

Физика природной среды

3. Состав и строение атмосферы

Содержание

3.1. Атмосфера Земли и других тел
Солнечной системы

3.2. Вертикальное строение атмосферы
Земли

3.3. Преобразование энергии в атмосфере

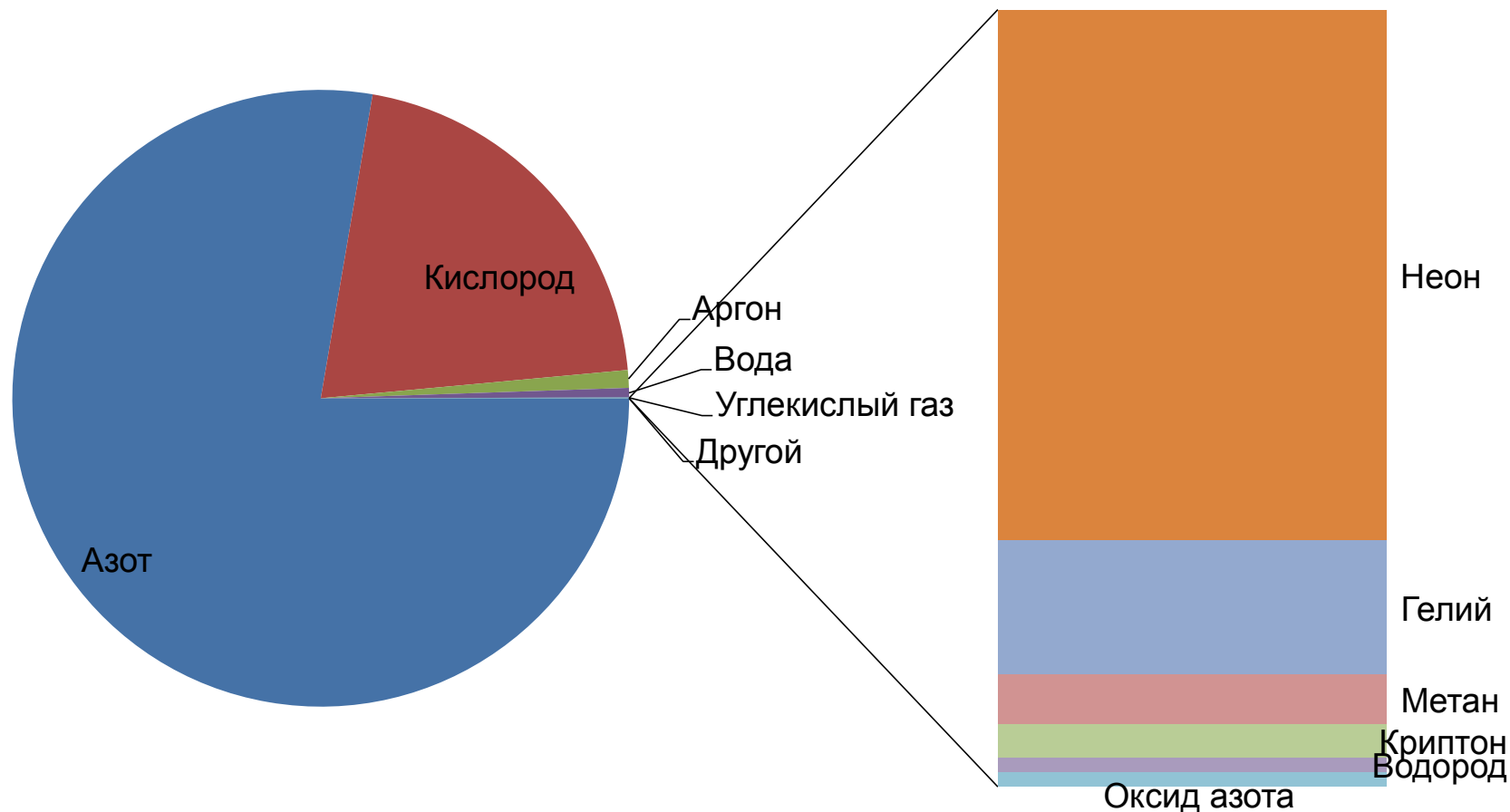
Атмосфера Земли

- Атмосферой Земли (от греч. *atmos* - пар и *sphaira* - шар) называется газовая оболочка, окружающая Землю. Масса атмосферы составляет $(5,1-5,3) \cdot 10^{18}$ кг. Среднее давление атмосферы у поверхности Земли (на уровне моря) равно 1013 кПа или 760 мм рт. ст. С высотой давление убывает по закону, близкому к экспоненциальному, так что на высотах в несколько десятков километров плотность атмосферы уже очень мала.
- Атмосфера Земли состоит примерно на 78% из азота, на 21% из кислорода и на 1% из аргона. Содержатся в атмосфере также малые примеси углекислого газа, водяные пары и незначительное количество неона, гелия, криптона и водорода.

