % всей массы атмосферного воздуха и около 90 % всего имеющегося в атмосфере водяного пара. В тропосфере наблюдаются активные погодные давления. Тут сильно развиты турбулентность и конвекция воздуха, возникают облака, выпадают осадки, развиваются циклоны и антициклоны. Температура убывает с ростом высоты (в среднем на  $0.65^{\circ}\text{C}$  каждые 100 м).



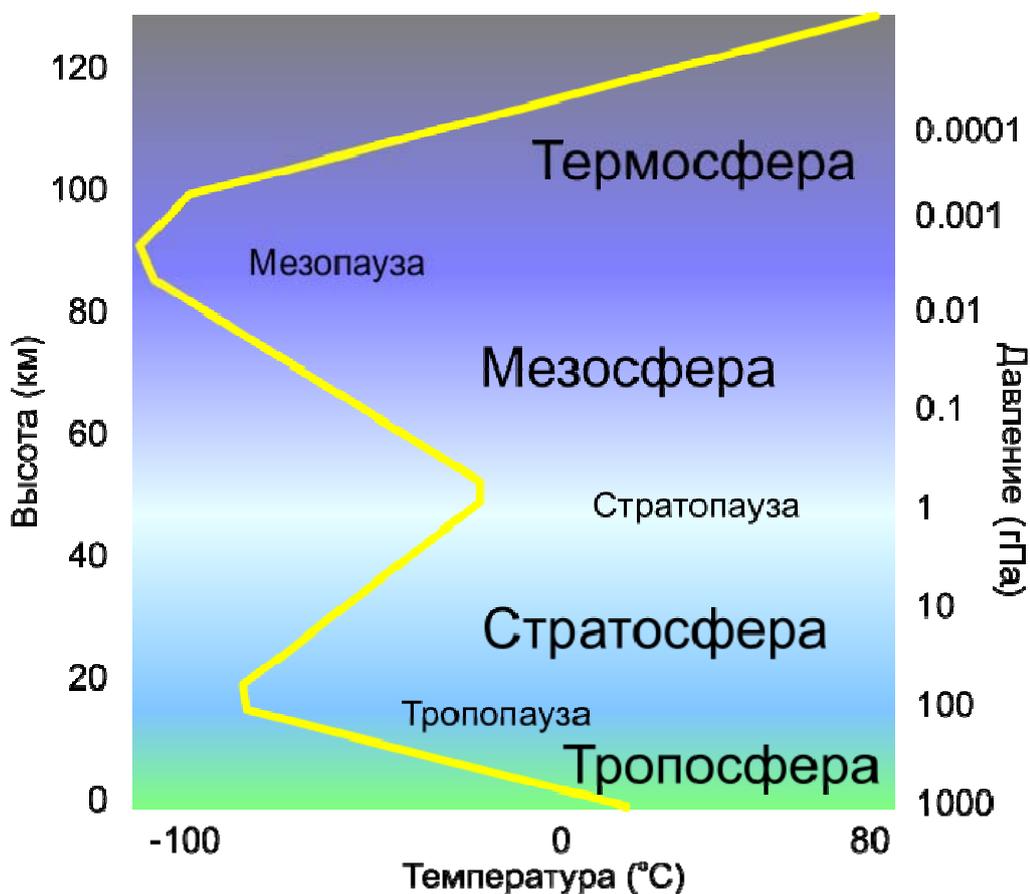
**Фотографии циклонов из космоса**

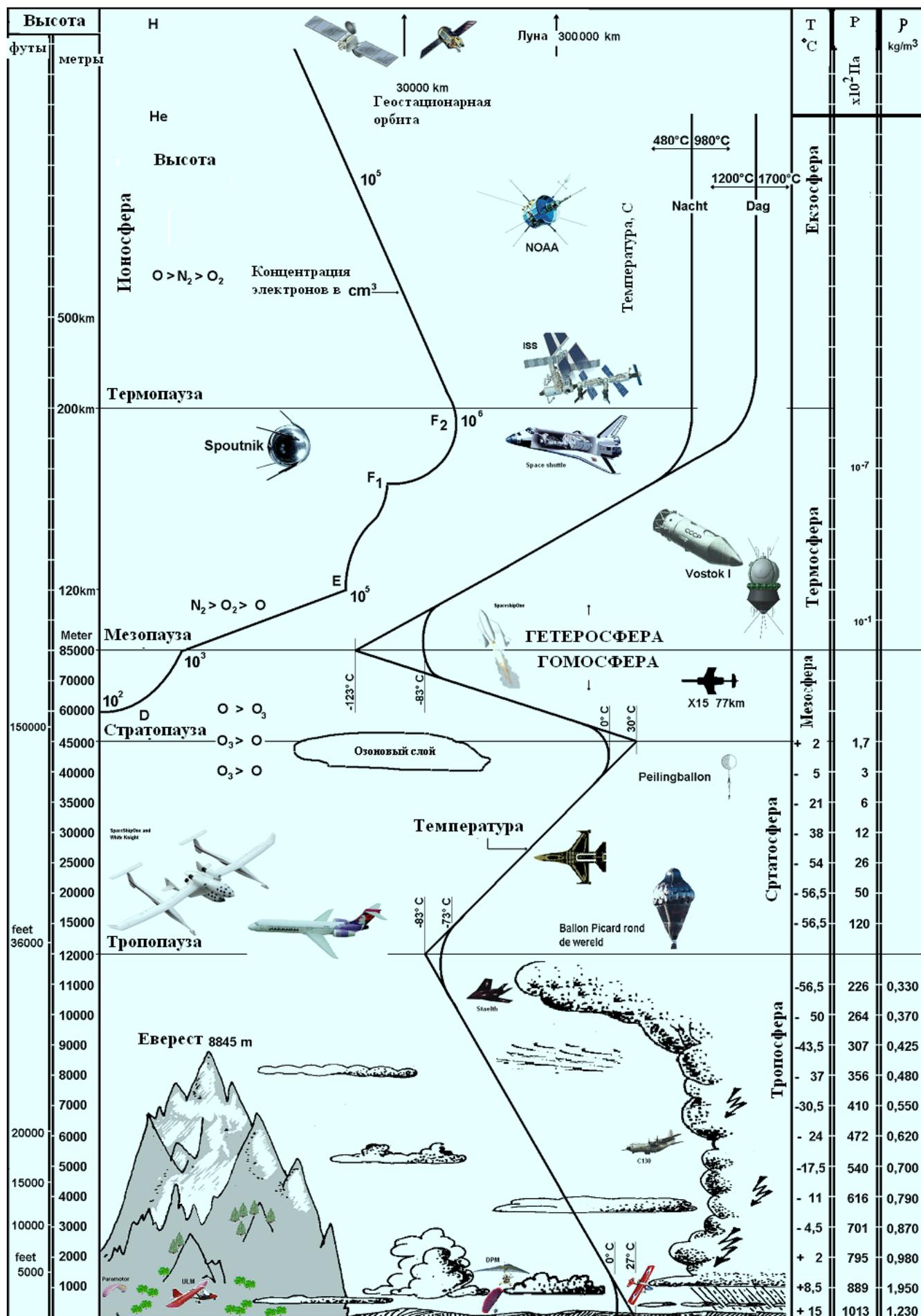
Над тропосферой на высоте от 11 до 50 км лежит стратосфера. Если в тропосфере температура понижается с высотой, то для стратосферы характерно незначительное изменение температуры на высотах 11-25 км (нижний слой стратосферы) и повышение ее в слое 25-40 км от  $-56.5$  до  $0.8^{\circ}\text{C}$  (верхний слой стратосферы или область инверсии). Достигнув на высоте около 40 км значения  $0^{\circ}\text{C}$ , температура остается постоянной до высоты примерно 55 км. Эта область постоянной температуры называется стратопаузой и является границей между стратосферой и следующим слоем – мезосферой.

В стратосфере воздух очень сухой – здесь почти нет водяного пара, а соответственно – и погодных явлений.

Выше 20 км вода кипит уже при комнатной температуре. На высоте 30.9 км давление составляет всего 1/100 от нормального, а вода закипает даже на холоде – при  $7^{\circ}\text{C}$ .

Высота в 32 км является предельной для самолетов с турбореактивными двигателями. Высота 45 км – предел для прямоочных воздушно-реактивных самолетов. Обычно боевые и сверхзвуковые коммерческие самолеты летают на высотах до 20 км.





Строение атмосферы Земли

Максимальная высота, на которую поднялся аэростат, управляемый человеком, находится чуть выше – 34.668 км<sup>2</sup>. Высотные метеозонды поднимаются до 40 км; рекорд для беспилотного аэростата составляет 51.8 км.

В стратосфере и более высоких слоях атмосферы происходит диссоциация молекул газов под действием ультрафиолетового излучения Солнца (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>). На высоте 200-500 км в ионосфере происходит также ионизация газов, на высоте 320 км концентрация заряженных частиц (O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>) составляет примерно 1/300 от концентрации нейтральных частиц. В верхних слоях атмосферы присутствуют свободные радикалы: OH•, HO<sub>2</sub>• и др.

Над стратосферой расположена мезосфера (на высотах от 40-50 до 80-90 км). В мезосфере сначала происходит повышение температуры с высотой – примерно до +50°C (высота около 60 км), после чего температура начинает убывать до -70° или -80°C. На высоте 48.5 км давление составляет всего 1/1000 от нормального, на высоте 69.5 км оно падает до 1/10000 атм, 86.3 км – до 1/100000.

В мезосфере наблюдается явление, которое довольно неприятно для исследователей. С одной стороны воздух в мезосфере слишком разрежен, чтобы поддерживать самолеты и аэростаты, с другой – в мезосфере слишком высокое давление, чтобы в ней могли летать спутники. Мелкие метеориты сгорают в основном в мезосфере.

