

Химия окружающей среды

КУЗНЕЦОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ,

профессор кафедры ЮНЕСКО

«Зеленая химия для устойчивого развития»

3 корпус, 3 этаж, ком. 308

vakuz@ibox.ru

Лекция 1

Химия окружающей среды

В 70-ых годах двадцатого столетия возникло новое научное направление-химия окружающей среды. Химия окружающей среды базируется на основных законах и понятиях классической химии, однако объекты исследования в этом случае находятся в биосфере и других оболочках Земли. Это сравнительно молодая область знаний интенсивно развивается в нашей стране и за рубежом. Оболочки Земли (или сферы) – атмосфера, гидросфера, литосфера, криосфера, биосфера,-тесно связаны одна с другой потоками вещества и энергии, которые, в то же время, формируют в каждой из них специфические особые системы. Курс лекций посвящен рассмотрению физико-химических процессов, протекающих в Земных геосферах.

Химия окружающей среды

Модуль 1

Строение и состав атмосферы

Бальная шкала оценки знаний

| Баллы в осеннем семестре | |
|--------------------------|-----|
| Контрольная работа № 1 | 20 |
| Контрольная работа № 2 | 20 |
| Контрольная работа № 3 | 40 |
| Самостоятельная работа: | |
| контрольные по фильмам, | 10 |
| доклады | 10 |
| <hr/> | |
| Итого | 100 |
| Зачет минимум | 55 |

Примерная тематика реферативно-аналитической работы

На сентябрь:

- Основные энергетические потоки на планете Земля.
- Современные представления о строении Солнца.
- Солнечное излучение в различные периоды активности солнца.
- Радиационные пояса Земли.
- Спектр солнечного излучения.
- Происхождение химических элементов.
- Большой взрыв и эволюция Вселенной.
- Фотохимические процессы в верхних слоях атмосферы Земли.
- Теоретические представления о происхождении жизни на планете Земля.

На октябрь

- Формирование атмосферы Земли и изменения ее состава.
- Влияние вулканической деятельности на озоновый слой планеты.
- Состояние озонового слоя в настоящее время.
- Единицы измерения основных метеорологических параметров.
- Методы и приборы для определения температуры атмосферы.
- Методы и приборы для определения влажности в атмосфере.
- Методы и приборы для определения давления в атмосфере.
- Методы и приборы для определения скорости и направления ветра в атмосфере.
- Международная классификация облаков.
- Глобальные циркуляции в атмосфере Земли.

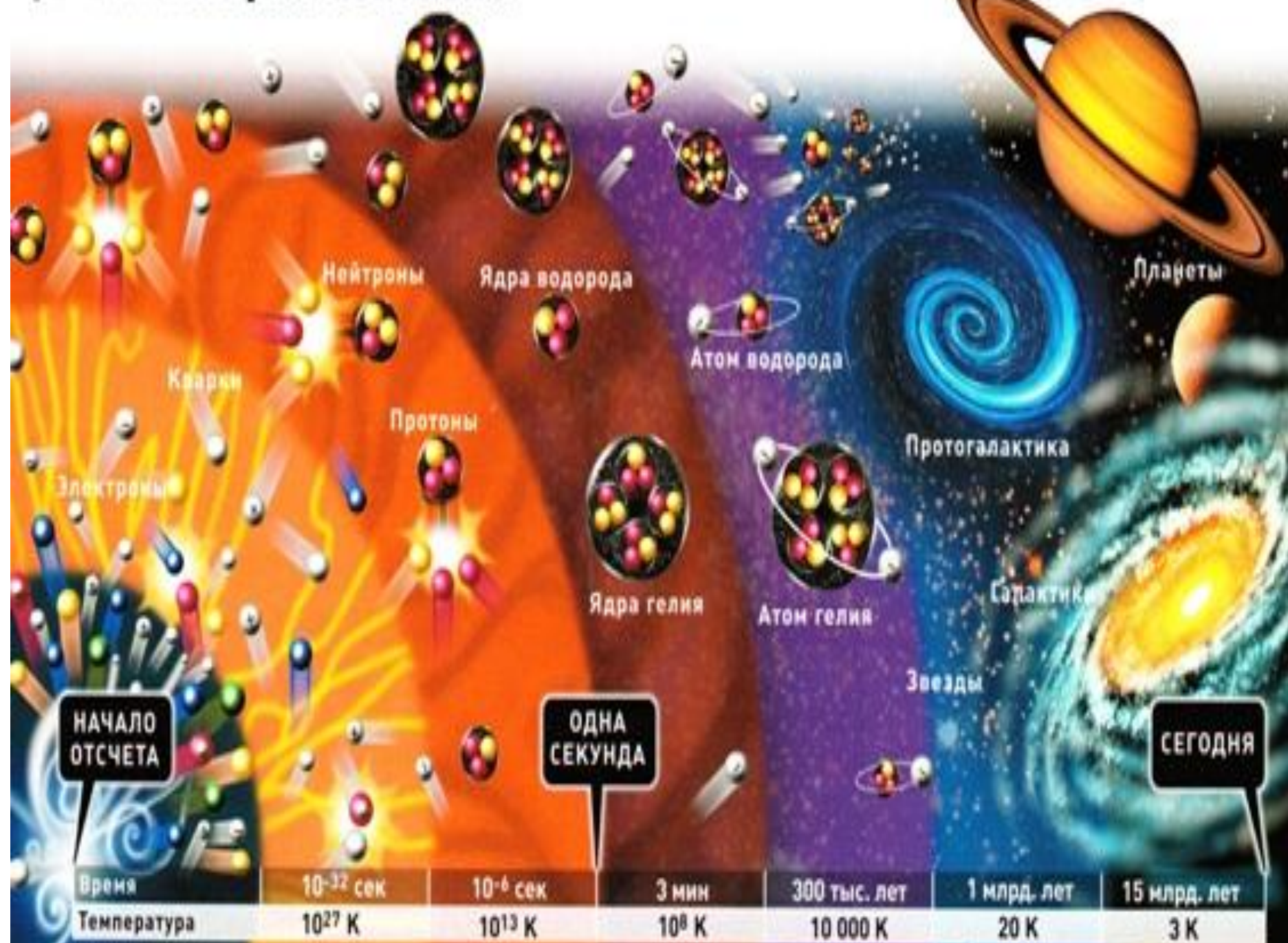
На ноябрь

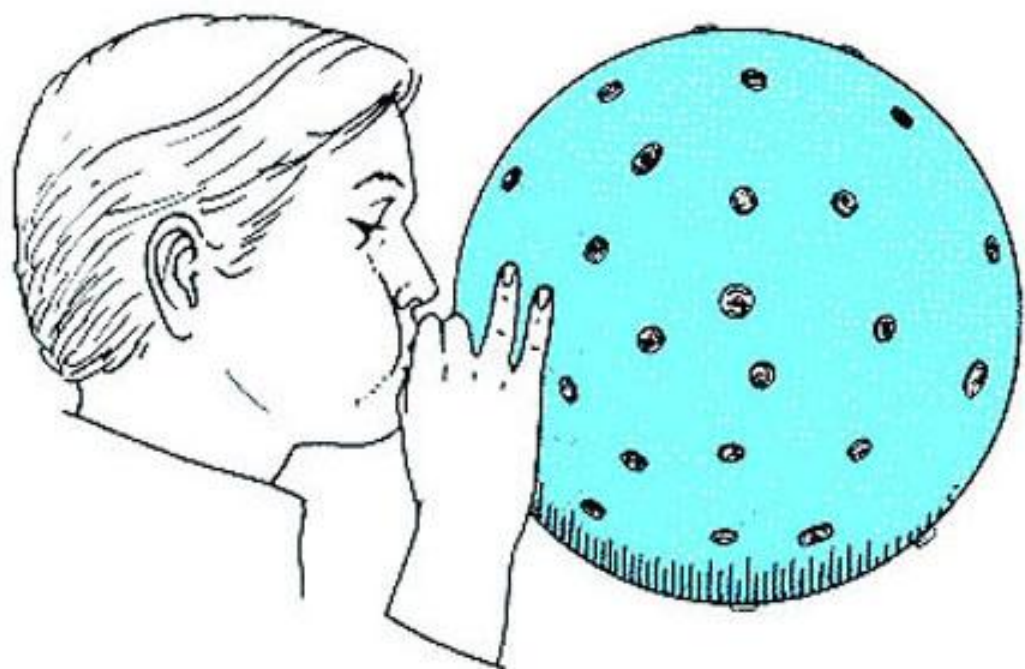
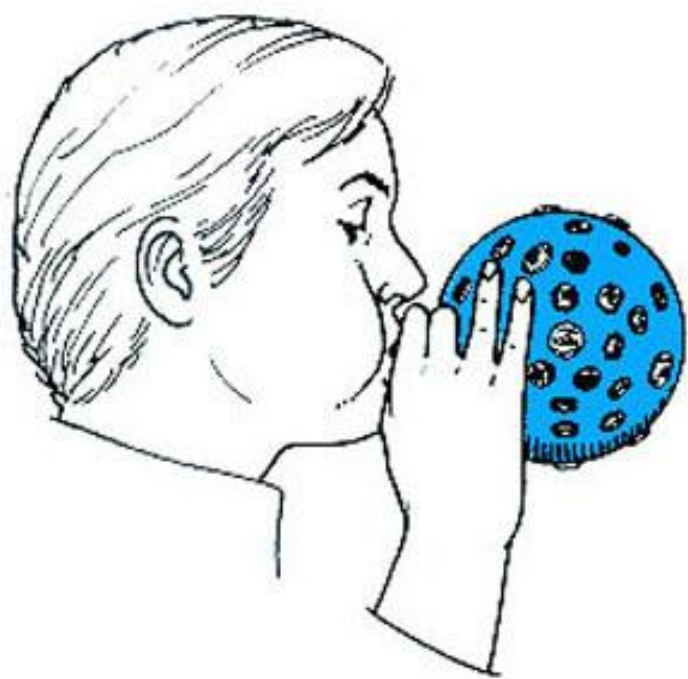
- Местные ветры и их влияние на климат.
- Основные парниковые газы и изменение их содержания в атмосфере Земли.
- Механизмы образования оксидов азота в процессах горения.
- Основные тенденции в процессах загрязнения атмосферы оксидами серы и азота в последние годы.
- Причины и последствия трансграничного переноса соединений серы в Европе.