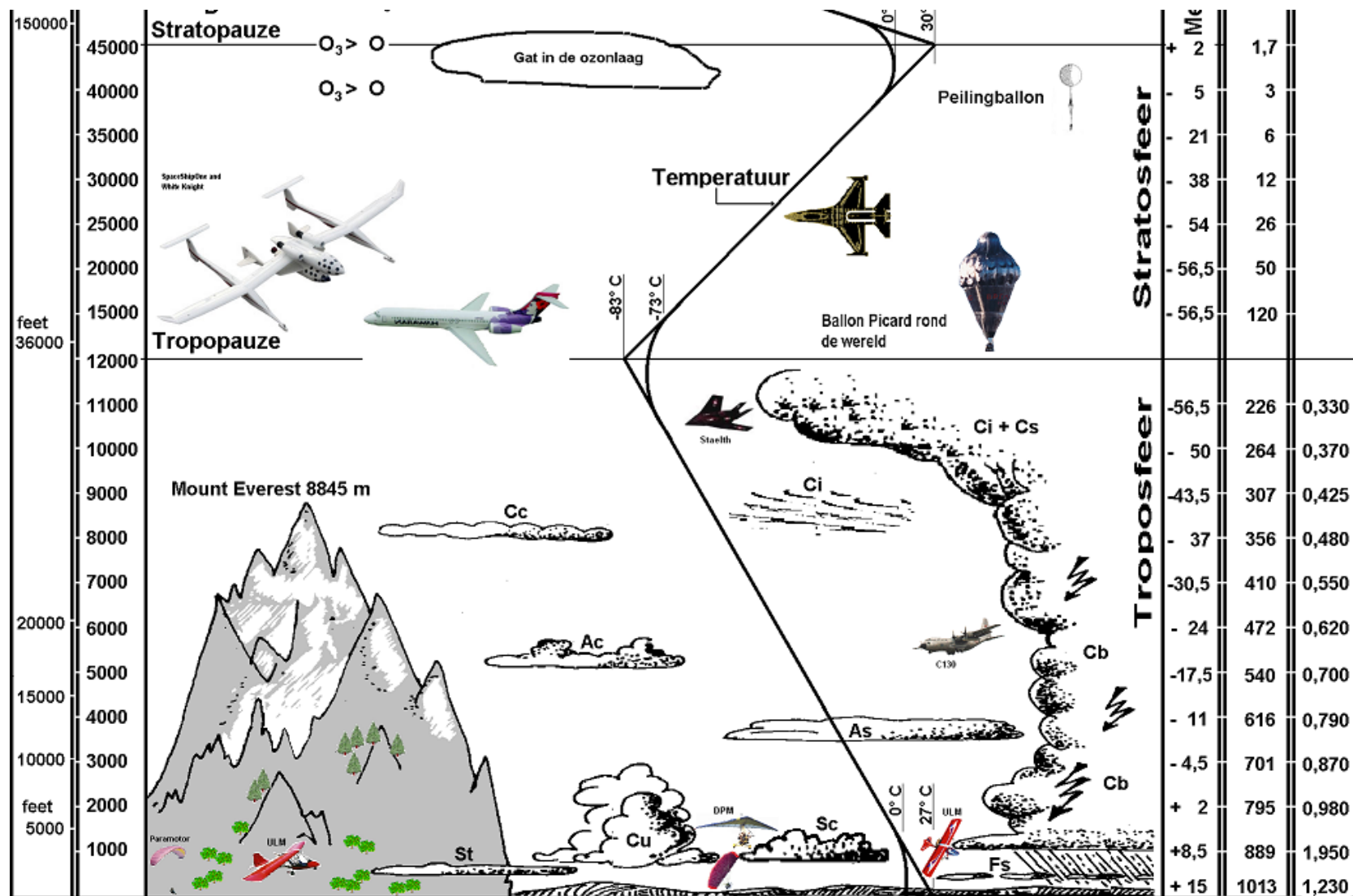
Атмосфера тел Солнечной системы

Небесное тело	Радиус атмосферы, м	Температура, К	Вид атмосферы	Состав атмосферы
Солнце	$7,0 \cdot 10^8$	5780	Солнце – газовый шар	H^+ , e^- , H_2 , He
Меркурий	$2,4 \cdot 10^6$	400	Очень разреженная	Ar, Ne, He
Венера	$6,1 \cdot 10^6$	290	Мощная	CO_2 , N_2
Земля	$6,4 \cdot 10^6$	250	Мощная	N_2 , O_2 , Ar и др.
Марс	$3,4 \cdot 10^6$	200	Слабая	CO_2 , N_2
Юпитер	$7,1 \cdot 10^7$	110	Непрерывно переходящая в жидкость	H_2 , He, CH_4
Сатурн	$6,0 \cdot 10^7$	80	То же	То же
Уран	$2,5 \cdot 10^7$	55	Мощная	H_2 , He
Нептун	$2,2 \cdot 10^7$	45	То же	То же
Плутон	$1,4 \cdot 10^6$	40	?	?
Ио	$1,8 \cdot 10^6$	-	Разреженная	Na, H_2 , S^{2+} , O^{2+} , K
Каллисто	$2,5 \cdot 10^6$	-	То же	NH_3 , CH_4
Ганимед	$2,8 \cdot 10^6$	-	То же	NH_3 , CH_4 , O_2
Европа	$1,6 \cdot 10^6$	-	?	?
Титан	$2,5 \cdot 10^6$	-	Мощная	H_2 , CH_4 , HCN, C_2H_6 , C_2H_2 , C_2H_4