Для полетов мезосфера представляет собой своего рода «мертвую зону». Прямые исследования мезосферы проводятся в основном с помощью суборбитальных метеорологических ракет; в целом мезосфера изучена хуже других слоев атмосферы, в связи с чем ученые прозвали ее «игноросферой».



<sup>2</sup> К этому полету мы еще вернемся в следующих номерах журнала



Стратосферные или "перламутровые" облака – очень редкое явление, зафиксированное всего около ста раз за всю историю физики атмосферы. Такие облака формируются на высотах от 15 до 25 км в холодных областях стратосферы (температура ниже  $-78^{\circ}\text{C}$ )





Серебристые или мезосферные облака образуются в мезосфере на высотах около 80-85 км. Они наблюдаются только летом, в северном полушарии – как правило, с мая по август на широтах от 45 до 80 градусов, в южном полушарии их можно наблюдать в более низких широтах от 40-60 градусов. Попытки обнаружить эти облака над другими широтами положительных результатов не принесли. Однако значительная высота распространения

облаков, позволяют наблюдать их в радиусе 1000 км.

Предполагается, что серебристые облака состоят из вулканической или космической пыли либо из ледяных кристаллов. Вероятно, что водяной пар для их формирования попал на такие высоты в результате турбулентной диффузии снизу или при извержении вулканов. Голубовато-серебристое свечение серебристых облаков, судя по его спектру, является не только рассеянным солнечным светом, но и фотолюминисценцией кристалликов льда под действием ультрафиолетового излучения Солнца.

Фотографии перламутровых и серебристых облаков приведены в конце раздела

Химия и другие науки

Над мезосферой находится термосфера, причем два этих слоя разделены переходной зоной – мезопаузой. В мезопаузе наблюдается самая низкая температура в атмосфере (примерно  $-100^{\circ}\text{C}$ ).

На высоте 80-90 км начинается термосфера, которая простирается до 700 км. Термосфера – самый протяженный слой земной атмосферы. Температура в этой области сильно зависит от солнечной активности и может достигать  $1500^{\circ}\text{C}$  и более.

На высоте 100 км расположена линия Кармана, которая считается «официальной» границей между космосом и атмосферой.

Эта линия имеет условное значение, поскольку четкой границы между атмосферой и космосом не существует, зато любой полет выше линии Кармана признается космическим.

Первые заметные проявления атмосферы во время возвращения на Землю с орбиты наблюдаются на высоте 120 км, краткосрочная орбита (до нескольких дней) возможна на высоте 200 км, наиболее низкая орбита с долгосрочной стабильностью (до нескольких лет) возможна начиная с высоты 350 км. Пилотируемые орбитальные полеты происходят преимущественно на высотах от 200 до 500 км. Ниже 200 км сильно сказывается тормозящее действие воздуха, а выше 500 км простираются радиационные пояса, которые представляют серьезную угрозу для здоровья людей. Полет Международной космической станции происходит на высотах между 320 и 380 км.

На высоте 500 км давление составляет всего  $10^{-11}$  атм (одну стотриллиардную долю от нормального атмосферного давления).

В термосфере наблюдаются полярные сияния, которые являются результатом бомбардировки атмосферы Земли частицами солнечного ветра. Получив энергию,

атомы кислорода и азота переходят в возбужденное состояние. Возбужденное состояние нестабильно, поэтому атомы излучают квант света, возвращаются в основное энергетическое состояние. Кислород излучает зеленый или коричневатокрасный свет, азот – красный или голубой. Красное свечение кислорода наблюдается на высотах 200-400 км, а совместное свечение азота и кислорода – на высоте около 110 км.



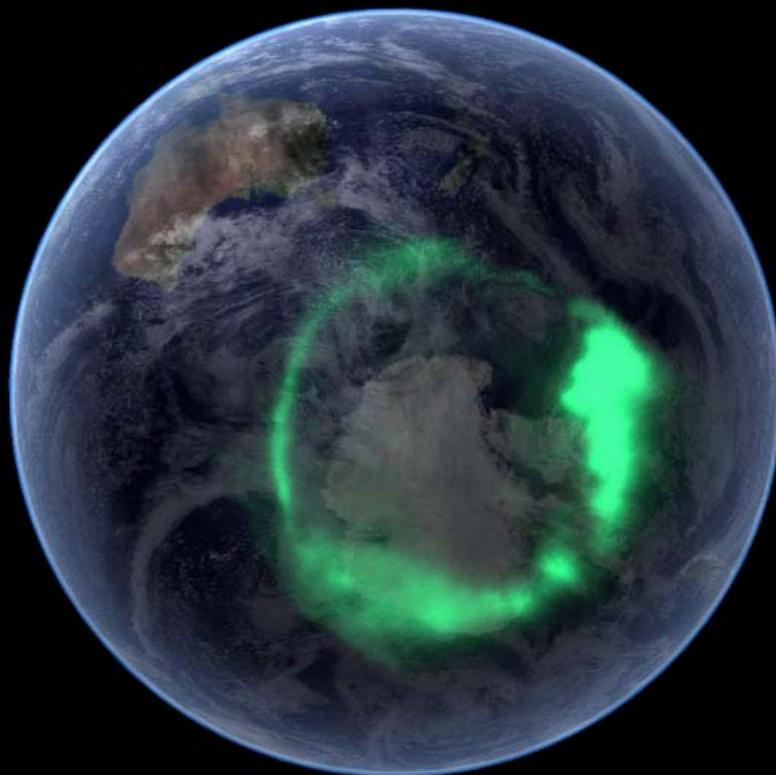
**Северные и южные сияния**











**Вид южного сияния из космоса**



**Вид северного сияния из космоса**

Самый внешний слой земной атмосферы называется экзосферой. Экзосфера расположена примерно в 700 км от земной поверхности. Газ в экзосфере очень сильно разрежен, наблюдается непрерывная утечка молекул и атомов в межпланетное пространство (в основном – водорода и гелия). Для частиц экзосферы имеет место высокая вероятность покинуть атмосферу без столкновений с другими частицами.

На высоте около 2000-3500 км экзосфера постепенно переходит в межпланетное пространство, которое заполнено сильно разреженным газом (главным образом атомами водорода), а также космической пылью кометного и метеорного происхождения. В это пространство проникают высокоэнергетические частицы солнечного и галактического происхождения.

Внешнюю часть экзосферы Земли часто называют геокороной (по аналогии с солнечной короной), она состоит из атомов водорода, «испаряющихся» из верхней атмосферы и распространяется вплоть до высот порядка 100 тыс. км. Давление газа в межпланетном пространстве равно всего  $10^{-19}$  атм ( $10^{-14}$  Па), газ в межгалактическом пространстве разрежен еще сильнее: давление нейтрального водорода там составляет примерно  $10^{-32}$  атм ( $10^{-27}$  Па). Для сравнения, самый глубокий вакуум, который получен в лаборатории – примерно  $10^{-17}$  атм ( $10^{-12}$  Па).



**Земная атмосфера из космоса**

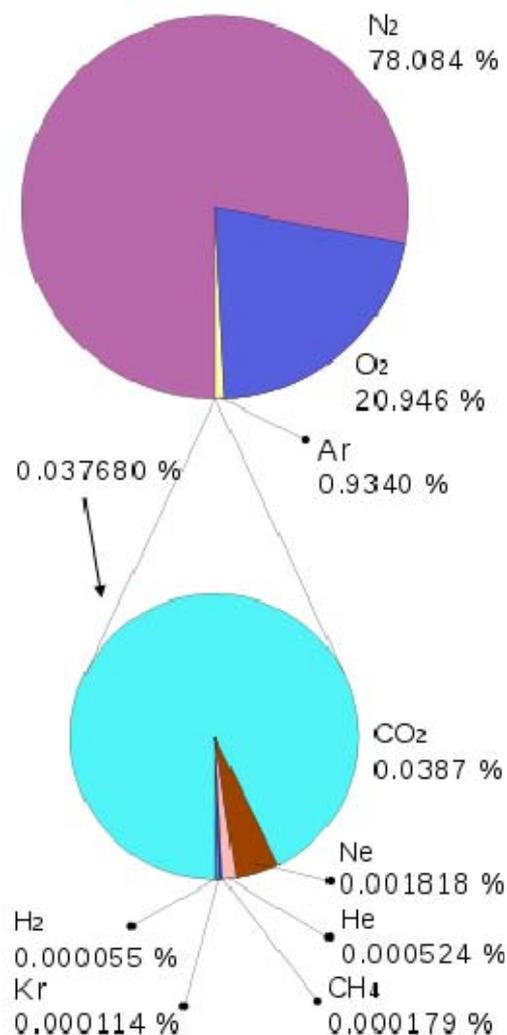


До высоты 100 км наша атмосфера представляет собой однородную смесь газов. На всякий случай напомним ее состав: азот - 78.1%, кислород - 20.9%, аргон - 0.9%, вода - 0.5-4%, углекислый газ - 0.03%.

В более высоких слоях распределение газов по высоте зависит от их молекулярных масс: концентрация более тяжелых газов убывает быстрее по мере удаления от поверхности Земли.

Однородную часть атмосферы Земли называют гомосферой, область, в которой состав газа зависит от высоты, - гетеросферой.