Эволюция Вселенной

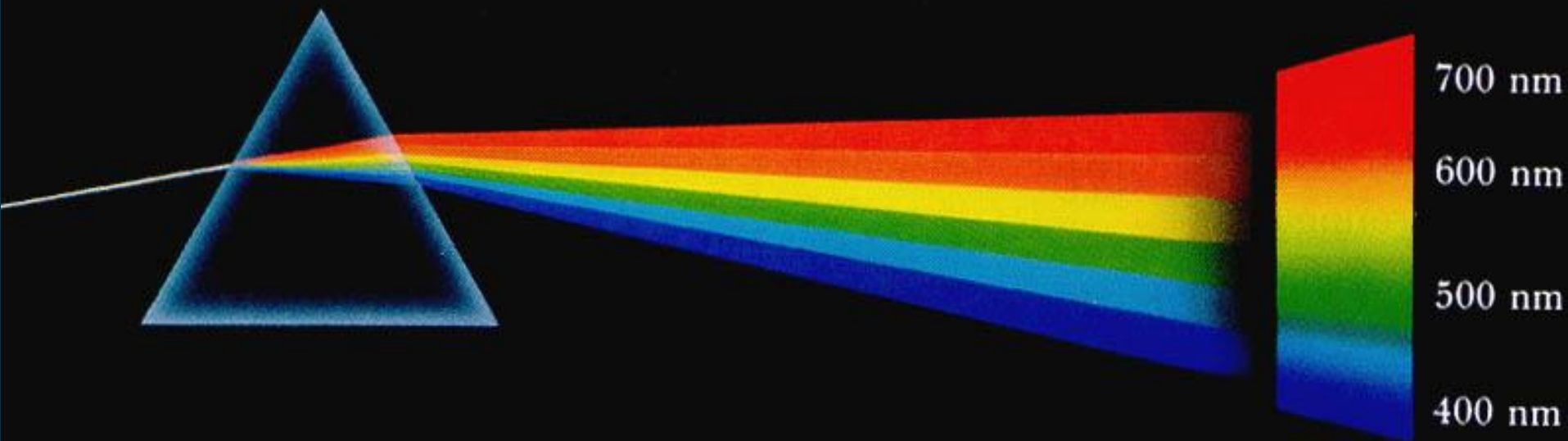
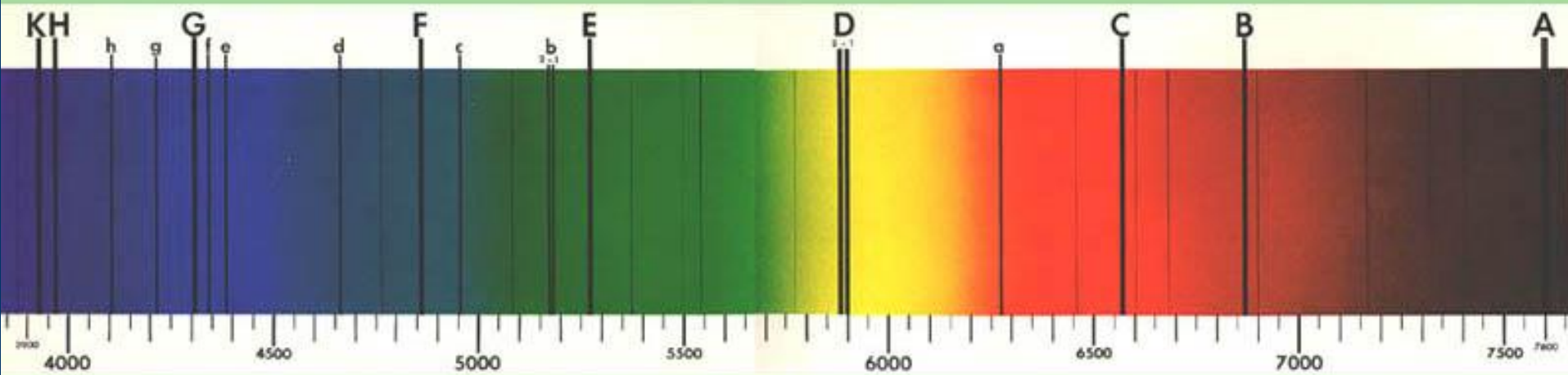
Краткая история вселенной





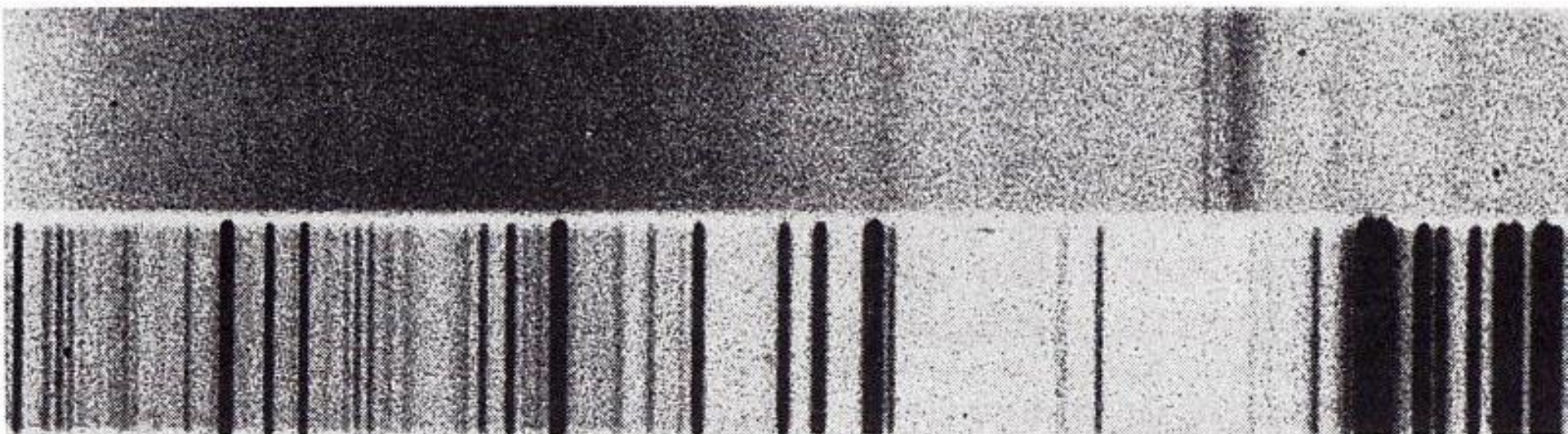
Модель расширения Вселенной

Оптический спектр типичной звезды

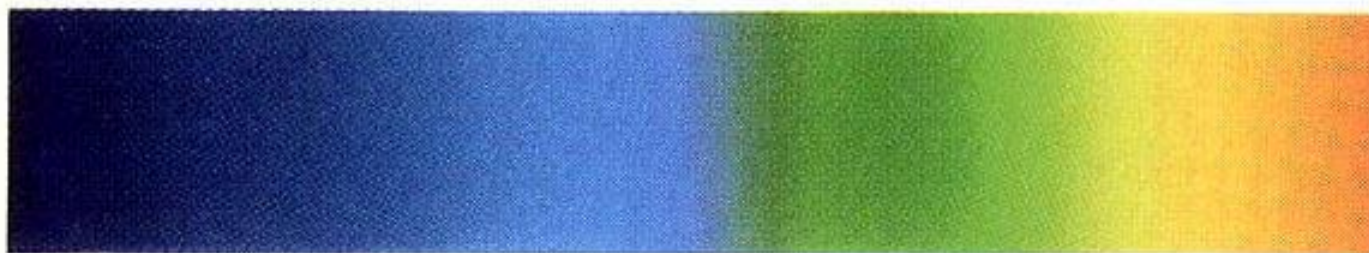


3C 273

H δ H γ H β [O III]



Comparison



Спектр ярчайшего из квазаров 3C 273 ($m_v = 12,8$; $z = 0,158$)

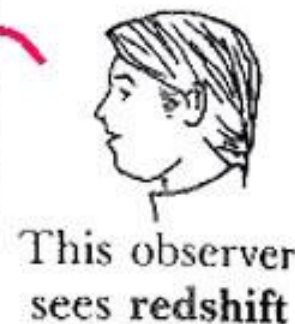
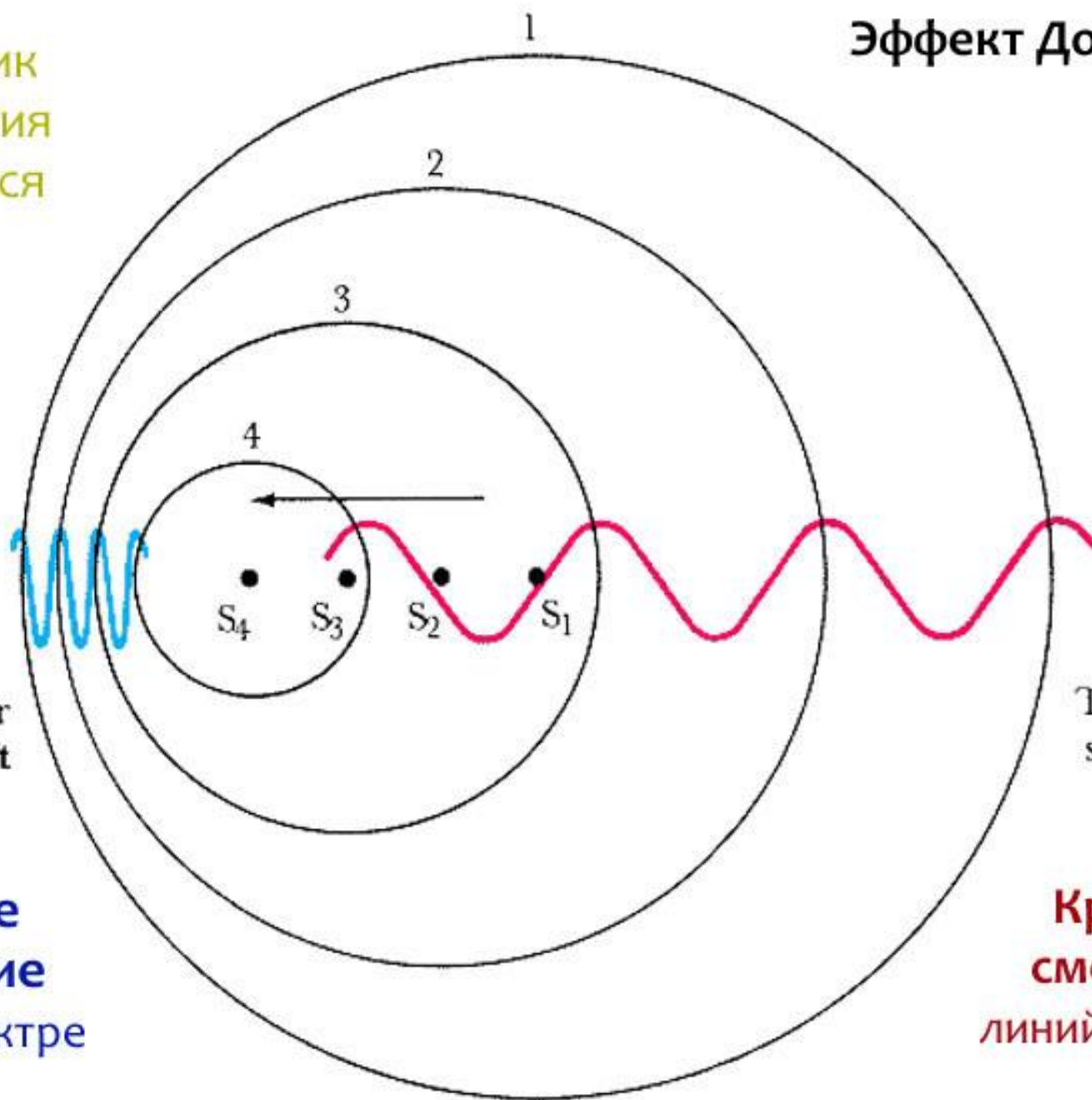
Эффект Доплера