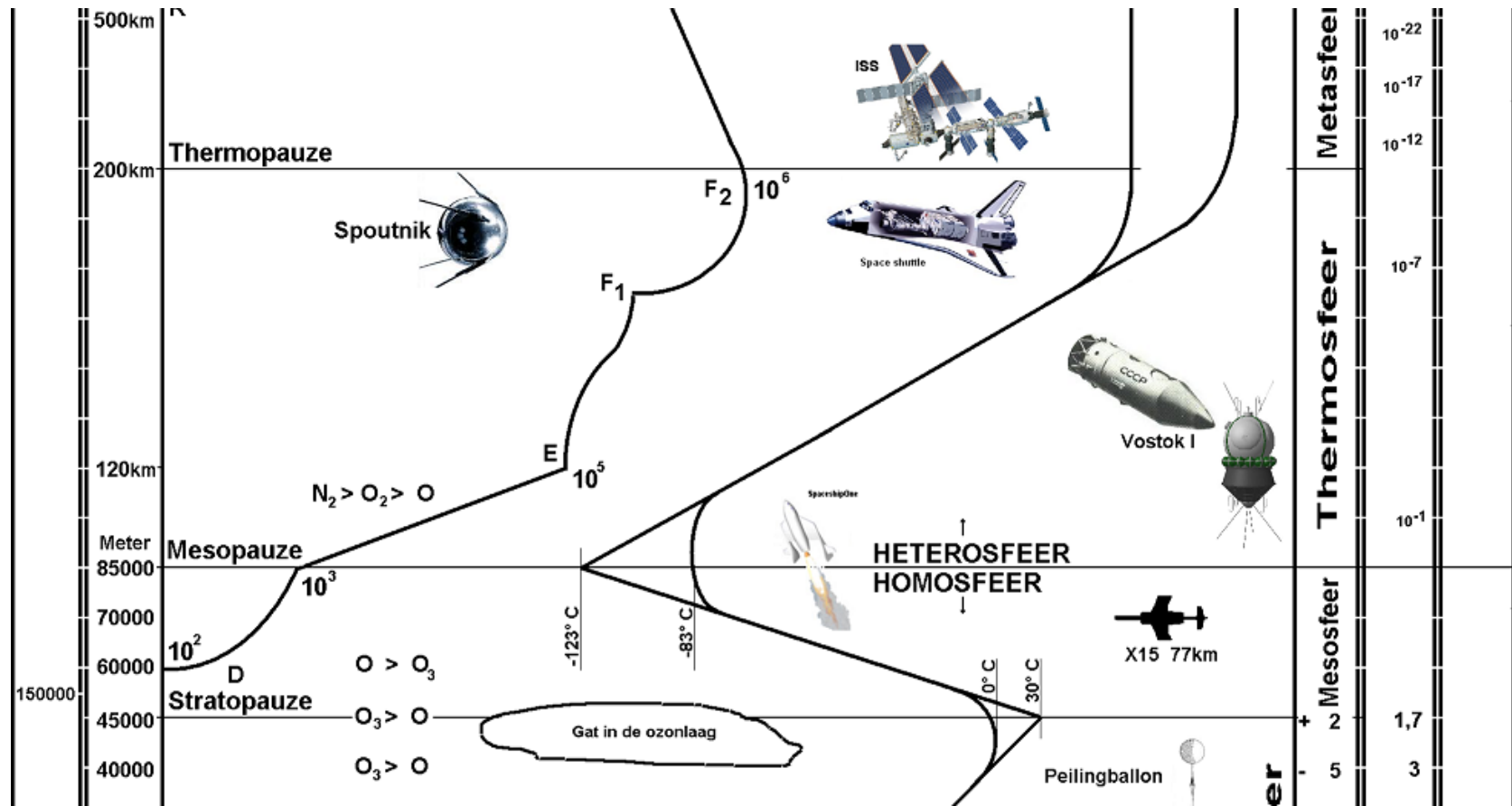
Химический состав сухого воздуха



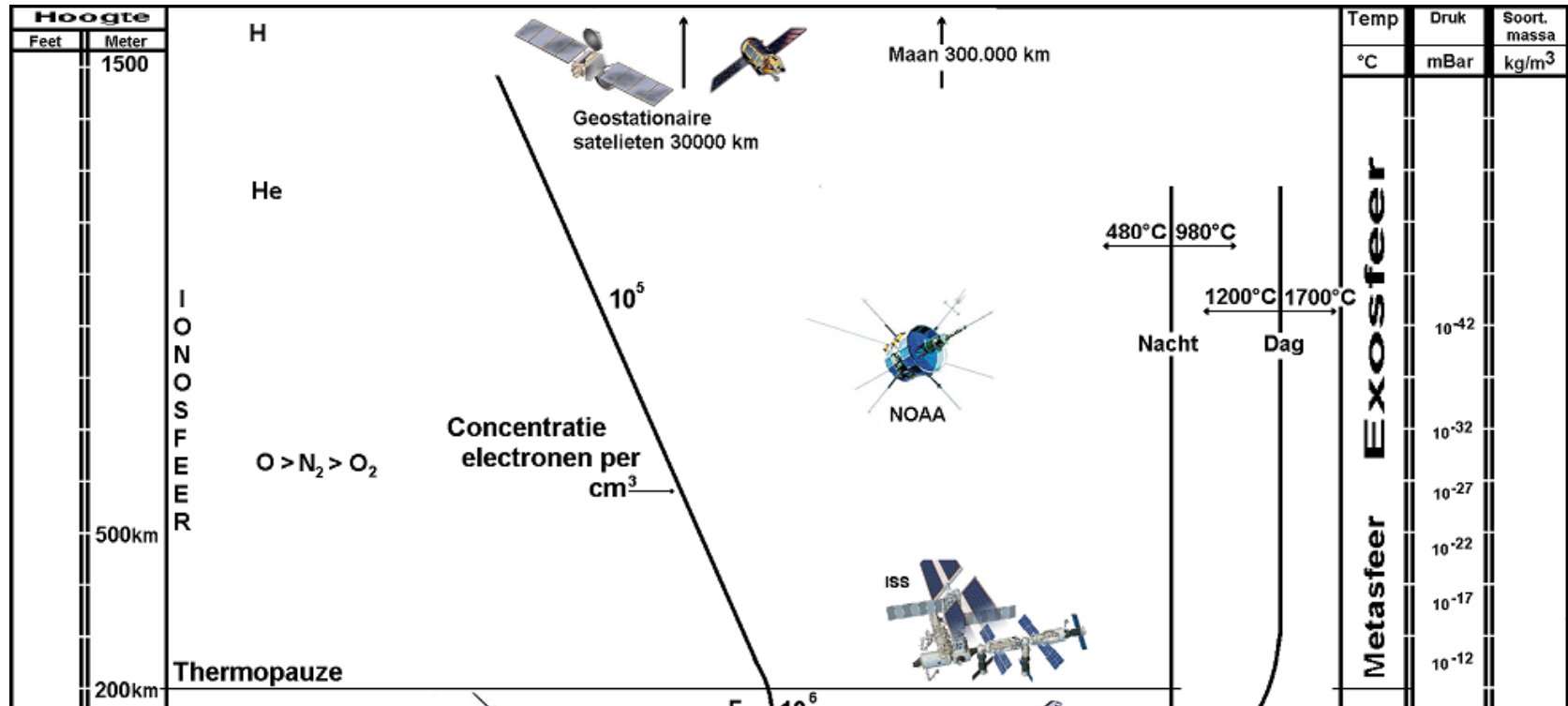
Вертикальное строение атмосферы Земли



Вертикальное строение атмосферы Земли



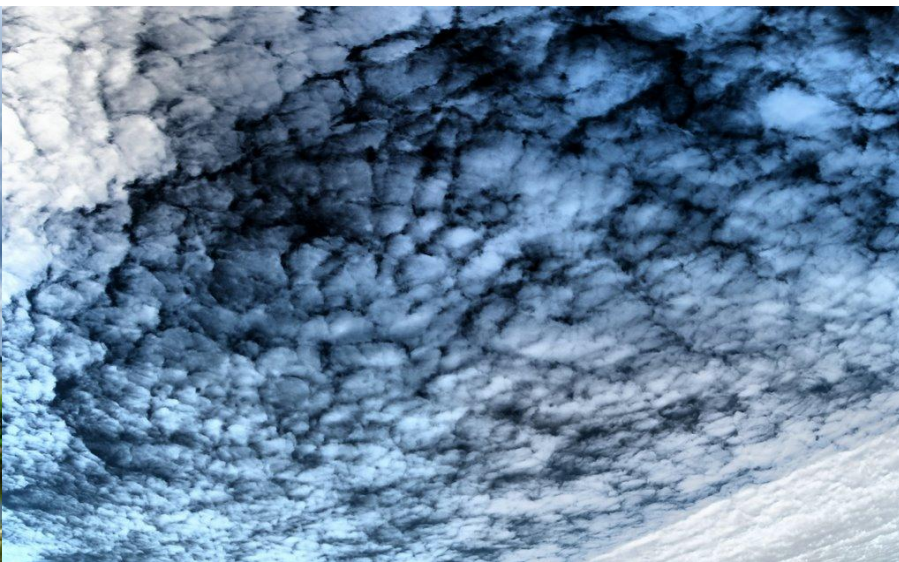
Вертикальное строение атмосферы Земли



Тропосфера

- Тропосфера (др.-греч. *τρόπος* — «поворот», «изменение» и *σφαῖρα* — «шар») — нижний, наиболее изученный слой атмосферы, высотой в полярных областях 8-10 км, в умеренных широтах до 10-12 км, на экваторе — 16-18 км.
- При подъёме в тропосфере температура понижается в среднем на 0,65 градуса через каждые 100 м. Верхний слой тропосферы, в котором снижение температуры с высотой прекращается, называют тропопаузой.
- В тропосфере сосредоточено более 80 % всей массы атмосферного воздуха, сильно развиты турбулентность и конвекция, сосредоточена преобладающая часть водяного пара, возникают облака, формируются и атмосферные фронты, развиваются циклоны и антициклоны, а также другие процессы, определяющие погоду и климат. Происходящие в тропосфере процессы обусловлены, прежде всего, конвекцией.

Тропосферные облака



Стратосфера

- Стратосфера (от лат. *stratum* — настил, слой) – слой атмосферы, располагающийся на высоте от 11 до 50 км.