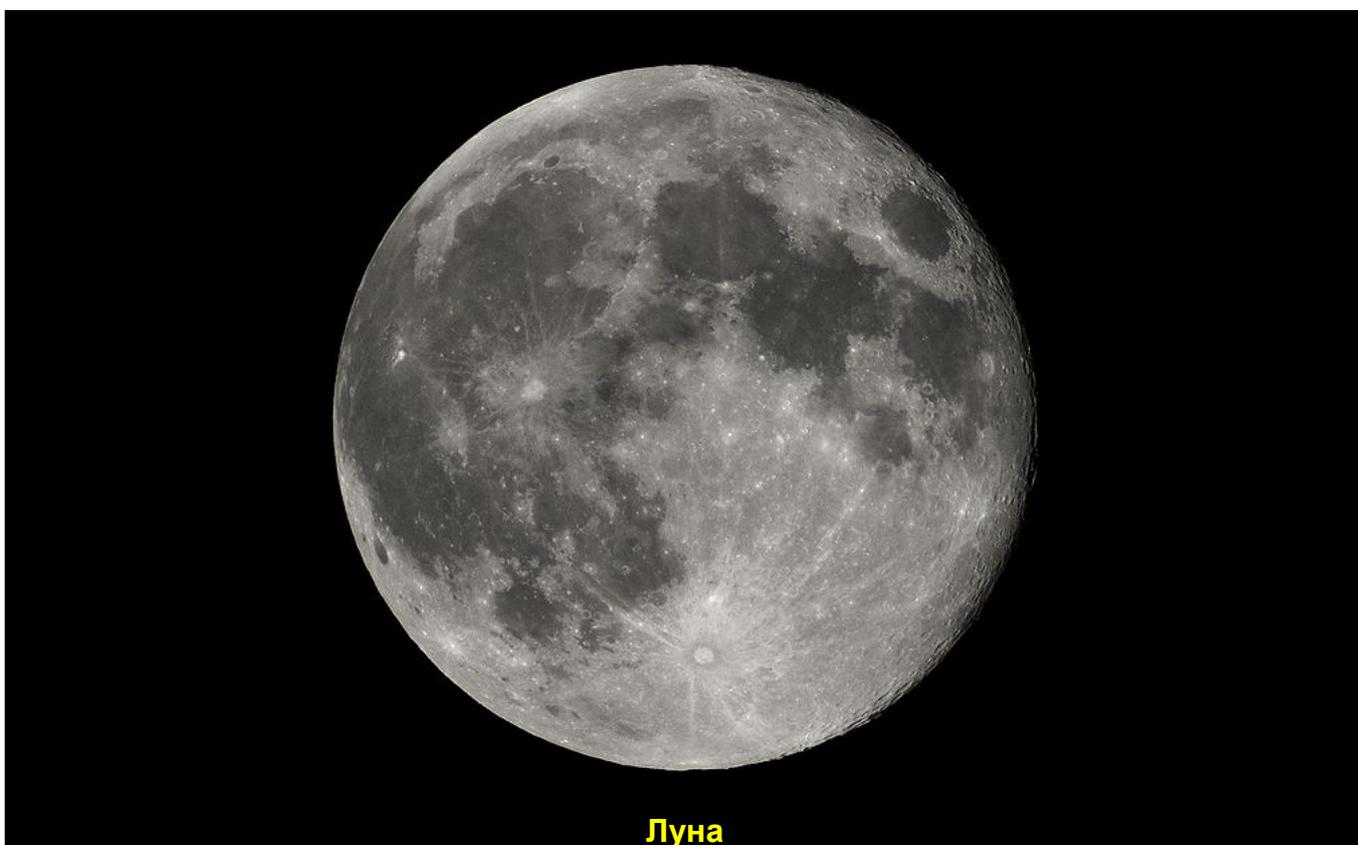
Как уже отмечалось, на долю тропосферы приходится около 80 % массы атмосферы, на долю стратосферы - около 20 %; масса мезосферы - не более 0.3 %, термосферы - менее 0.05 % от общей массы атмосферы. На основании электрических свойств в атмосфере выделяют нейтросферу (состоит из нейтральных молекул и атомов) и ионосферу (содержит значительную долю ионов). В настоящее время считают, что атмосфера простирается до высоты 2000-3000 км.



Состав сухого воздуха

## Луна и Меркурий

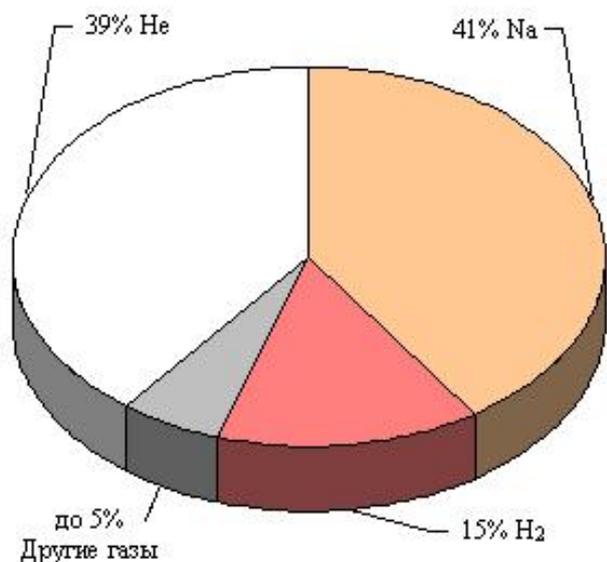
Начнем с ближайшего соседа Земли. Считается, что Луна не имеет атмосферы. Действительно, давление возле поверхности Луны соответствует глубокому вакууму –  $3 \cdot 10^{-15}$  атм ( $3 \cdot 10^{-10}$  Па), но это все же выше, чем давление в межпланетном пространстве ( $10^{-19}$  атм). Содержание газов у поверхности в ночное время не превышает 200000 частиц/см<sup>3</sup>. Из-за выделения газа грунтом днем давление возле поверхности выше, чем ночью. Основные источники молекул газа – бомбардировка поверхности солнечным ветром и радиоактивный распад изотопов в грунте. Масса всей лунной атмосферы не превышает 10 тонн.



Луна

Меркурий имеет очень разреженную атмосферу, давление которой в  $5 \cdot 10^{11}$  раз меньше давления земной атмосферы. В таких условиях атомы чаще сталкиваются с поверхностью планеты, чем друг с другом. Атмосфера Меркурия состоит из частиц, захваченных из солнечного ветра или выбитых солнечным ветром с поверхности, в ней обнаружены гелий, натрий, кислород, калий, аргон, водород. Среднее время пребывания атома в атмосфере Меркурия около 200 суток.

Группой астрономов из Бостонского университета было объявлено об открытии кометоподобного хвоста у планеты Меркурий длиной более 2.5 млн км. Обнаружили его в результате наблюдения с наземных обсерваторий спектральной линии натрия.



Состав атмосферы Меркурия



Меркурий

## Марс

В отличие от Луны и Меркурия, Марс имеет «настоящую» атмосферу. Однако атмосфера Марса очень разрежена. Давление на среднем уровне поверхности Марса составляет 610 Па (около 5 мм. рт. ст), что в 160 раз меньше земного. Из-за большого перепада высот на Марсе давление у поверхности может сильно изменяться.

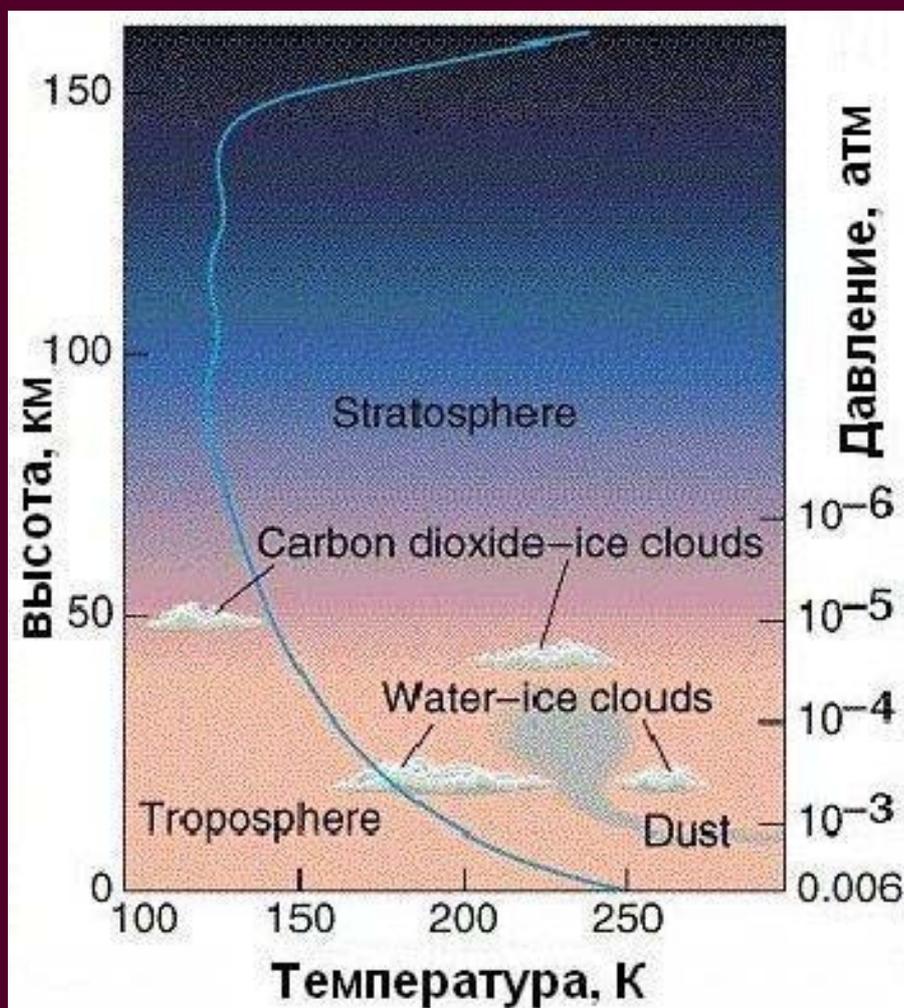
Максимальное значение достигает 1000-1200 Па в бассейне Эллада на глубине 8 км, а на вершине вулкана Олимп (27 км выше среднего уровня) оно составляет всего 30 Па.



**Небо на Марсе имеет желто-оранжевый цвет, а закат – синий**

Давление на среднем уровне поверхности Марса соответствует давлению земной атмосферы на высоте 35 км. Это составляет меньше 1% от нормального давления возле поверхности Земли (101.3 кПа).