Источник излучения движется



This observer sees **blueshift**

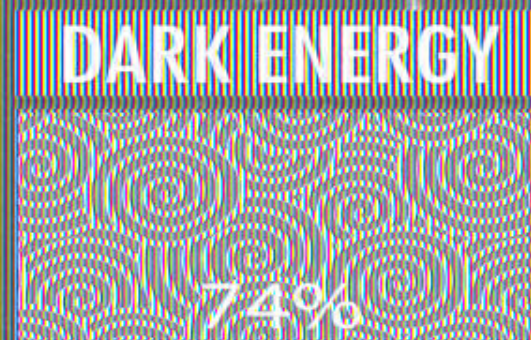
Голубое смещение
линий в спектре



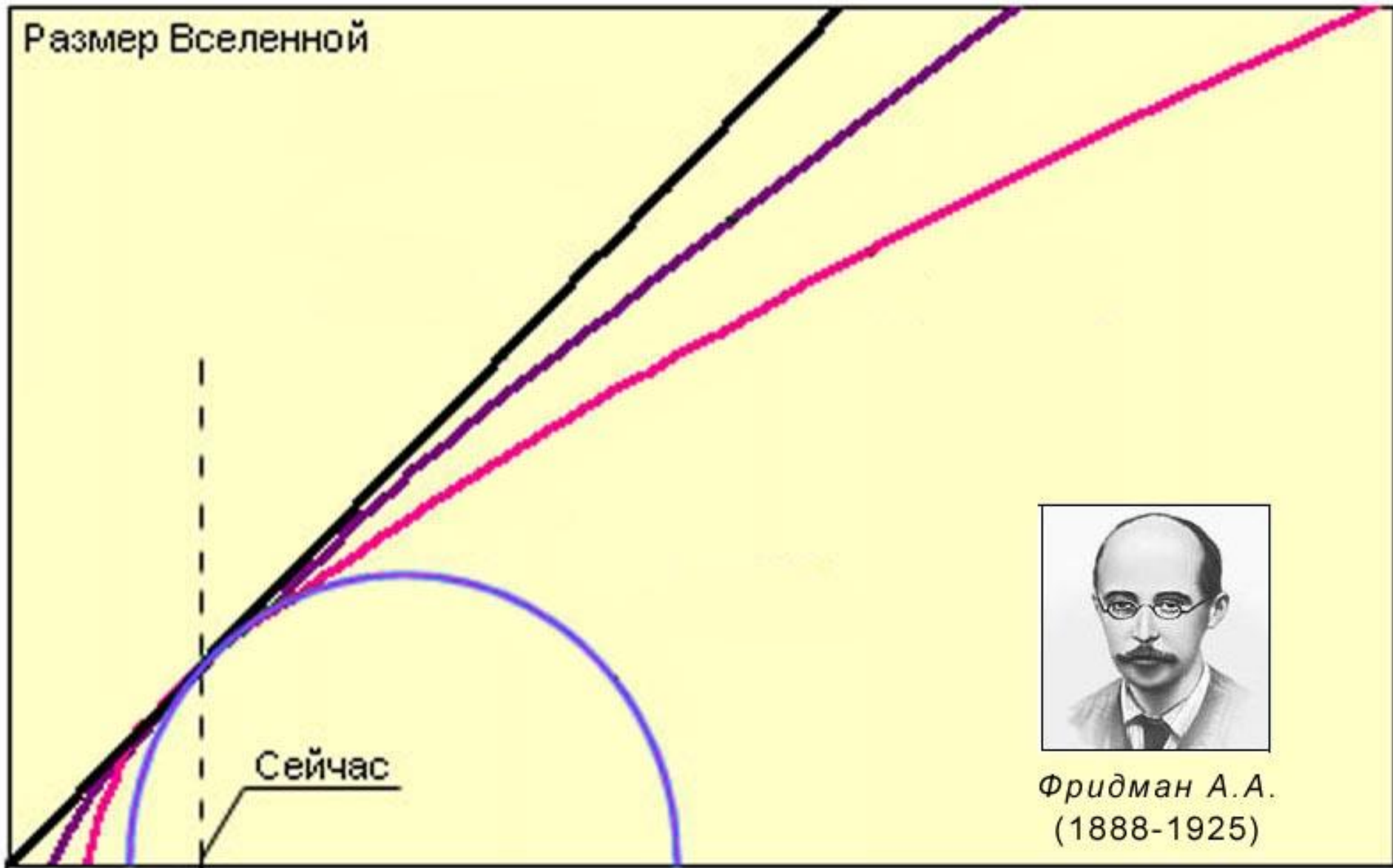
This observer sees **redshift**

Красное смещение
линий в спектре

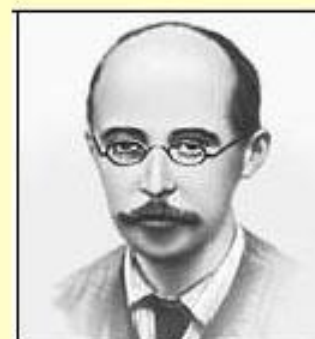
What The Universe Is Made Of



Размер Вселенной



Сейчас



Фридман А.А.
(1888-1925)

$1/H$

Время

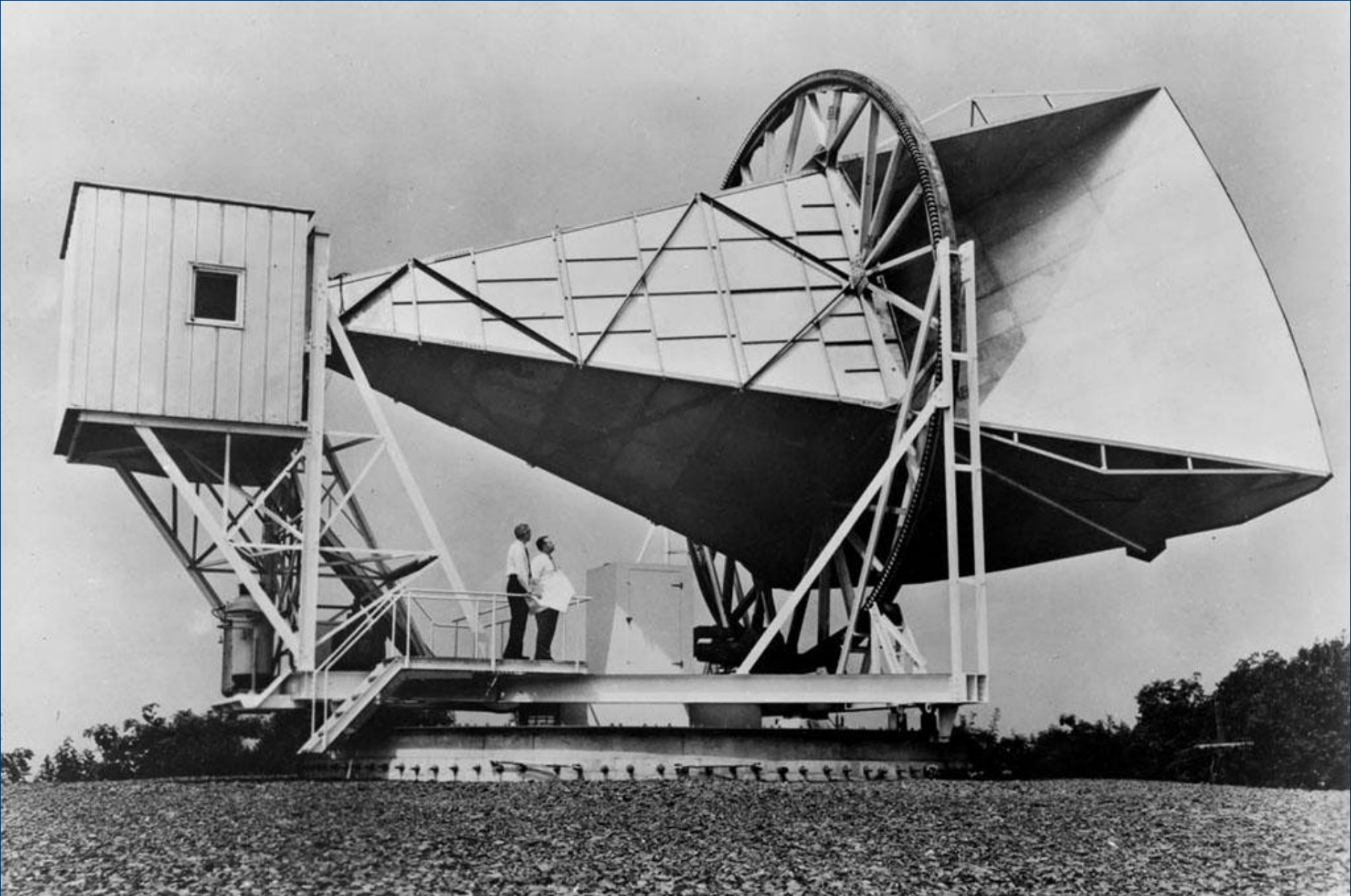
Изменение масштабного фактора со временем

Реликтовое излучение

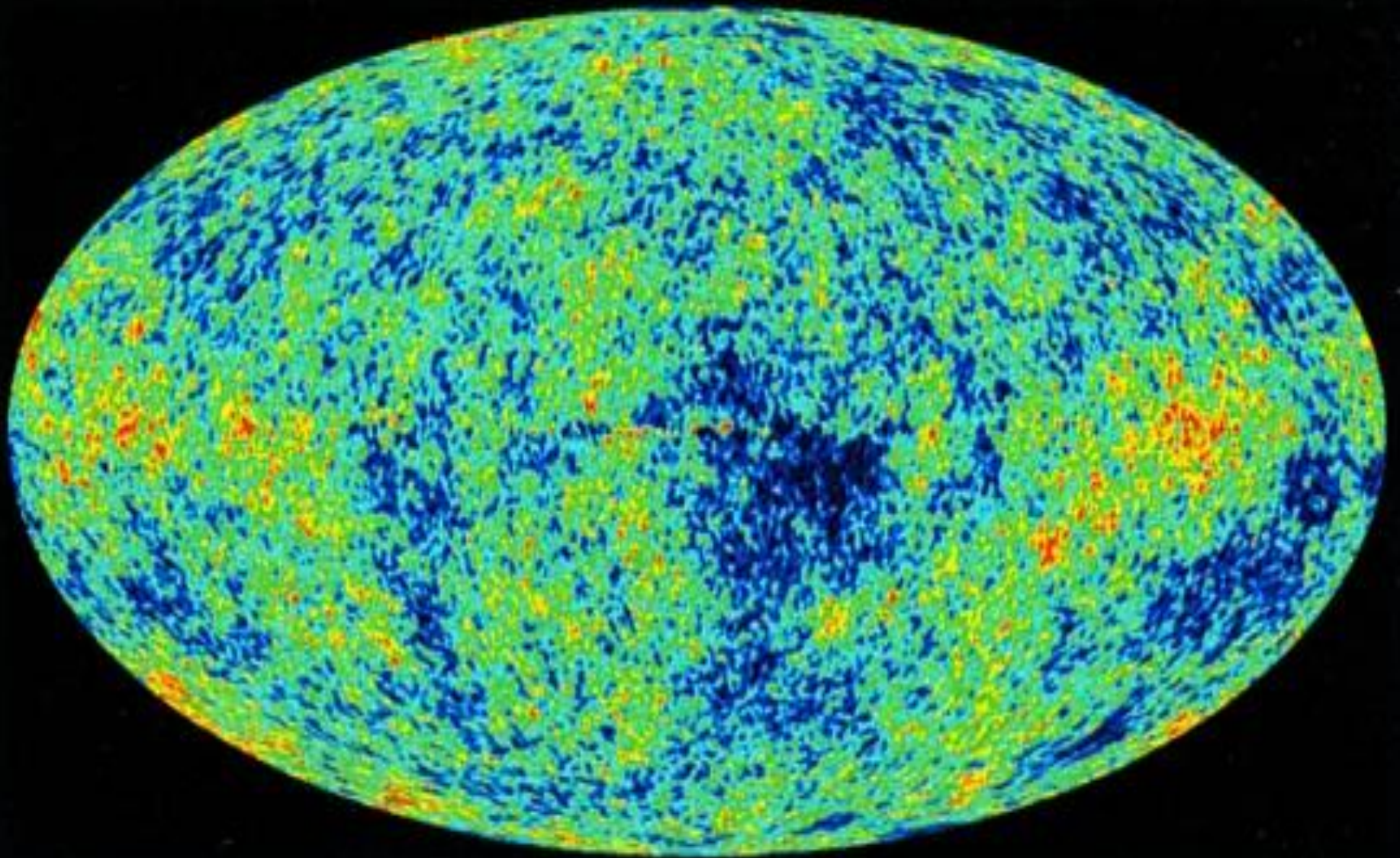
Подтверждение факта Большого взрыва
пришло в 1965 году, когда американские
радиоастрономы