- Характерно незначительное изменение температуры в слое 11-25 км (нижний слой стратосферы) и повышение её в слое 25-40 км от $-56,5$ до $0,8$ °C (верхний слой стратосферы или область инверсии). Достигнув на высоте около 40 км значения около 273 К (почти 0 °C), температура остаётся постоянной до высоты около 55 км. Эта область постоянной температуры называется стратопазой и является границей между стратосферой и мезосферой. Плотность воздуха в стратосфере в десятки и сотни раз меньше чем на уровне моря.
- Именно в стратосфере располагается слой озоносферы («озоновый слой») (на высоте от 15-20 до 55-60 км), который определяет верхний предел жизни в биосфере. Озон (O_3) образуется в результате фотохимических реакций наиболее интенсивно на высоте ~ 30 км.
- В стратосфере почти нет водяного пара.

Мезосфера

- Мезосфера (от греч. *μεσο-* — «средний») — слой атмосферы на высотах от 40-50 до 80-90 км.
- Характеризуется повышением температуры с высотой; максимум (порядка $+50^{\circ}\text{C}$) температуры расположен на высоте около 60 км, после чего температура начинает убывать до -70° или -80°C . Такое понижение температуры связано с энергичным поглощением солнечной радиации (излучения) озоном.
- Газовый состав мезосферы, как и расположенных ниже атмосферных слоев, постоянен и содержит около 80 % азота и 20 % кислорода.
- Мезосфера отделяется от нижележащей стратосферы стратопаузой, а от вышележащей термосферы — мезопаузой.