Атмосфера Марса состоит на 95 % из углекислого газа, в ней также содержится азот - 2.7 %, аргон - 1.6 %, кислород - 0.13 %, водяной пар - 0.1 %, монооксид углерода - 0.07%. Облака состоят из водяного льда и льда углекислого газа. Марсианская атмосфера содержит большое количество мелкой пыли. Периодически наблюдаются пылевые бури самой различной силы. Некоторые из них охватывают небольшие участки, но периодически случаются бури, которые могут длиться неделями и охватывать всю планету. На Марсе зафиксированы аналоги земных торнадо.



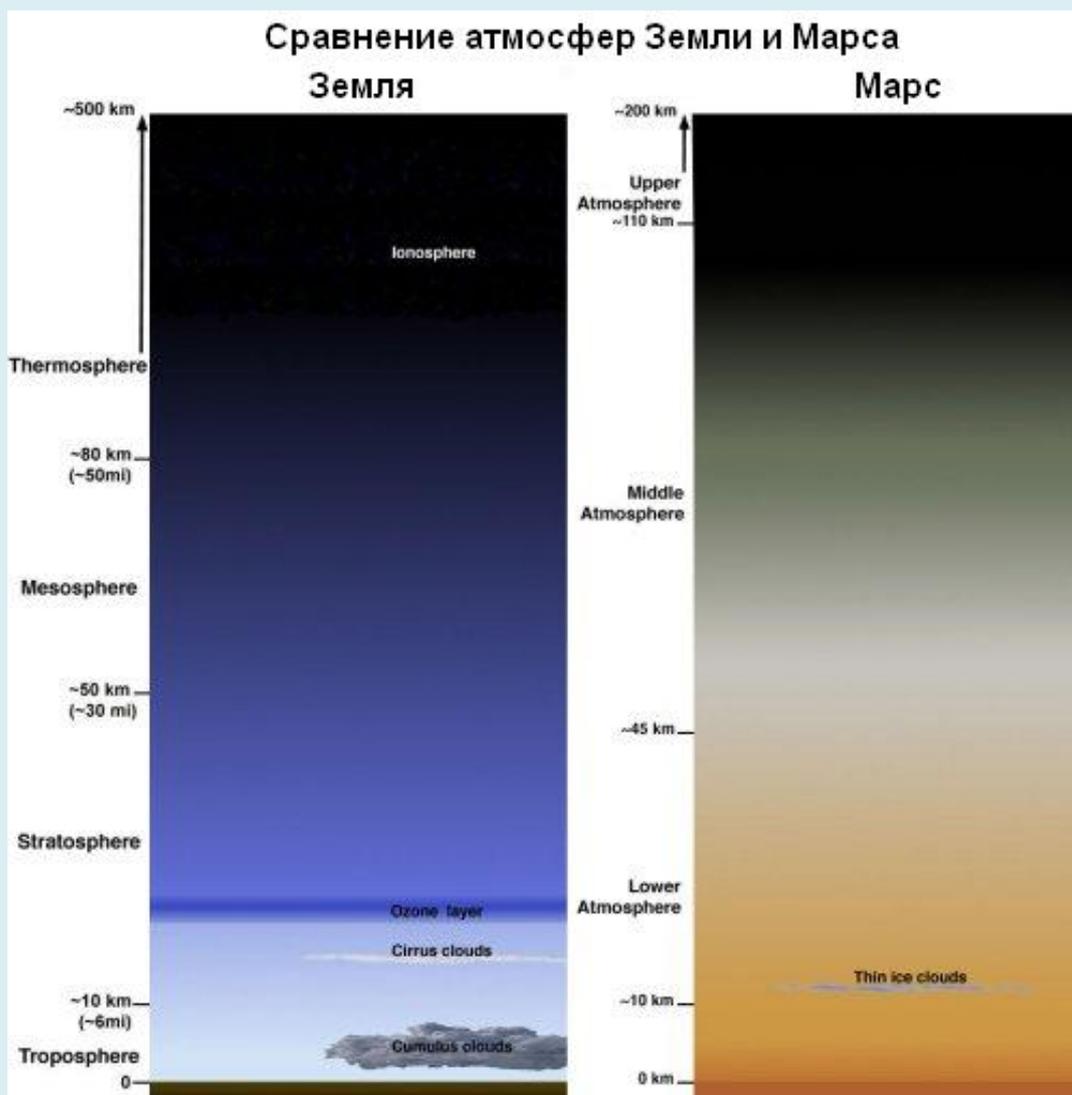
**Строение атмосферы Марса**

(обратите внимание, температура приведена в кельвинах)

В полдень небо на Марсе имеет желто-оранжевый цвет. Во время восхода и заката Солнца марсианское небо окрашено в зените в красновато-розовый цвет, а в непосредственной близости к диску Солнца — от голубого до фиолетового. Такая картина совершенно противоположна земной.

На Земле цвет неба обусловлен Рэлеевским рассеянием света молекулами газа. На Марсе этот эффект слаб и играет второстепенную роль. Вид неба обусловлен присутствием тончайшей пыли магнетита  $Fe_3O_4$ , постоянно взвешенной в марсианской атмосфере и поднимаемой сезонными пылевыми бурями.

Сумерки начинаются задолго до восхода Солнца и длятся долго после его захода. Иногда цвет марсианского неба приобретает фиолетовый оттенок в результате рассеяния света на микрочастицах водяного льда в облаках (последнее — довольно редкое явление).



Климат на Марсе, как и на Земле, носит сезонный характер. В холодное время года даже вне полярных шапок на поверхности может образовываться светлый иней. Аппарат Phoenix зафиксировал снегопад, однако снежинки испарялись, не достигая поверхности. В отличие от Земли, масса марсианской атмосферы значительно изменяется в течение года в связи с таянием и замерзанием полярных шапок, содержащих углекислый газ.

Марсианская ионосфера простирается в пределах от 110 до 130 км над поверхностью планеты. Марс не имеет магнитосферы, поэтому солнечный ветер напрямую воздействует на верхние слои атмосферы, вызывая унос ее частиц в космос.

## **Венера**

Венера обладает очень плотной атмосферой. Давление возле поверхности планеты достигает 90-95 атм. Такое давление наблюдается в океане на глубине более 900 м. Вблизи поверхности плотность атмосферы Венеры всего в 14 раз меньше плотности воды, зато в 50 раз больше плотности земного воздуха. Космические корабли приходится конструировать так, чтобы они выдерживали сокрушительную, раздавливающую силу атмосферы Венеры. Движение в такой плотной газовой среде должно чем-то напоминать перемещение в воде.

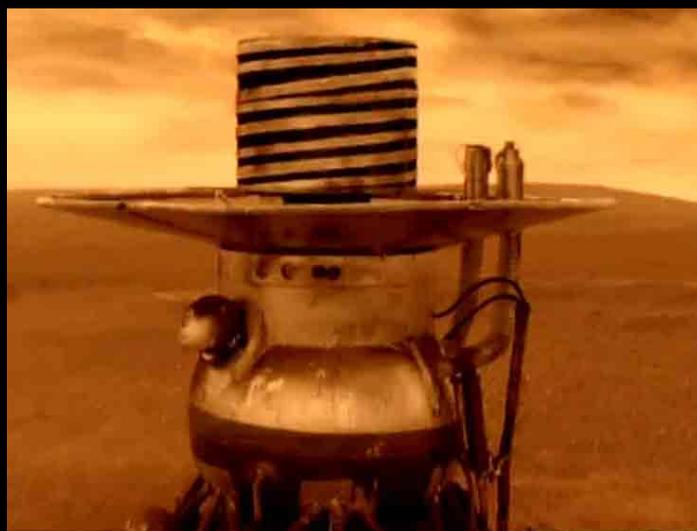
Вплоть до 1967 года, по аналогии с Землей, предполагалось, что основная химическая составляющая атмосферы Венеры – азот. Ученые считали, что кроме него там находится небольшое количество (1-10%) углекислого газа, полосы поглощения которого, были обнаружены еще в 30-е годы. Однако, как показали самые простые химические датчики, установленные на первых кораблях «Венера», все обстоит иначе. Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа - 96 % и азота - почти 4 %. Водяной пар и кислород присутствуют лишь в следовых количествах (0.02 % и 0.1 %). Температура на поверхности Венеры составляет около 475 °С, это выше, чем на поверхности Меркурия – самой близкой к Солнцу планеты. При такой температуре свинец и цинк находятся в жидком состоянии. Суточные и годовые колебания температуры на Венере незначительны. Ее плотная атмосфера хорошо сохраняет тепло даже в условиях очень большой продолжительности венерианских суток<sup>3</sup>. Причиной столь высокой температуры на Венере являются углекислый газ и облачность, которые поглощают инфракрасные лучи, мешая планете охлаждаться.

---

<sup>3</sup> Венера совершает один оборот вокруг Солнца за 224.7 земных суток, один оборот вокруг собственной оси – за 243.02 суток. В результате солнечные сутки на Венере равны 116.8 земных суток.