Р. Вильсон и А. Пензиас обнаружили
реликтовое электромагнитное излучение с
температурой около 3° по шкале Кельвина
(-270°C).

Именно это открытие, неожиданное для
ученых, убедило их в том, что Большой
взрыв действительно имел место и поначалу
Вселенная была очень горячей.

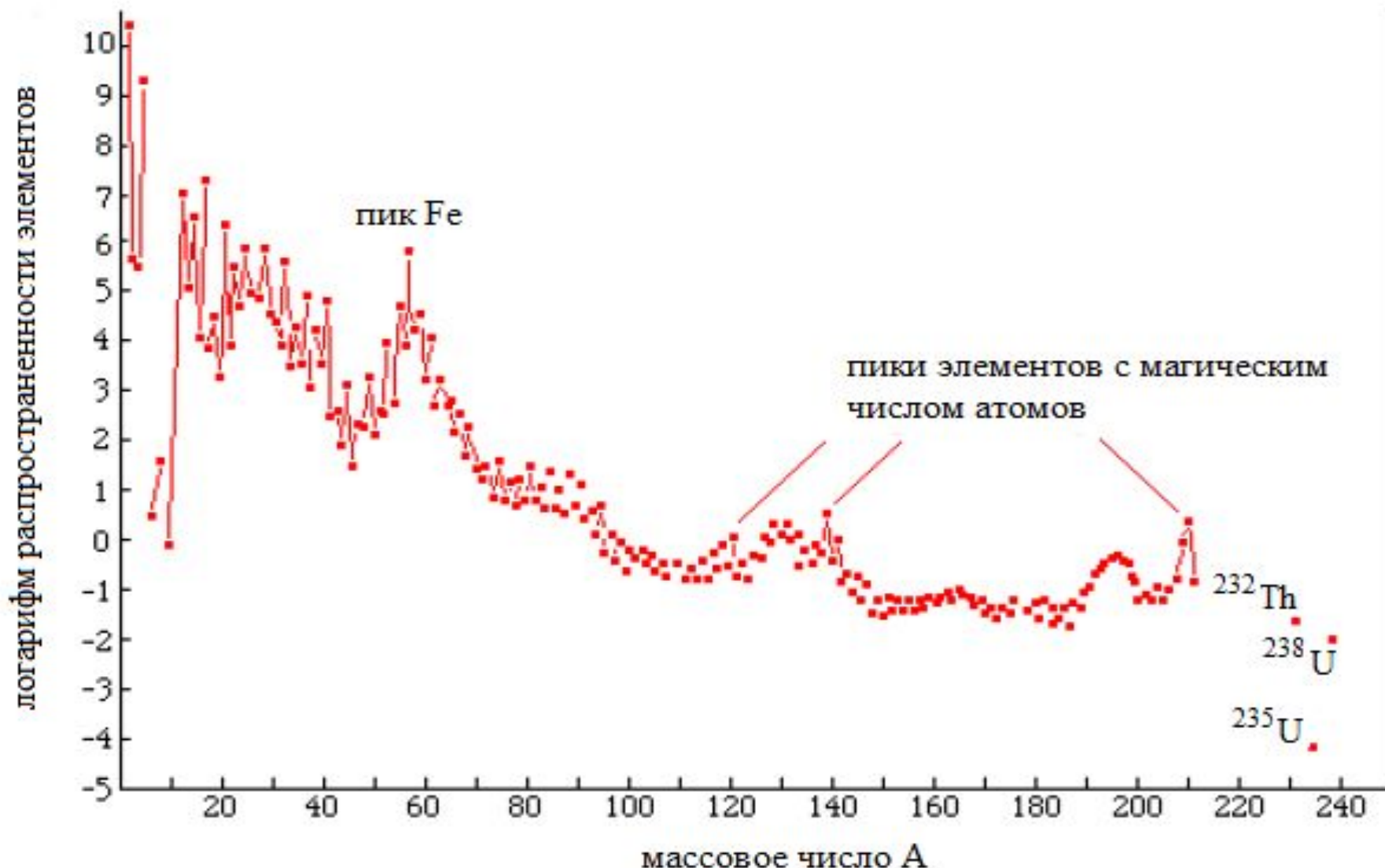


Рупорная антенна, с которой в 1965 г. было открыто реликтовое излучение Bell Labs, Holmdel, New Jersey. Арно Пензиас и Роберт Вилсон (Ноб.премия 1978)



- 13,7 млрд лет назад – Большой взрыв
- Через 400 000 лет – атомы (водород, гелий, литий)
- Через 1 млрд лет – звезды первого поколения, галактики
- Через 3 млрд лет – звезды второго поколения
- Около 4,6 млрд лет назад – наша Солнечная система

Распространенность элементов во Вселенной



Атмосфера

Перевод с греческого

ατμός — «пар»

σφαῖρα — «сфера»

Газовая оболочка небесного тела, удерживаемая около него гравитацией.

Атмосферой принято считать область вокруг небесного тела, в которой газовая среда вращается вместе с ним как единое целое

Наука об атмосфере – называется

Метеорологией

<http://meteorologist.ru/>

Метеороло́гия

(μετέωρος)

Перевод с греческого

metéōros — атмосферные и небесные явления

λογία — наука

Научно-прикладная область знания о
строении и свойствах Земной
атмосферы и совершающихся в
ней физико-химических процессах

Тропосфера

Нижний слой атмосферы в котором температура , в среднем, убывает с высотой.

В тропиках слой тропосферы простирается до высоты 15 – 17 км.

В умеренных широтах до 10 – 12 км.

Над полюсами до 8 – 9 км.

Изменения температуры с высотой в среднем составляют:

| Широтный район Земли | Интервал температур (градус Цельсия) | |
|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| | У Земной поверхности | На верхней границе |
| Тропики | + 26 (максимальное значение 60) | До - 80 |
| Умеренные широты | +3 | До -58 |
| Северный полюс и Антарктидой | -23 | -60 (зимой) -48 (летом) |

Уровень моря — 101,3 [кПа](#) (1 [атм.](#); 760 [мм рт. ст атмосферного давления](#)), плотность среды $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул в см^3 .

• 0,5 км — до этой высоты проживает 80 % человеческого населения мира.

• 2 км — до этой высоты проживает 99 % населения мира.

• 2—3 км — начало проявления недомоганий ([горная болезнь](#)) у [неакклиматизированных](#) людей.

• 5,0 км — 50 % от атмосферного давления на уровне моря.

• 6 км — граница постоянного обитания человека, граница наземной жизни в [горах](#).

• 8,848 км — высочайшая точка Земли гора [Эверест](#) — предел доступности пешком.

12 км — дыхание воздухом эквивалентно пребыванию в космосе (одинаковое время потери сознания ~10—20 с); потолок дозвуковых пассажирских самолётов

Тропопауза

- 10—18 км — граница между тропосферой и стратосферой на разных широтах (тропопауза). Также это граница подъёма обычных облаков, дальше простирается разрежённый и сухой воздух.

Стратосфера

Эта область атмосферы расположена выше тропопаузы до высоты 50-55 км.

Температура в среднем растет с высотой, до высоты 25 км медленно растет, в полярных широтах даже иногда падает, с 34-36, км, происходит быстрое возрастание температуры.

На высоте 50 км располагается стратопауза.

В этой зоне температура практически не меняется с высотой и в среднем составляет -2 или -3 градуса Цельсия.

В стратосфере нет конвективных вертикальных движений и активного перемещения, свойственных тропосфере.

18,9—19,35 км — [линия Армстронга](#) — **начало космоса для организма человека** — закипание воды при температуре человеческого тела. Внутренние телесные жидкости на этой высоте ещё не кипят, поскольку тело генерирует достаточно внутреннего давления, чтобы предотвратить этот эффект, но могут начать кипеть слюна и слёзы с образованием пены, набухать глаза.

20км — потолок тепловых [аэростатов \(монгольфьеров\)](#) (19 811 м).

20—22 км — **верхняя граница биосферы**: предел подъёма в атмосферу живых спор и бактерий воздушными потоками. 25—26

км — максимальная высота установившегося полёта существующих реактивных самолётов ([практический потолок](#)).

15—30 км — [озоновый слой](#) на разных широтах.

Мезосфера

Это область атмосферы расположена выше стратосферы до высоты примерно 80-82 км.

В мезосфере температура понижается в верхней части до – 110 градусов Цельсия, в связи с этим в мезосфере сильно развита турбулентность.

- Мезосфера заканчивается **мезопаузой**.
- 80 км — граница между мезосферой и термосферой (мезопауза): высота серебристых облаков.

34,668 км — официальный рекорд высоты для [воздушного шара \(стратостата\)](#), управляемого двумя стратонавтами ([Проект Страто-Лаб](#), 1961 г.).

35 км — **начало космоса для воды** или [тройная точка воды](#): на этой высоте вода кипит при 0 °С, а выше не может находиться в жидком виде.

37,8 км — рекорд высоты существующих турбореактивных самолётов ([МиГ-25М](#), [динамический потолок](#)).

41,42 км — рекорд высоты стратостата, управляемого одним человеком, а также рекорд высоты прыжка с парашютом, выполненный вице-президентом компании [Гугл Аланом Юстасом](#) 24 октября 2014 года.

45 км — теоретический предел для прямогочного воздушно-реактивного самолёта.

48 км — атмосфера не ослабляет [ультрафиолетовые лучи](#) Солнца.

50 км — граница между стратосферой и [мезосферой](#) ([стратопауза](#)).

Термосфера

Верхняя часть атмосферы расположенная над мезопаузой.

В термосфере температура резко возрастает с высотой.

В годы активного солнца на высоте 200-250 км температура превышает 1500 градусов Цельсия.