- Метеоры начинают светиться и, как правило, полностью сгорают в мезосфере.
- В мезосфере могут появляться серебристые облака.

Серебристые облака

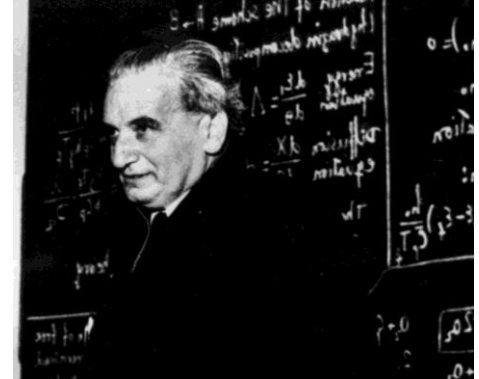


Термосфера

- Термосфера (от греч. *θερμός* – «тёплый») – слой атмосферы, следующий за мезосферой. Начинается на высоте 80-90 км и простирается до 800 км.
- Температура воздуха в термосфере колеблется на разных уровнях, быстро и разрывно возрастает и может варьировать от 200 К до 2000 К, в зависимости от степени солнечной активности. Причиной является поглощение ультрафиолетового излучения Солнца на высотах 150-300 км, обусловленное ионизацией атмосферного кислорода.
- В нижней части термосферы рост температуры в сильной мере обусловлен энергией, выделяющейся при объединении (рекомбинации) атомов кислорода в молекулы (при этом в энергию теплового движения частиц превращается энергия солнечного УФ-излучения, поглощённая ранее при диссоциации молекул O_2).
- На высоких широтах важный источник теплоты в термосфере – тепло, выделяемое электрическими токами магнитосферного происхождения. Этот источник вызывает значительный, но неравномерный разогрев верхней атмосферы в приполярных широтах, особенно во время магнитных бурь.
- В термосфере наблюдаются полярные сияния.