**Фотография Венеры с Маринера 10**



**Станция Венера 13:**

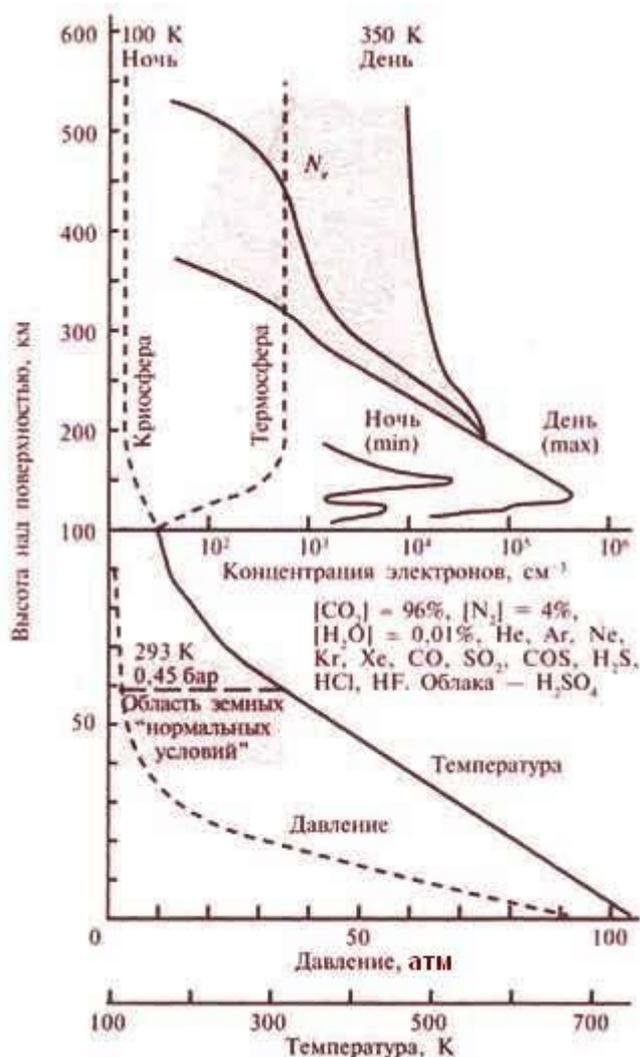
слева – фотография во время подготовки к полету, справа – вид на поверхности Венеры (монтаж)

Перепады температуры от дня к ночи составляют не более 1°C, а от экватора к полюсам – не более 12°C. С высотой температура заметно понижается — на вершинах наиболее высоких гор она почти на 100° ниже, чем в низменностях. Хотя по земным меркам это все равно – сильнейшая жара.

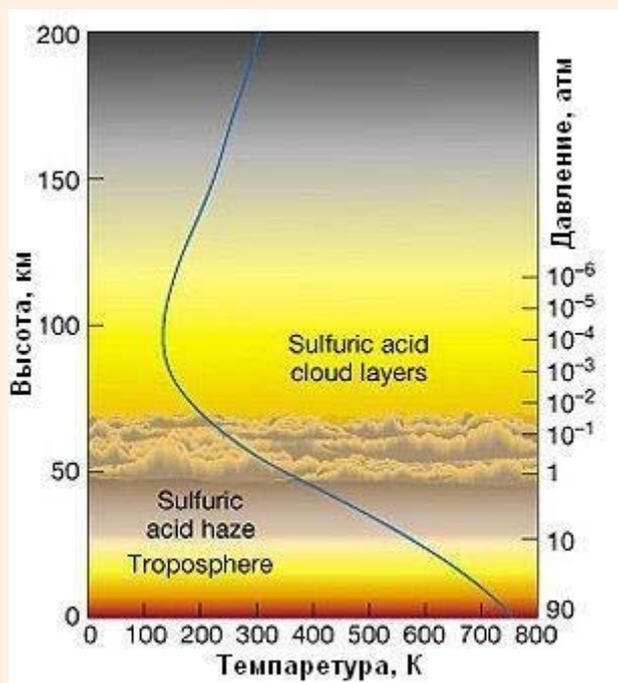
Как и на Земле, на Венере давление атмосферы уменьшается с высотой. Например, на высоте 30 км давление равно  $9.4 \cdot 10^5$  Па (9.3 атм), плотность газа  $10 \text{ кг/м}^3$  и температура 222°C. Примерно 40% массы венерианской атмосферы находится в пределах 10 км от поверхности планеты. На высоте 60 км давление падает до  $9 \cdot 10^3$  Па (0.09 атм), плотность уменьшается до  $0.2 \text{ кг/м}^3$ , а температура опускается до -30°C. На высоте порядка 50 км условия в атмосфере Венеры близки к земным, поэтому была выдвинута идея исследовать планету с помощью высотных аэростатов.

Из-за высокого молекулярного веса атмосферного газа выше 150 км атмосфера Венеры разрежена больше, чем атмосфера Земли на таких же высотах. Выше этого уровня преобладают легкие частицы – кислород и углекислый газ. А еще выше (выше 320 километров) резко увеличивается относительное содержание гелия и водорода. Легкие составляющие атмосферного газа — угарный газ, кислород и водород появляются как результат распада (диссоциации) молекул углекислого газа и водяного пара. Эта диссоциация происходит под воздействием жесткого (высокоэнергичного) ультрафиолетового излучения Солнца в стратосфере Венеры.

Атмосфера Венеры делится на разные высотные слои - тропосферу, стратосферу, мезосферу и термосферу (криосферу). Выше 700 километров начинается корона Венеры, состоящая только из водорода. Она простирается до 1000 километров



и плавно переходит в межпланетную среду. На высотах короны температура практически не меняется с высотой. Зато температура сильно зависит от времени суток и солнечной активности, то есть от того количества тепла, которое поступает в атмосферу от Солнца. Это означает, что температура днем выше, чем ночью. На высотах более 160 километров температура днем (в подсолнечной точке) близка к 30°C при минимальной солнечной активности и 180°C при максимальной. Ночью температура падает до -170°C. Как мы уже знаем, аналогичные закономерности наблюдаются и в земной экзосфере.