100 км — официальная международная граница между атмосферой и космосом — линия Кармана, определяющая границу между авиацией и космонавтикой. Аэродинамические поверхности (крылья) начиная с этой высоты не имеют смысла, так как скорость полёта для создания подъёмной силы становится выше первой космической скорости 118 км — переход от атмосферного ветра к потокам заряжённых частиц.

122 км — первые заметные проявления атмосферы во время возвращения на Землю с орбиты: набегаящий воздух начинает разворачивать [Спейс Шаттл](#) носом по ходу движения, начинается ионизация воздуха от трения и нагрев корпуса.

120—130 км — спутник на круговой орбите с такой высотой сможет сделать не более одного оборота.

Плотность среды на этой высоте 12 триллионов молекул на 1 дм³.

200 км — наиболее низкая возможная орбита с краткосрочной стабильностью (до нескольких дней).

- 302 км — максимальная высота (апогей) первого пилотируемого космического полёта (Гагарин Ю.А. на космическом корабле Восток-1, 12 апреля 1961 г.)
- 350 км — наиболее низкая возможная орбита с долгосрочной стабильностью (до нескольких лет)
- 500 км — начало внутреннего протонного радиационного пояса и окончание безопасных орбит для длительных полётов человека.
- 400 км — высота орбиты Международной космической станции
- 690 км — граница между термосферой и экзосферой.

Экзосфера

Экзосфе́ра (от [др.-греч.](#) ἔξω — «снаружи», «вне» и σφαῖρα — «шар», «сфера») — самая внешняя часть верхней атмосферы Земли с низкой концентрацией нейтральных атомов (концентрация частиц $n_0 < 10^7 \text{ см}^{-3}$)

Это слой выше 800 -1000 км называют внешней атмосферой и иногда сферой ускользания газов.

Граница атмосферы

Граница между атмосферой и межпланетным пространством располагается в [экзосфере](#), начинающейся на высоте около 700 км от поверхности Земли и может условно проводиться по высоте в 1300 км

По определению, предложенному Международной Авиационной Федерацией, граница атмосферы и космоса проводится по [линии Кармана](#), расположенной на высоте около 100 км, где авиация становится полностью невозможной.

Линия Кармана — высота над уровнем моря, которая условно принимается в качестве границы между атмосферой Земли и космосом.

Магнитосфера

Водород ускользающий из экзосферы образует земную корону , простирающуюся на 20000 км.

В этой области концентрация частиц составляет 1000 частиц на куб. см., что примерно в десять раз выше чем в межпланетном пространстве.

Газ сильно ионизирован на движение частиц значительное влияние оказывает магнитное поле Земли.

2000 км — атмосфера не оказывает воздействия на спутники и они могут существовать на орбите многие тысячелетия.

3000 км — максимальная интенсивность потока протонов внутреннего радиационного пояса.

12 756 км — мы отделились на расстояние, равное диаметру планеты Земля.

17 000 км — внешний электронный радиационный пояс.

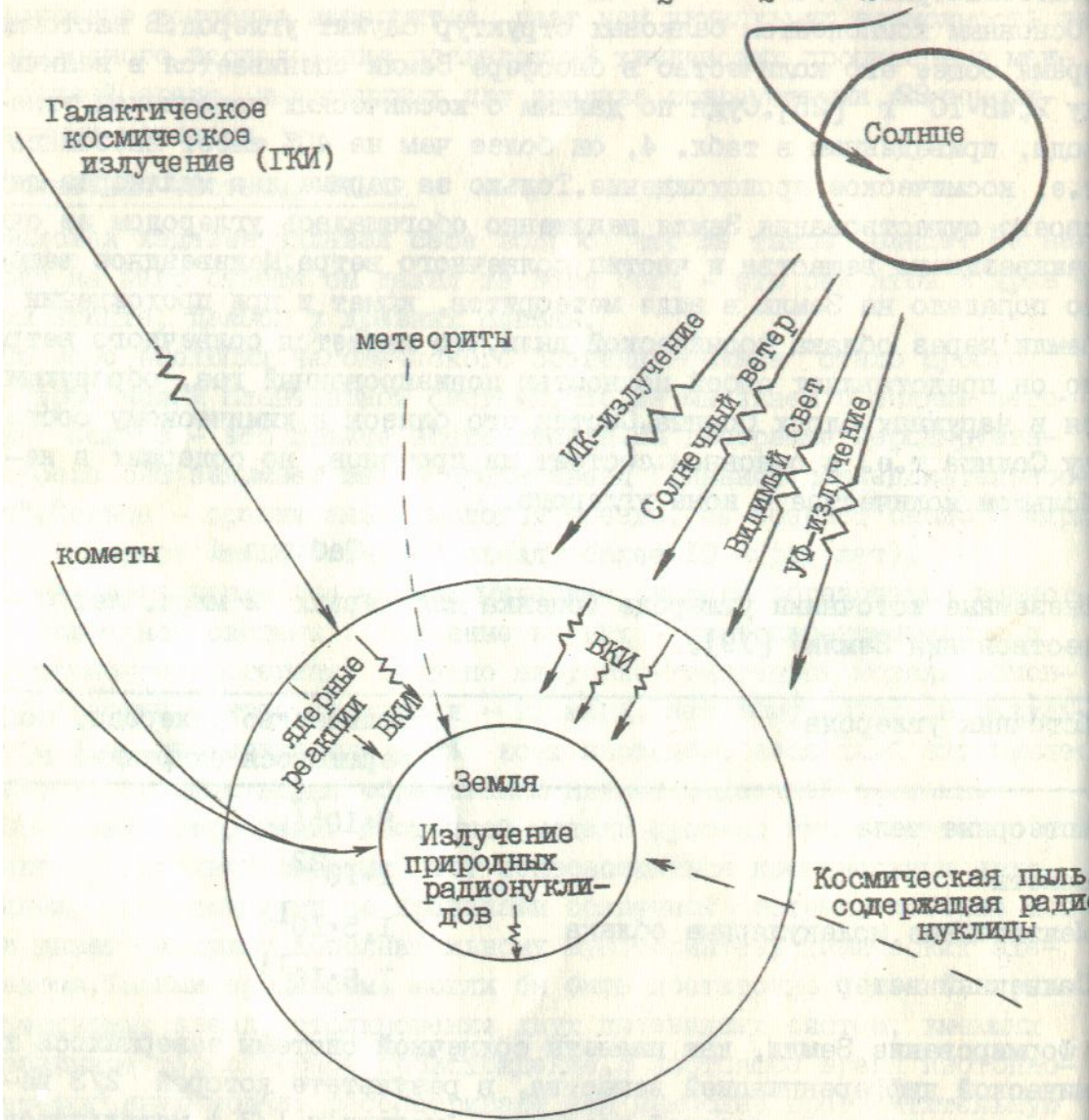
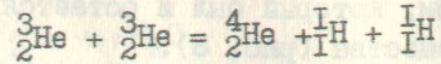
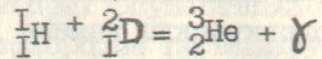
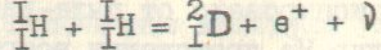
27 743 км — наименьшее расстояние от Земли, на котором пролетел заранее (свыше 1 дня) обнаруженный астероид 2012 DA14 диаметром 44 м и массой около 130 тыс. тонн.

35 786 км — высота геостационарной орбиты, спутник на такой высоте будет всегда висеть над одной точкой экватора.

ок. **100 000 км** — верхняя замеченная спутниками граница экзосферы (геококона) Земли. Атмосфера закончилась, началось межпланетное пространство

**Характеристика основных зон, выделяемых
в стандартной атмосфере**

| Зона атмосферы | Температура, °С | | Температурный градиент, °С/км | Верхняя и нижняя граница от уровня моря, км |
|----------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---|
| | нижняя граница зоны | верхняя граница зоны | | |
| Тропосфера | 15 | -56 | -6,45 | 0-11 |
| Стратосфера | -56 | -2 | +1,38 | 11-50 |
| Мезосфера | -2 | -92 | -2,56 | 50-85 |
| Термосфера | -92 | 1200 | +3,11 | 85-500 |



Земля и ее космические связи

Источник энергии Солнце

Полная мощность излучения Солнца оценивается в **3,86**
·10²⁶ ватт что более чем в два миллиарда раз больше,
чем мощность излучения, падающего на поверхность
Земли. Другими словами, вследствие термоядерных
реакций в центре Солнца, наше светило ежесекундно
теряет массу около 4 000 000 тонн.

Закон смещения Вина

Длина волны — на которую приходится максимум энергии в спектре равновесного излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре излучающего тела