Линия Кармана

- Линия Кáрманa – высота над уровнем моря, которая условно принимается в качестве границы между атмосферой Земли и космосом.
- В соответствии с определением Международной авиационной федерации (ФАИ), линия Кармана находится на высоте 100 км над уровнем моря.
- Название высота получила по имени Теодора фон Кармана. Он первый определил, что примерно на этой высоте атмосфера становится настолько разрежённой, что авиация становится невозможной, так как скорость летательного аппарата, необходимая для создания достаточной подъёмной силы, становится больше первой космической скорости, и поэтому для достижения бо́льших высот необходимо пользоваться средствами космонавтики.
- Первыми млекопитающими, преодолевшими линию Кармана, были собаки Дезик и Цыган, запущенные в СССР.



Теодор фон Кáрман (1881 – 1963) – американский инженер и физик венгерского происхождения, специалист в области воздухоплавания.



Дезик и Цыган. 1951

Полярное сияние



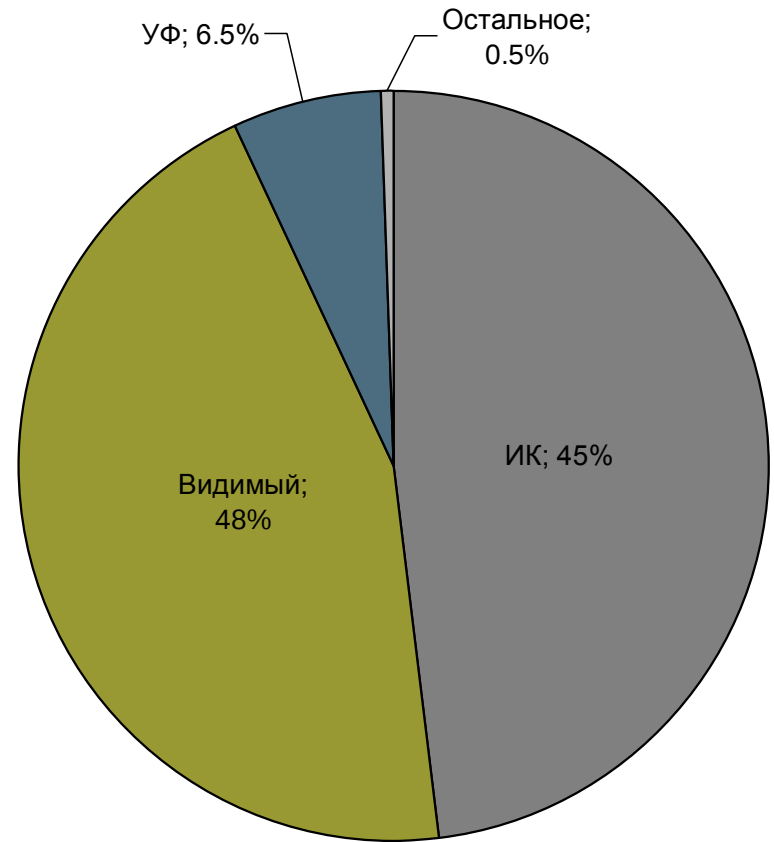
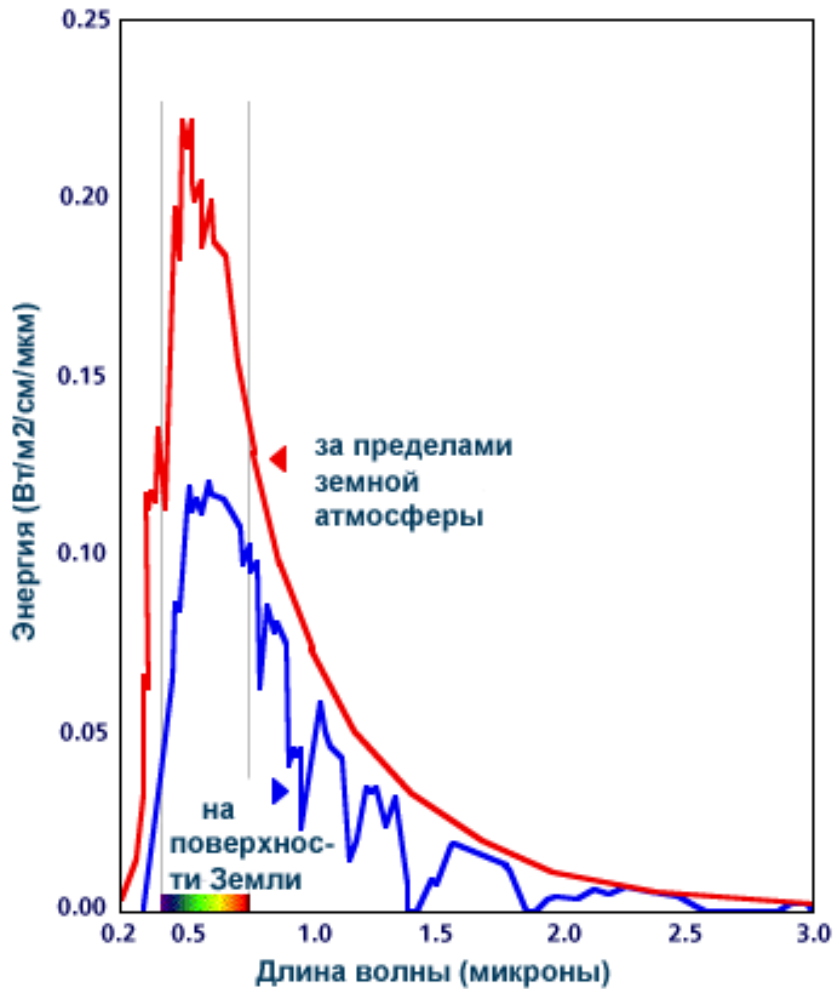
Экзосфера