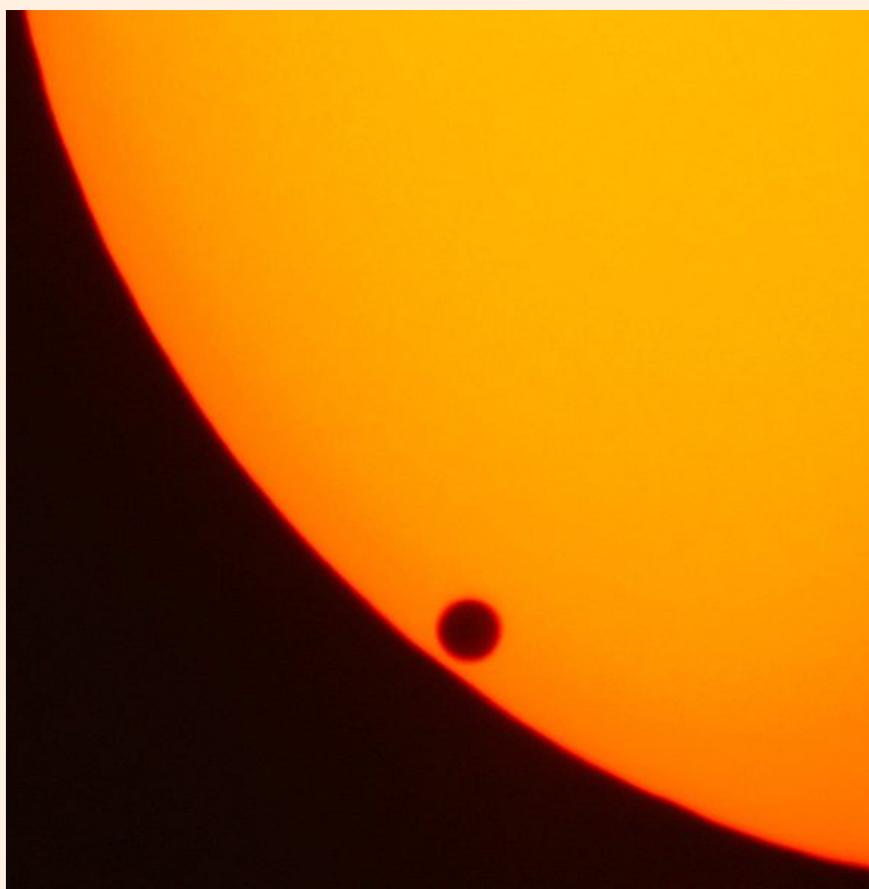


### Облачный покров и условия в атмосфере Венеры

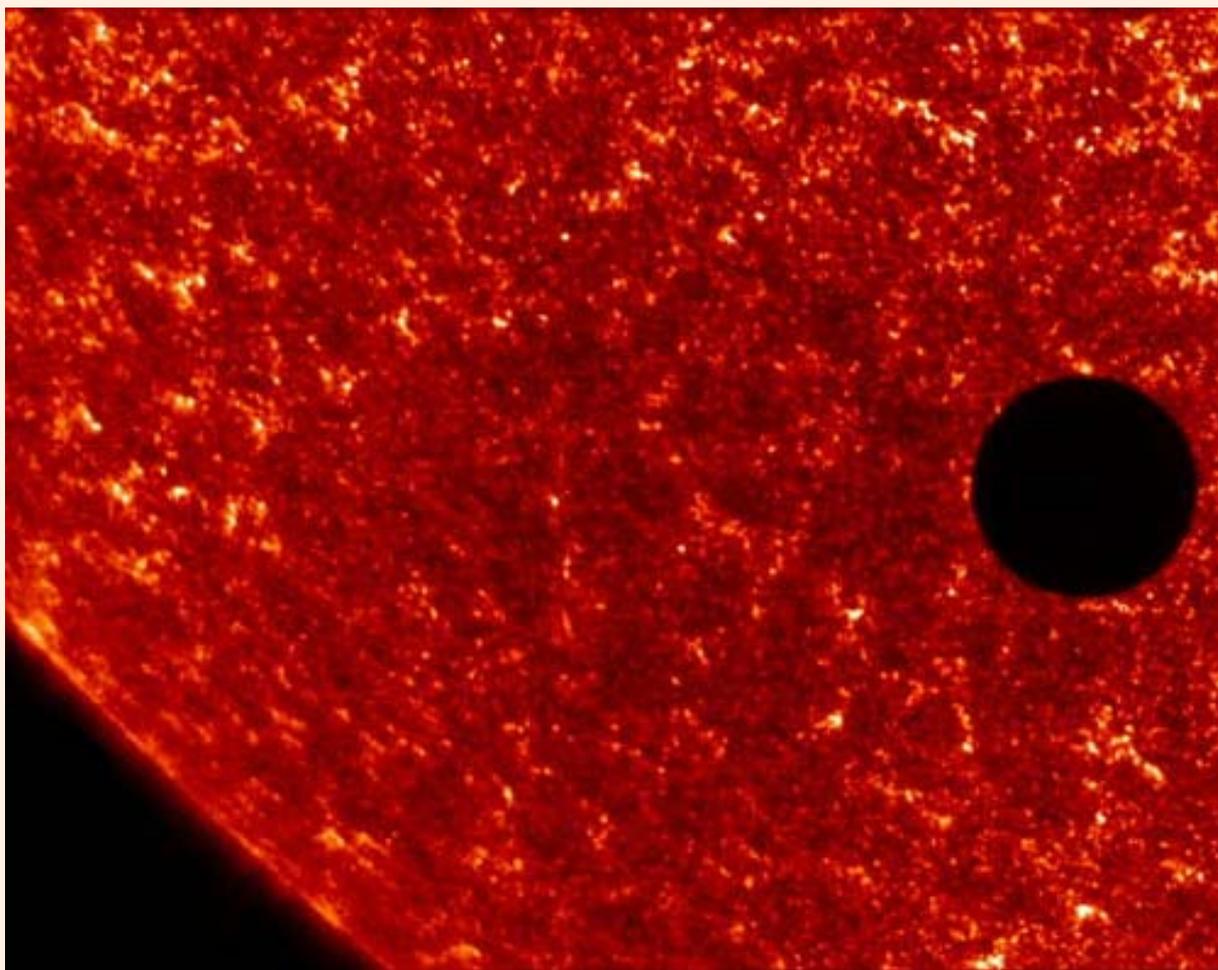
Облачный покров планеты трехслойный: на высотах от 70 до 90 км находится разреженная стратосферная дымка, на 50-70 км — основной облачный слой, а на 30-50 км — подоблачная дымка. Основной облачный слой весьма стабилен, хотя местами он гуще, а местами чуть более прозрачный. Облачный слой на Венере состоит из концентрированной серной кислоты, соединения серы, хлора и фтора. Облака имеют оранжево-желтый цвет. Такой цвет неба, необычный для жителей Земли, обусловлен тем, что атмосфера Венеры состоит из CO<sub>2</sub>, молекулы которого рассеивают именно эту часть солнечного света. По концентрации частиц облачный слой Венеры напоминает земной туман с видимостью в несколько километров. В атмосфере Венеры зарегистрированы грозные разряды. Долгие годы плотные облака Венеры надежно скрывали ее поверхность от земных наблюдателей.

Практически вся атмосфера Венеры вовлечена в один гигантский ураган: она вращается вокруг планеты со скоростью, достигающей 120-140 метров в секунду у верхней границы облаков. С приближением к поверхности, начиная с высоты 20 км, скорость ветра резко уменьшается и на высоте 10 км составляет лишь 3 м/сек (около 10 км/час). На самой же поверхности планеты ветер дует со скоростью 0.5-1 м/сек (2-4 км/час). Однако надо иметь в виду, что на Венере, воздушная смесь в 50 раз плотнее земного воздуха, поэтому создаваемое таким ветром давление гораздо больше. Мы пока совершенно не понимаем, как это происходит и что поддерживает это мощнейшее движение.

Первое доказательство наличия атмосферы на Венере было получено М. Ломоносовым во время прохождения этой планеты перед диском Солнца. Когда планета только касается диска, вокруг нее возникает сияние. Это явление наблюдали и другие астрономы, но Ломоносов предположил, что оно обусловлено наличием атмосферы. Прохождение Венеры по диску Солнца – редкое явление, которое наблюдается примерно 1 раз за 60 лет. Ближайшее такое событие произойдет 6 июня 2012 года.



**Прохождение Венеры перед диском Солнца**



**Прохождение Венеры перед диском Солнца (в УФ лучах)**

Атмосфера Венеры все еще таит много загадок. Например, известно, что основной серосодержащий газ на Венере – это диоксид серы. Но все попытки смоделировать химические превращения в атмосфере планеты показывают, что диоксид серы должен исчезнуть из атмосферы в результате взаимодействия с поверхностью в течение геологически короткого времени. Другими словами, на Венере должны существовать мощные источники его пополнения. Считается, что сернистый газ поступает в атмосферу в результате активной вулканической деятельности.

Особый интерес представляют сведения о содержании микрокомпонентов в атмосфере Венеры (в частности – инертных газов), а также информация об изотопном составе. Поэтому станции Венера-9 – Венера-14 и Pioneer Venus были оснащены масс-спектрометрами и газовыми хроматографами. В результате удалось обнаружить аргон, небольшие количества неона, криптона и ксенона, монооксида углерода, сероводорода, серооксида углерода, гексафторида серы. Анализировались также изотопные соотношения  $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$ ,  $^{38}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$ ,  $^{20}\text{Ne} / ^{22}\text{Ne}$ .

Изотопы можно разделить на две группы: радиогенные, которые образовались в результате радиоактивного распада элементов, и реликтовые, что сохранились со времени образования Солнечной системы (около 4.5 миллиардов лет тому назад). Из абсолютного содержания реликтовых изотопов инертных газов и их соотношения с радиогенными можно почерпнуть некоторые сведения о тех условиях, в которых из протопланетной туманности когда-то рождались планеты, и о самом процессе формирования планет.



Так представляет поверхность и небо Венеры художник

## Титан

Титан – единственный спутник в Солнечной системе, который имеет достаточно плотную атмосферу. Это небесное тело уникально, поэтому с ним стоит познакомиться более подробно. Титан – крупнейший спутник Сатурна и второй по величине спутник в Солнечной системе (больше только спутник Юпитера Ганимед). Диаметр Титана равен 5152 км, что на 50% больше, чем у нашей Луны, при этом Титан на 80 % превосходит спутник Земли по массе. Титан больше планеты Меркурий, но примерно в два раза уступает ей по массе. Сила тяжести на Титане составляет приблизительно одну седьмую земной. Масса Титана составляет от 95 % массы всех спутников Сатурна. Если бы Титан вращался непосредственно вокруг Солнца, его бы считали планетой.



**Сравнение размеров Земли, Титана и Луны**

Титан стал первым известным спутником Сатурна – в 1655 году его обнаружил голландский астроном Христиан Гюйгенс. На данный момент Титан является единственным телом в Солнечной системе (кроме Земли), на поверхности которого доказано существование жидкости.

Титан обладает массивной и протяженной атмосферой с плотной облачностью, которая полностью скрывает его поверхность от земного наблюдателя. В этом отношении Титан напоминает Венеру. Заглянуть за облачный покров спутника удалось только в 2004 г. благодаря межпланетной экспедиции Кассини-Гюйгенс (англ. Cassini-Huygens).



**Титан в натуральных цветах (снимок Кассини)**

Атмосфера Титана имеет сложную структуру и превосходит по массе, а также плотности земную. Граница атмосферы Титана расположена примерно в 10 раз выше, чем граница атмосферы Земли. По аналогии с Землей нижние слои атмосферы Титана делят на тропосферу и стратосферу.

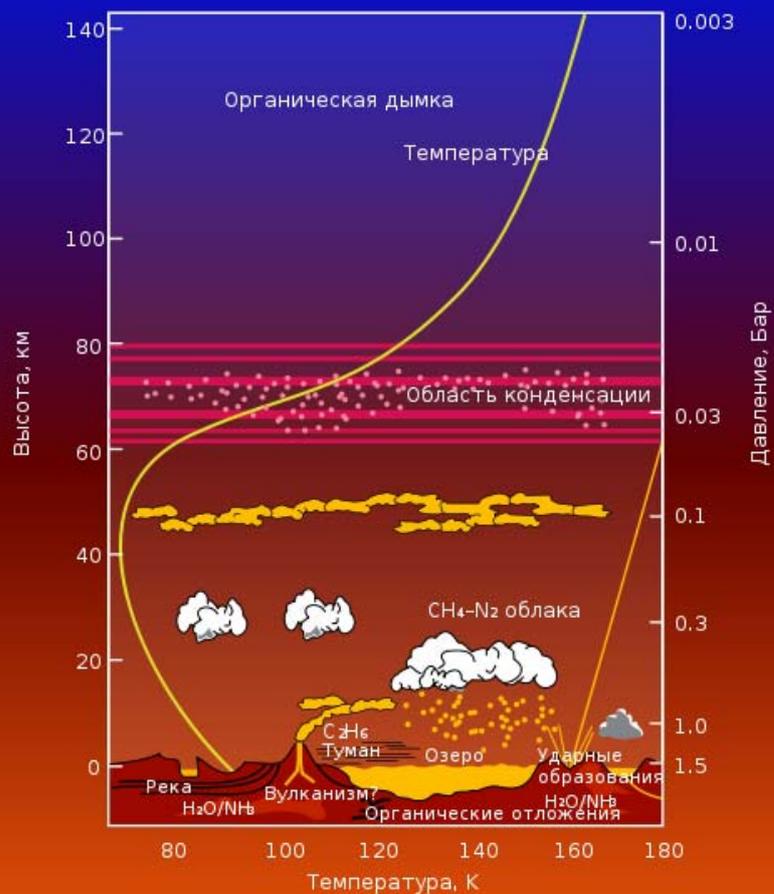
Состав атмосферы Титана зависит от высоты. Тропосфера возле поверхности содержит в основном азот – 95 % и метан – 4.9%. Давление возле поверхности равно 1.5 атм, температура составляет около  $-179^{\circ}\text{C}$  (94 К). Состав стратосферы заметно отличается – 98.4% азота и 1.4% метана. В атмосфере Титана обнаружены следы этана, пропана, углекислого и угарного газа, циана, гелия, ацетилена, практически отсутствует свободный кислород.