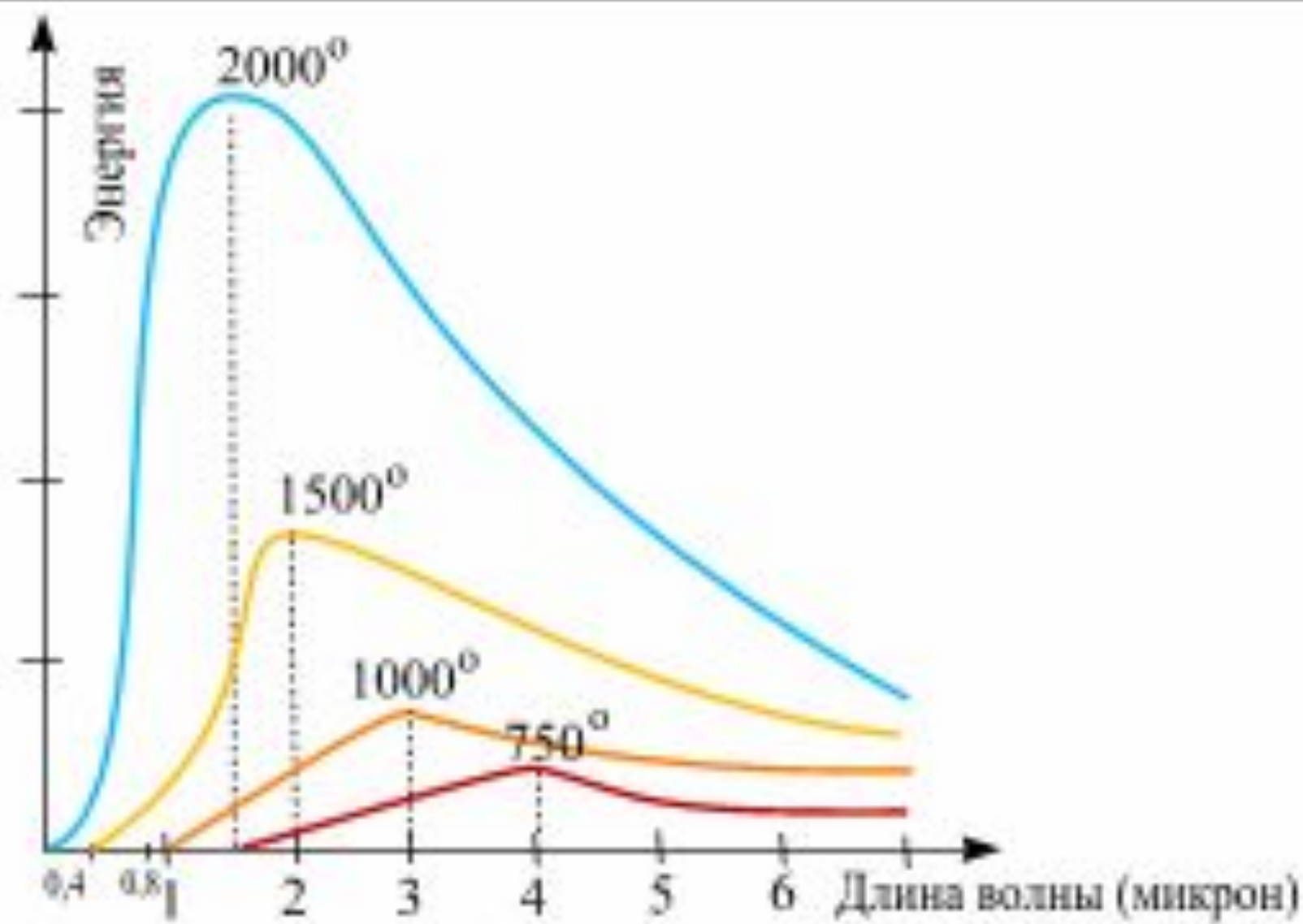
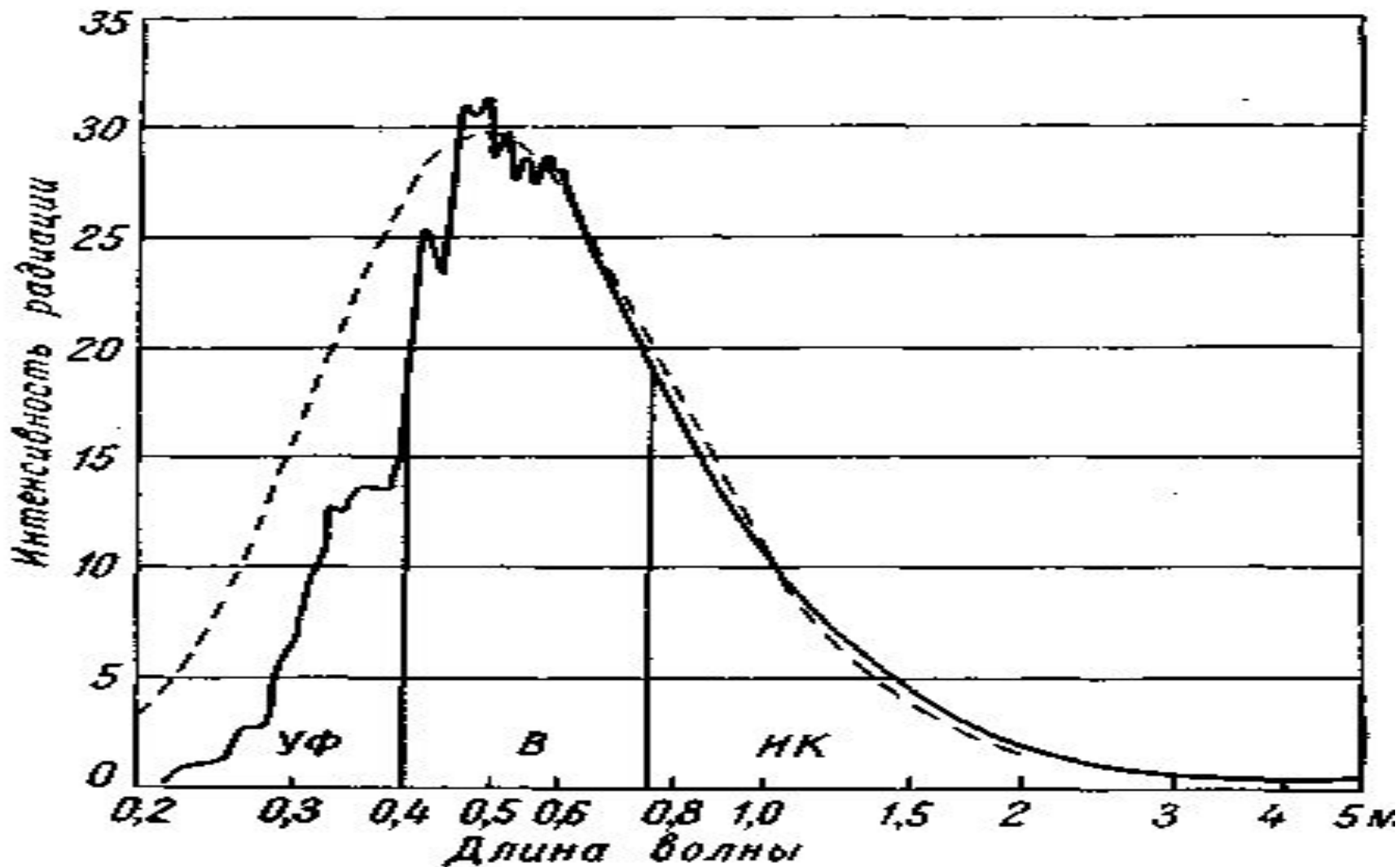


Рис.368. Зависимость максимума излучения от абсолютной температуры.

Фотосфэра

Излучающий слой звёздной атмосферы, в котором формируется непрерывный спектр излучения. Фотосфера даёт основную часть излучения звезды.

Распределение лучистой энергии в спектре солнечной радиации до поступления в атмосферу (сплошная линия) и в спектре абсолютно черного тела при температуре 6000° (прерывистая линия).



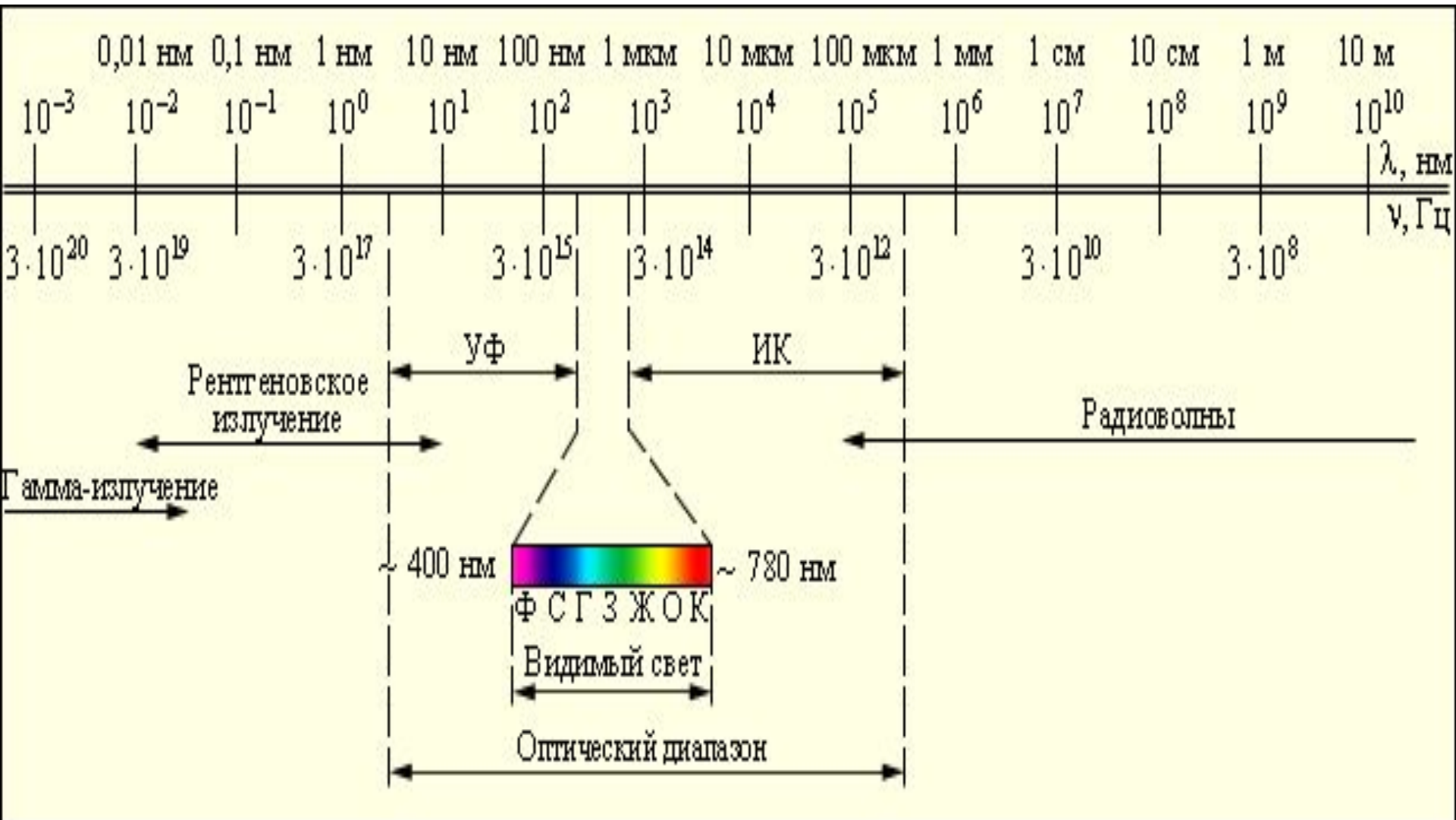
Частота и длина волны

Электромагнитная волна характеризуется одним главным параметром — числом гребней, которые за секунду проходят мимо наблюдателя (или поступают в детектор). Эту величину называют частотой излучения ν .

Поскольку для всех электромагнитных волн скорость в вакууме (c) одинакова, по частоте легко определить длину волны λ :

$$\lambda = c/\nu.$$

Шкала электромагнитных волн



Спектральный состав солнечной радиации

На интервал длин волн между 0,1 и 4 мк приходится 99% всей энергии солнечной радиации.

Всего 1% остается на радиацию с меньшими и большими длинами волн, вплоть до рентгеновых лучей и радиоволн.

Видимый свет занимает узкий интервал длин волн, всего от 0,40 до 0,75 мк.

Однако в этом интервале заключается почти половина всей солнечной лучистой энергии (46%). Почти столько же (47%) приходится на инфракрасные лучи, а остальные 7% — на ультрафиолетовые.

Температурную радиацию с длинами волн от 0,002 до 0,4 *мк* называют **ультрафиолетовой**.

Она невидима, т. е. не воспринимается глазом.

Радиация от 0,40 до 0,75 *мк* — **видимый свет**,
воспринимаемый глазом.

Свет с длиной волны около 0,40 *мк* — фиолетовый,
с длиной волны около 0,75 *мк* — красный.

Радиация с длинами волн больше 0,75 *мк* и до нескольких сотен микронов называется **инфракрасной**;

она, так же как и ультрафиолетовая, невидима.

ФОТОХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

На первом этапе фотохимической реакции поглощение фотона приводит к возбуждению молекулы:



где A^ - молекула в возбужденном состоянии.*

Следующий этап фотохимической реакции может протекать по одному из пяти возможных направлений.