- Экзосфера (от др.-греч. ἐξω — «снаружи», «вне») — самая внешняя часть верхней атмосферы Земли и планет с низкой концентрацией нейтральных атомов (концентрация частиц 10^7 см^{-3}).
- Частицы экзосферы двигаются в основном по баллистическим траекториям, поэтому при наличии у них второй космической скорости достаточно высока вероятность покинуть планету без столкновений.
- Протяжённую экзосферу планеты часто называют короной; она состоит из атомов водорода, «улетучивающихся» из верхней атмосферы. Корона Земли (геокорона) распространяется вплоть до высот порядка 100 тыс. км, а корона Венеры — до 200 тыс. км.
- Экзосфера Земли состоит из ионизированного газа (плазмы); у её основания отношение концентраций заряженных и нейтральных частиц близко к 1, в верхней части экзосферы газ почти полностью ионизирован. Нижняя и средняя части экзосферы в основном состоят из атомов О и N, с увеличением же высоты быстро растёт относительная концентрация лёгких газов, особенно ионизированного водорода.

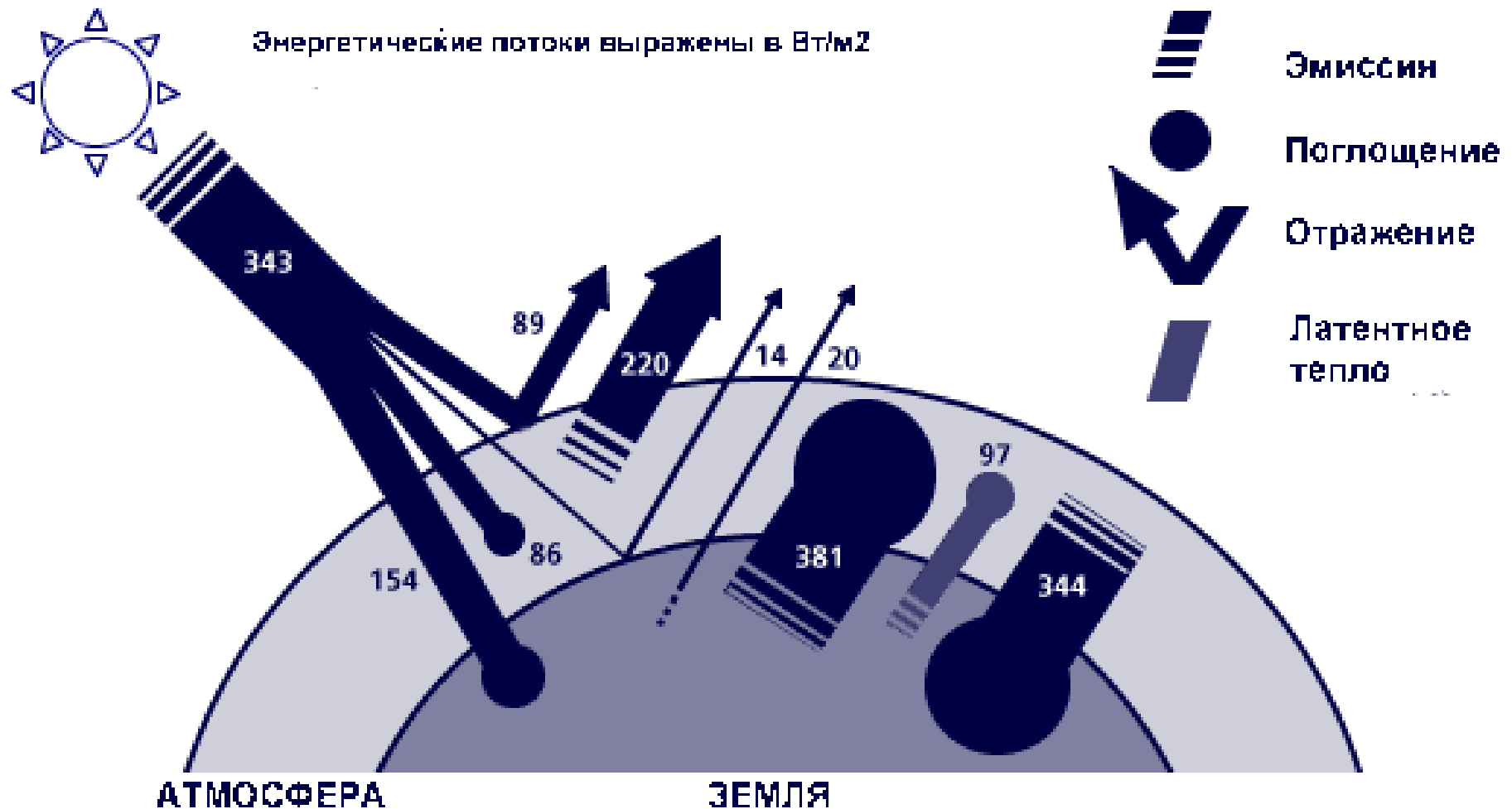
Экзобаза

- Экзобаза – нижняя граница экзосферы, лежащая на высотах порядка 400-800 км. Она определяется из соотношения равенства длины свободного пробега высоте однородной атмосферы.
- Это верхний предел атмосферы, где взаимные соударения удерживают частицы газов, и не происходит выброс газов в космос. Выше экзобазы уже ничто не может остановить атом или молекулу, имеющие достаточную скорость для вылета в космос.
- Температура на высоте экзобазы Земли колеблется вблизи 1000 К, что соответствует средней скорости атомов водорода около 5 км/с. Это меньше второй космической скорости для Земли на этой высоте (10,8 км/с); но скорости атомов вокруг среднего значения распределены широко, поэтому некоторые атомы водорода имеют шанс преодолеть притяжение планеты.

Поступление энергии Солнца



Распределение энергии Солнца на Земле



Преобразование энергии в термосфере

- Слоеное строение атмосферы Земли объясняется различным характером поглощения солнечного света разными газами.
- Первым фильтром на пути к Земле для солнечных лучей является термосфера. Она поглощает самую коротковолновую часть спектра (дальний ультрафиолет). Именно поэтому и происходит разогрев термосферы.
- Следует отметить, что температура термосферы зависит от солнечной активности: в годы спокойного Солнца она ниже (около 1000 K), а в максимумах солнечной активности выше (достигает 1300 K).

Преобразование энергии в стратосфере