В тропосфере температура с высотой падает – от  $-179^{\circ}\text{C}$  (94 К) на поверхности до  $-203^{\circ}\text{C}$  (70 К) на высоте 35 км (напомним, на Земле тропосфера заканчивается на высоте 10-18 км). До высоты 50 км простирается обширная тропопауза, где температура остается практически постоянной. Затем температура начинает расти. Такое распределение температуры препятствуют вертикальному движению воздуха. Оно обычно обусловлено совместным действием двух факторов – подогрева воздуха возле поверхности и подогрева сверху благодаря поглощению солнечного излучения. В земной атмосфере инверсия («обратное распределение») температуры наблюдается на высотах около 50 км (стратопауза) и 80-90 км (мезопауза). На Титане температура растет, по крайней мере, высоты до 150 км. Однако на высотах более 500 км Гюйгенс

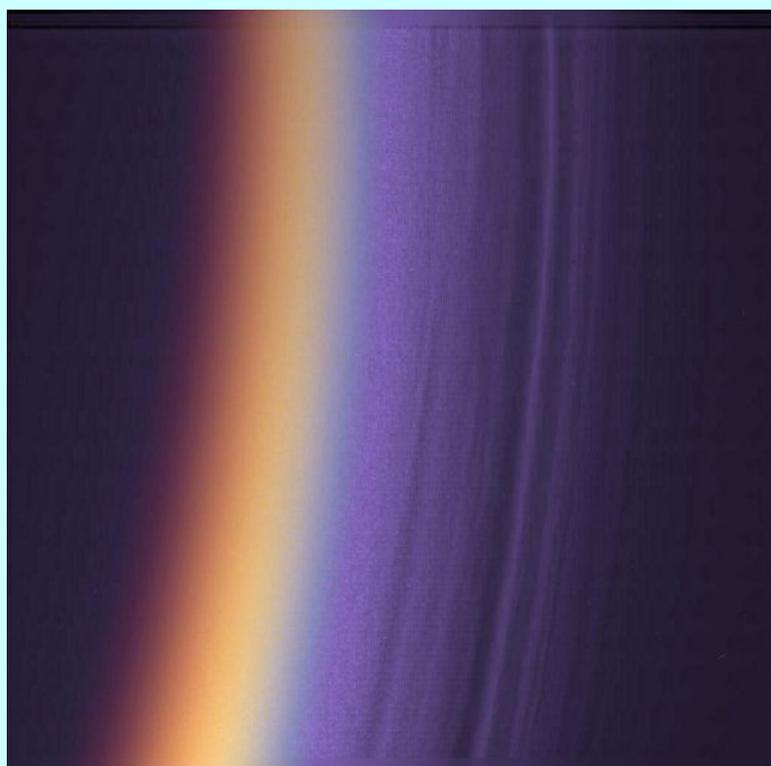
неожиданно обнаружил целую серию температурных инверсий, каждая из которых определяет отдельный слой атмосферы. Их происхождение пока остается неясным.



По данным станции Кассини, нижняя часть атмосферы Титана, так же как и атмосфера Венеры, вращается существенно быстрее поверхности, образуя единый мощный и постоянно действующий ураган. Однако согласно измерениям посадочного аппарата, на поверхности Титана ветер был очень слабым (0.3 м/с), на небольших высотах направление ветра менялось. На высотах более 10 км в атмосфере Титана постоянно дуют ветры. Их направление совпадает с направлением вращения спутника, а скорость растет с высотой с нескольких метров в секунду на высоте 10-30 км до 30 м/с на высоте 50-60 км. На высотах более 120 км имеет место сильная турбулентность атмосферы – ее признаки были замечены еще в 1980-1981 гг., когда через систему Сатурна пролетали космические аппараты «Вояджер». Однако неожиданностью стало то, что на высоте около 80 км в атмосфере Титана зарегистрирован штиль – сюда не проникают ни ветры, дующие ниже 60 км, ни турбулентные движения, наблюдаемые вдвое выше. Причины такого странного замирания движений пока не удается объяснить.



**Условия в атмосфере Титана**



**Атмосфера Титана**

(левый снимок сделан с Кассини, правый – с Вояджер-1)

Титан получает слишком мало солнечной энергии для того, чтобы обеспечить активное движение атмосферы. Скорее всего, энергию для перемещения атмосферных масс обеспечивают мощные приливные воздействия Сатурна, которые в 400 раз превышающие по силе обусловленные Луной приливы на Земле.



**Атмосферный вихрь над северным полюсом (Кассини, 2006 год)**

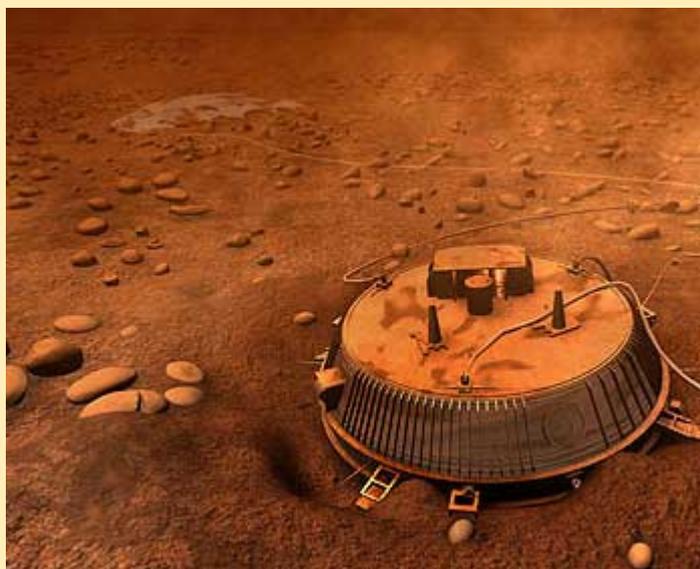
В верхних слоях атмосферы под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца происходят сложные фотохимические превращения. В результате из метана и азота образуются сложные органические соединения, например, диацетилен, метилацетилен, цианоацетилен, бензол. Некоторые из обнаруженных молекул содержат не менее 7 атомов углерода (по данным масс-спектрометра станции Кассини).

Титан не имеет магнитосферы и периодически выходит за пределы магнитосферы Сатурна, в результате верхние слои атмосферы спутника подвергаются воздействию солнечного ветра. Одной из неожиданностей стало существование на Титане нижнего слоя ионосферы, лежащего между 40 и 140 км (максимум электропроводности на высоте 60 км).

Небо Титана имеет оранжевый цвет благодаря углеводородам – в основном метану. Одним из источников метана может быть вулканическая активность. Толстая

атмосфера не пропускает большую часть солнечного света. Посадочный модуль Гюйгенс не смог зарегистрировать прямых солнечных лучей во время снижения в атмосфере. Ранее предполагалось, что атмосфера ниже 60 км практически прозрачна, однако желтая дымка присутствует на всех высотах. Плотность дымки позволила снимать поверхность, когда аппарат опустился ниже 40 км, но дневное освещение на Титане напоминает земные сумерки. Сатурн также, вероятно, не может быть виден с поверхности Титана.

Атмосфера Титана очень холодная, поэтому там практически нет водяных паров. Водяной лед ведет себя подобно твердой каменной породе. Однако роль, которую на Земле выполняет вода, на Титане выполняют метан и этан. Здесь наблюдаются активные погодные явления, например, осадки и ураганы.



**Слева – фотография поверхности Титана в месте посадки зонда Гюйгенс**

**Справа – Гюйгенс на Титане (рисунок)**

Углеводороды конденсируются в облака на высоте нескольких десятков километров. Согласно данным, полученным «Гюйгенсом», относительная влажность метана повышается с 45 % у поверхности до 100 % на высоте 8 км (при этом общее

количество метана, наоборот, уменьшается). На высоте 8-16 км простирается очень разреженный слой облаков, состоящих из смеси жидкого метана с азотом, покрывающий половину поверхности спутника. Из этих облаков на поверхность выпадает метановый снег. Выше 16 км, отделенный промежутком, лежит разреженный слой облаков из кристалликов метанового льда.

Существуют также мощные дождевые облака, хорошо заметные на фоне поверхности, которые быстро перемещаются и меняют форму под действием ветра. Обычно они покрывают относительно небольшую площадь (менее 1 % диска), и рассеиваются за время порядка земных суток. Вызванные ими ливни должны быть очень интенсивными и сопровождаться ветром ураганной силы. Дождевые капли, по расчетам, достигают диаметра 1 см. Общий уровень осадков составляет в среднем лишь несколько сантиметров за земной год.