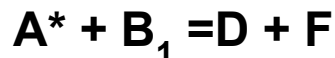
Молекула возвращается в первоначальное состояние в результате процесса флюоресценции:



Молекула диссоциирует:



Молекула вступает в химическую реакцию:



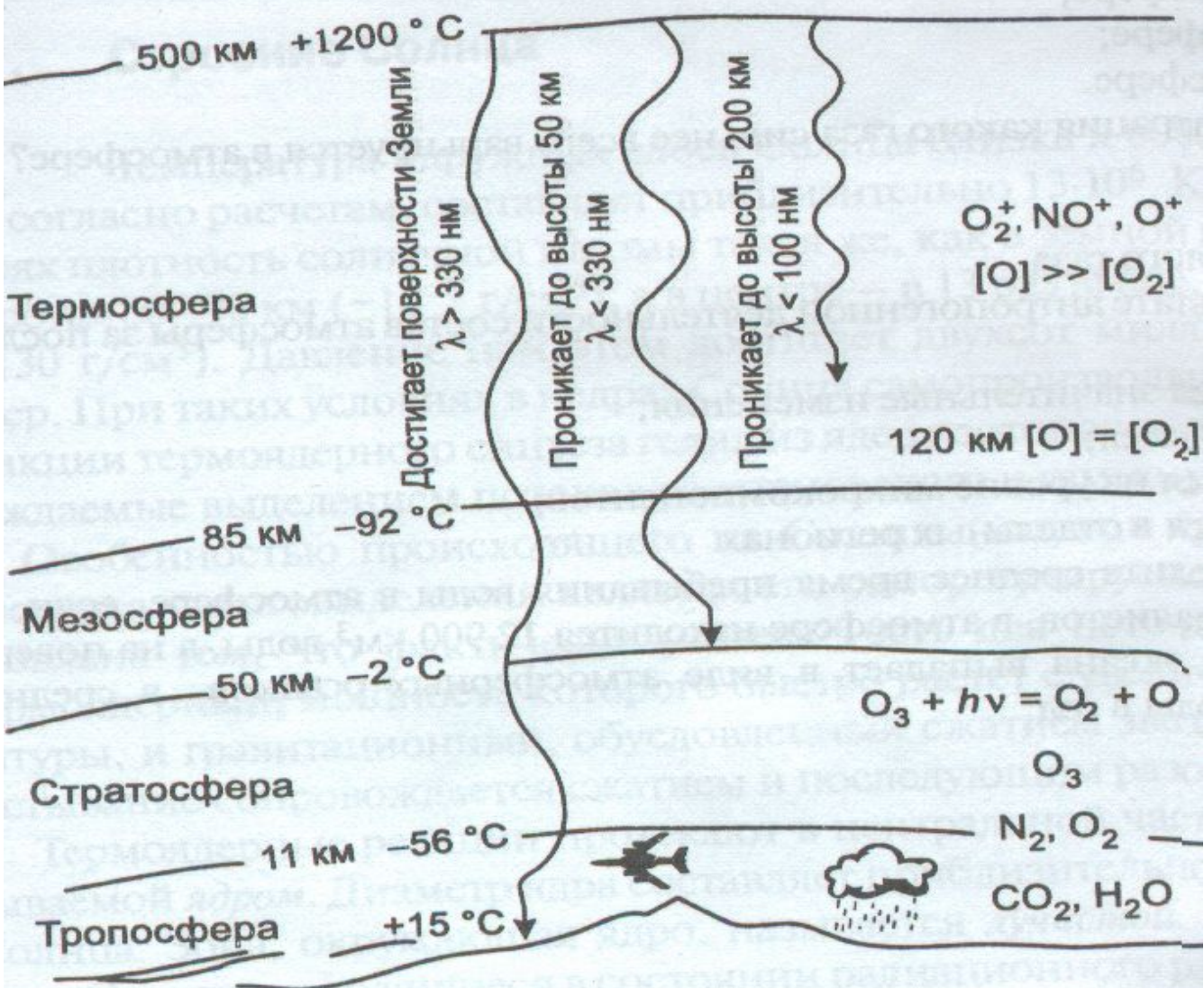
Молекула отдает избыточную энергию в результате столкновения и дезактивации:



Молекула подвергается ионизации:

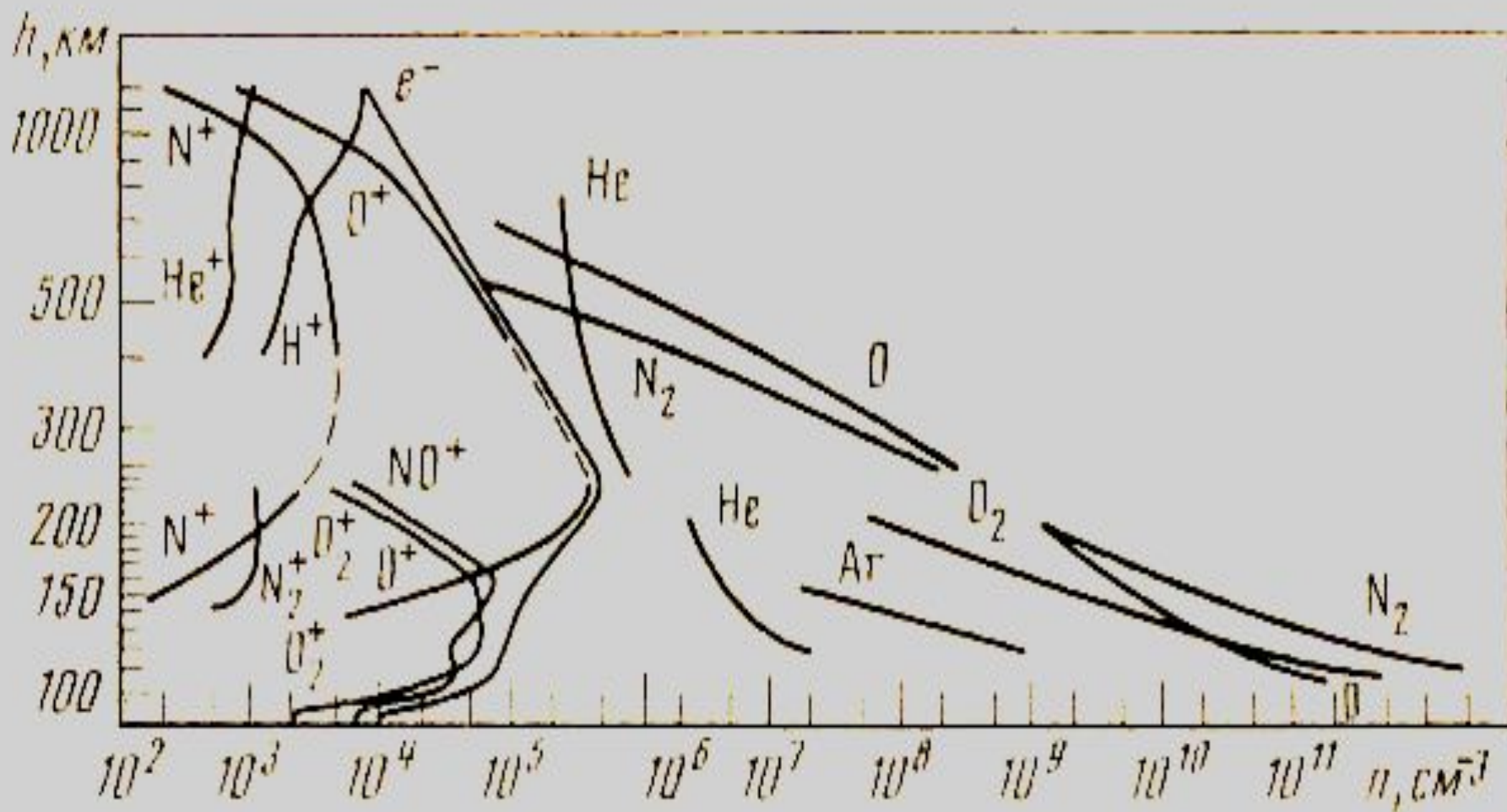


Солнечное излучение



Строение атмосферы

Изменение концентрации ионов в ионосфере Земли



Состав атмосферы вблизи земной поверхности

| Концентрация квазипостоянных компонентов, % об. | | Концентрация “активных” примесей, % об. | |
|--|----------------------------------|--|---|
| N ₂ | 78,11 ± 0,004 | H ₂ O | 0 – 7 |
| O ₂ | 20,95 ± 0,001 | CO ₂ | 0,01 – 0,1 (среднее 0,04) |
| Ar | 0,934 ± 0,001 | | |
| Ne | $(18,18 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$ | Общее количество O ₃ | 0 – 10 ⁻⁴ (среднее 3 · 10 ⁻⁵) |
| He | $(5,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$ | | |
| Kr | $(1,14 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$ | SO ₂ | 0 – 10 ⁻⁴ |
| Xe | $(0,087 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$ | CH ₄ | 1,6 · 10 ⁻⁴ |
| H ₂ | 0,5 · 10 ⁻⁴ | NO ₂ | 2 · 10 ⁻⁶ |
| | | | |

Озон (O₃) – аллотропная модификация кислорода.

Общая масса озона в атмосфере оценивается примерно в 3,3 млрд. т.

Это высокотоксичный газ, токсичность его примерно на порядок превышает токсичность диоксида серы.

Поэтому дышать озоном нельзя, и его присутствие в воздухе тропосферы, даже в сравнительно небольших количествах, представляет опасность для всего живого.

Важной особенностью озона является его способность поглощать излучение:

Ультрафиолетовое излучение с длиной волны 200 – 400 нм часто называют биологически активным ультрафиолетом (БАУ) и делят на два поддиапазона:

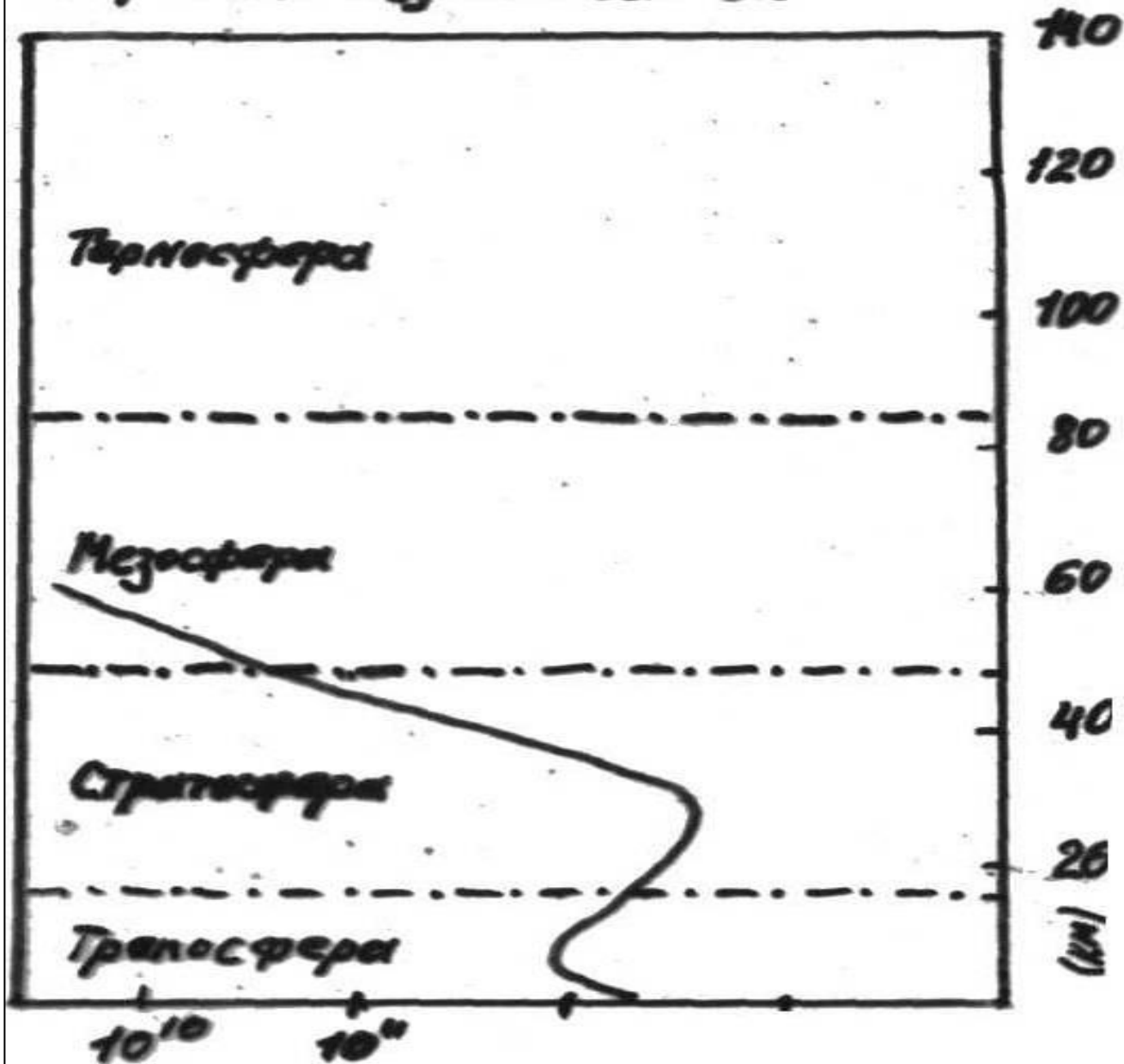
ультрафиолет А - излучение с длиной волны $320 < \lambda < 400$
нм