- Стратосфера обязана своим существованием озону (O_3), который располагается на высотах от 20 до 60 км. Озон поглощает солнечное излучение в диапазоне $220 \text{ нм} < X < 290 \text{ нм}$ уже в верхней части этого слоя. Поэтому там и температура выше, чем радиационная температура Земли, хотя она и в несколько раз ниже, чем в термосфере. Выше стратосферы озона нет. Коротковолновое ультрафиолетовое излучение Солнца расщепляет его на молекулярный кислород O_2 и атомарный кислород O .
- Между теплыми слоями атмосферы располагаются холодные. Они обмениваются энергией между собой.
- Все сказанное, конечно, относится к освещенной стороне Земли. На ночной стороне происходит охлаждение. Однако половины суток не хватает для размывания «слоистого пирога» атмосферы. Только полярной ночью атмосфера устроена иначе.

Распределение падающего излучения

- В количественном отношении в экзосфере и термосфере поглощается лишь 1 процент солнечного излучения – дальний ультрафиолет.
- 3 процента (ближний ультрафиолет) поглощается озоном стратосферы.
- 4 процента (инфракрасный «хвост» спектра) поглощается водяными парами в верхних слоях тропосферы.
- Оставшиеся 92 % энергии солнечного света приходится на «окно прозрачности» атмосферы. Это излучение в диапазоне длин волн $290 \text{ нм} < X < 2400 \text{ нм}$.
- Значительная его часть (45%), преимущественно в синей области спектра, рассеивается воздухом, отчего небо голубое.
- Прямые солнечные лучи (оставшиеся 47%) достигают поверхности Земли.

Распределение отражённого и рассеянного излучение

- Земля отражает около 7 % из этих 47 %.
- Из них 3 % тратится на диффузное рассеивание.
- Остальные 40 % и еще 8 % от атмосферы поглощаются Землей, нагревая сушу и океан.
- Рассеянное в атмосфере световое излучение частично поглощается ею, а остальное распределяется между поверхностью Земли и космосом, причем в космос уходит больше энергии, чем попадает на Землю. Виноваты в этом, главным образом, облака. Они непрозрачны и отражают падающий на них сверху свет обратно.
- Таким образом, в тепло переходит 65 % падающего на Землю потока солнечной энергии:
 - 3% — поглощение в озоновом слое стратосферы,
 - 4% — поглощение в водяных парах верхней тропосферы,
 - 10% — поглощение в основной толще атмосферы и
 - 48% — поглощение почвой и водами Мирового океана. Это тепло излучается в космос тепловой радиацией в виде инфракрасного излучения.

Распределение солнечной радиации на поверхности Земли