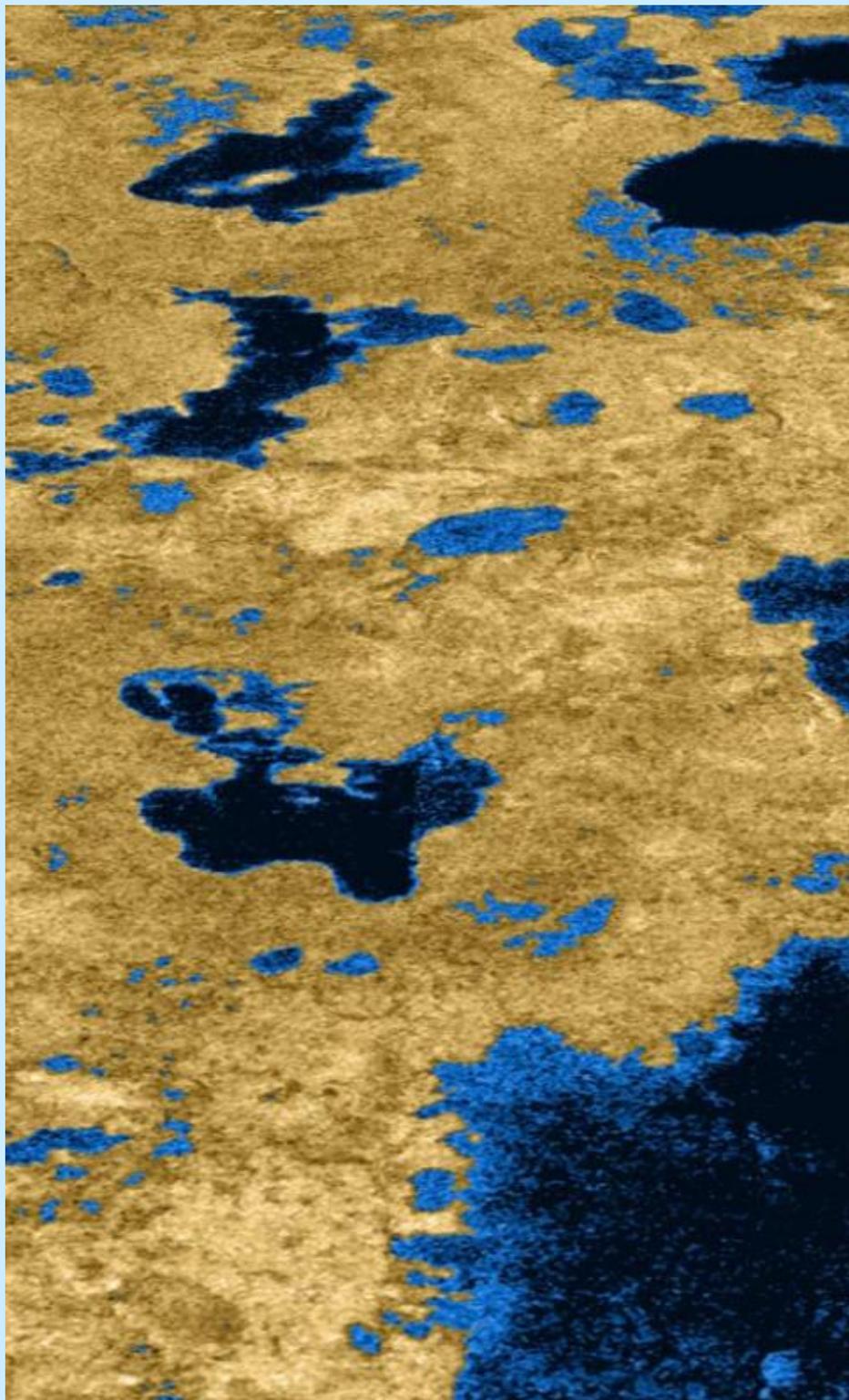
По данным наблюдений с Кассини, поверхность Титана сильно напоминает земную. На радарных снимках видны горные хребты высотой более 1 км, долины, русла рек, стекающих с возвышенностей, а также озера, заметна сильная эрозия горных вершин, потоки жидкого метана во время сезонных ливней могли образовать пещеры в горных склонах. На вершинах гор имеются светлые отложения, возможно, залежи метана и других органических веществ.

Многие особенности поверхности Титана могут быть объяснены как действием жидкости, так и следствием криовулканизма. Вулканический купол Ганеша, обнаруженный на радарном изображении в октябре 2004, напоминает щитовые вулканы Венеры.

По данным Кассини, а так же согласно расчетам, озера Титана состоят из следующих компонентов: этан (76-79 %), пропан (7-8 %), метан (5-10 %). Кроме того, озера содержат 2-3 % циановодорода, и около 1 % бутена, бутана и ацетилена. Согласно другим гипотезам, основными компонентами являются этан и метан.

На фотографиях, полученных при снижении Гюйгенса, видны светлые холмы и пересекающие их русла, впадающие в темную область. Гюйгенс, по-видимому, сел именно в темную область, которая оказалась твердой поверхностью. Состав грунта на месте посадки напоминает мокрый песок (возможно состоящий из ледяных песчинок, перемешанных с углеводородами). Увлажнять грунт может постоянно выпадающая изморось.

На снимках непосредственно с поверхности видны камни (вероятно ледяные) округлой формы. Такая форма могла образоваться в результате длительного воздействия на них жидкости.



Изображение северного района Титана, построенное на основании радиолокационных данных (цвета искусственные). Карта охватывает область размером около 150 километров. Темные области отражают сравнительно меньше радиоволн и соответствуют озерам

На Титане обнаружены четкие признаки вулканической активности. Правда, там действуют не силикатные вулканы как на Земле и Венере, а так называемые криовулканы которые, вероятно, извергают воду и аммиак с примесью углеводородов.

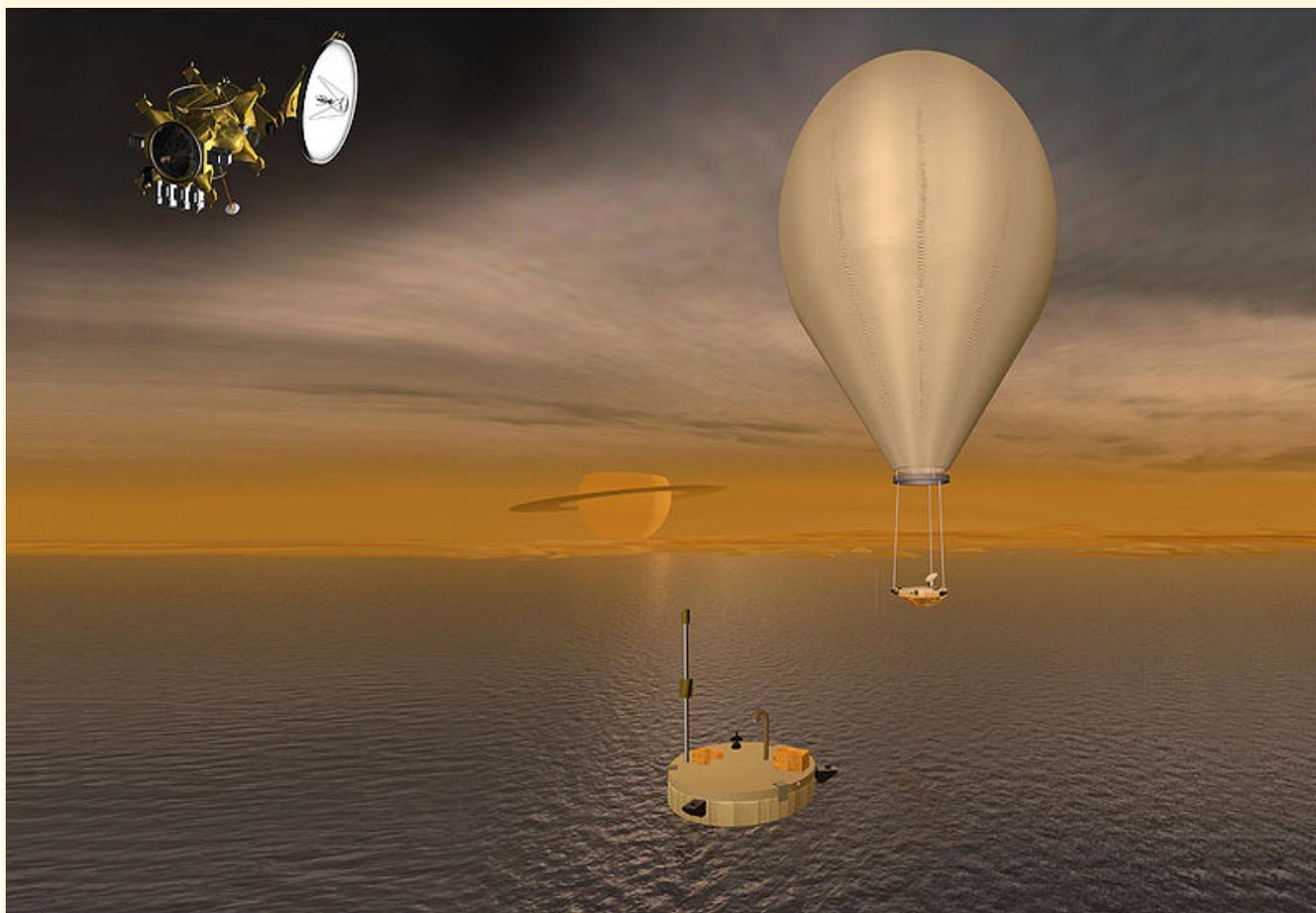
Интересно, что на Титане человек может осуществить свою вековую мечту – взлететь, махая крыльями как птица. На Земле для этой цели человеку понадобились бы мышцы, размером с мешок, но на Титане благодаря плотной атмосфере и низкой гравитации такой полет будет под силу каждому – даже в защитном скафандре.

Как показывают расчеты, для исследования крупнейшего спутника Сатурна хорошо подходят аэростаты, которые поднимаются за счет подогретого воздуха.



Титан – сложный, многообразный и загадочный мир, отделенный от нас большим расстоянием и плотной атмосферой. Пока нам удалось заглянуть в него лишь

краешком глаза. НАСА и ЕКА планируют отправить орбитальную станцию для исследования Сатурна, Титана и Энцелада, а также два зонда предназначенные непосредственно для изучения Титана. Один зонд представляет собой аэростат, который будет плавать в атмосфере среди облаков. Второй зонд должен будет приводниться в полярном море углеводородов примерно на 79° северной широты, аппарат будет спущен на парашюте, так же как Гюйгенс. Зонд должен стать первым плавучим аппаратом вне Земли. Срок его работы предположительно составит от 3 до 6 месяцев.



Использованы материалы: [nasa.gov](http://nasa.gov), [wikipedia.org](http://wikipedia.org), журнала Знание – Сила, [daviddarling.info](http://daviddarling.info), [mentallandscape.com](http://mentallandscape.com)