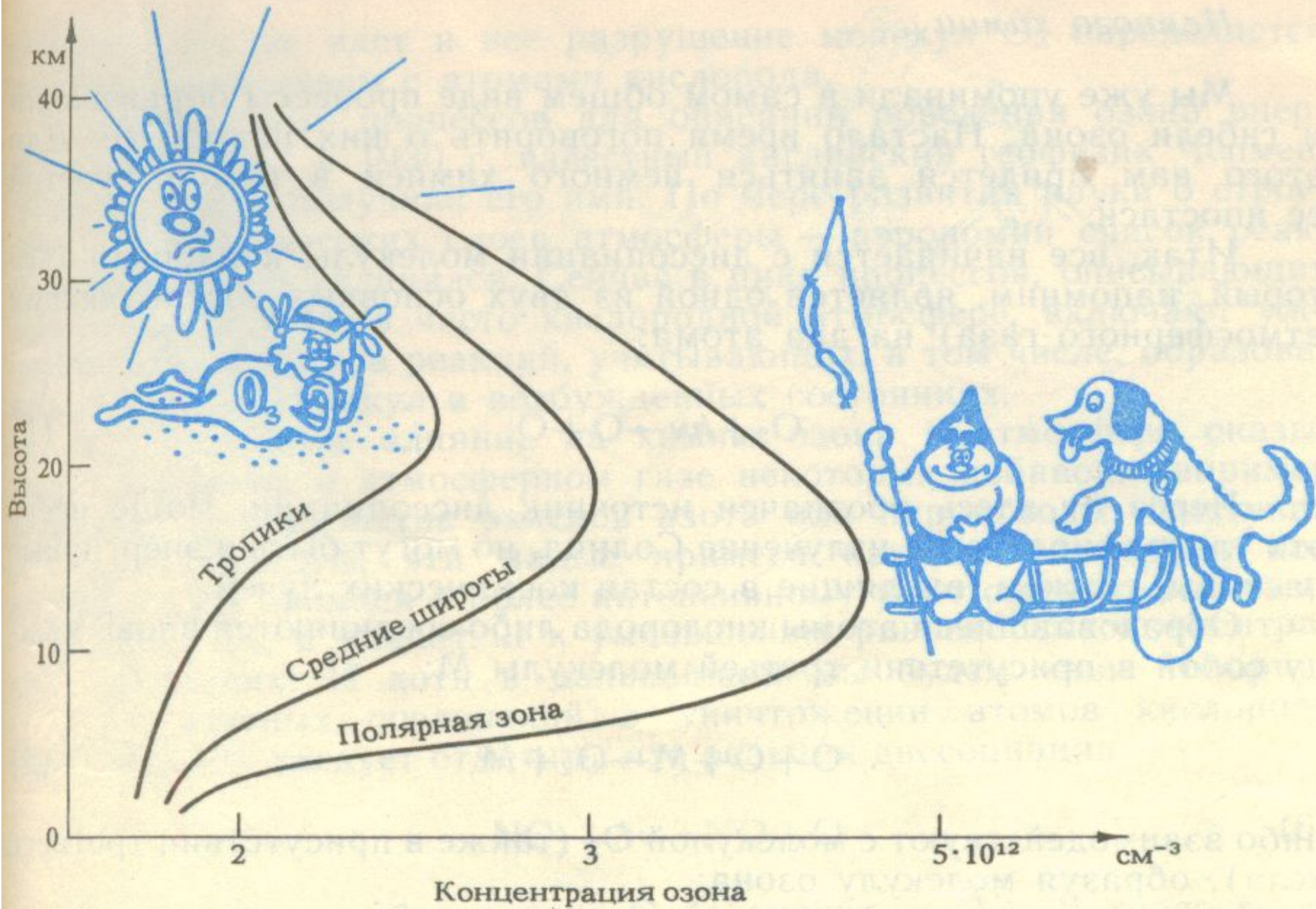
ультрафиолет В - излучение с длиной волны; $200 < \lambda < 320$
нм.

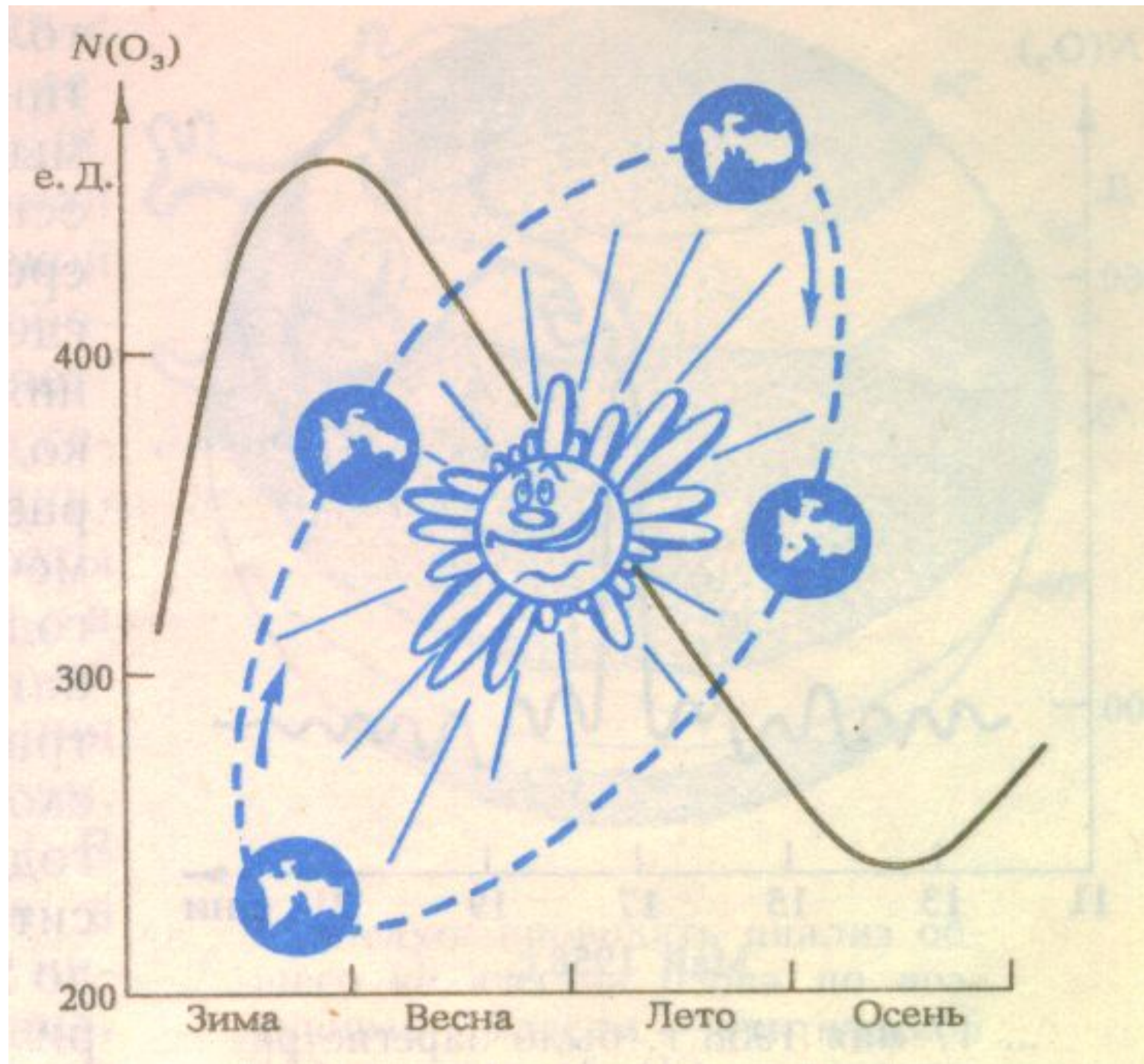
Ультрафиолетовое излучение с длиной волны $\lambda > 200$ нм практически не поглощается молекулярным и атомарным кислородом и азотом.

Это излучение могло бы достигать поверхности Земли и полностью уничтожить все живое на планете, если бы в атмосфере не было озона.

Распределение озона с высотой



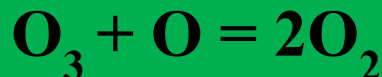
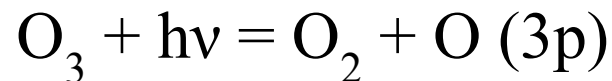
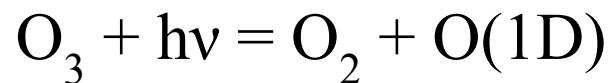
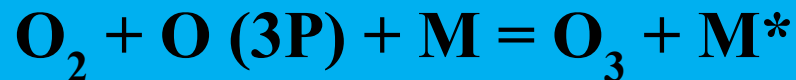




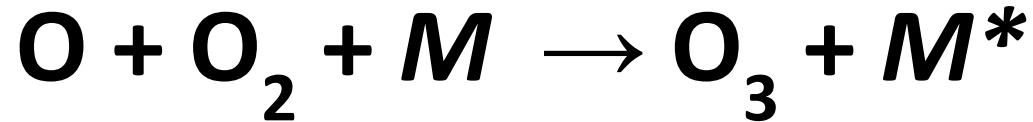
Процессы образования и гибели озона в атмосфере



где $\text{O}(1\text{D})$ – атом в возбужденном состоянии;
 $\text{O}(3\text{P})$ – атом в основном состоянии.

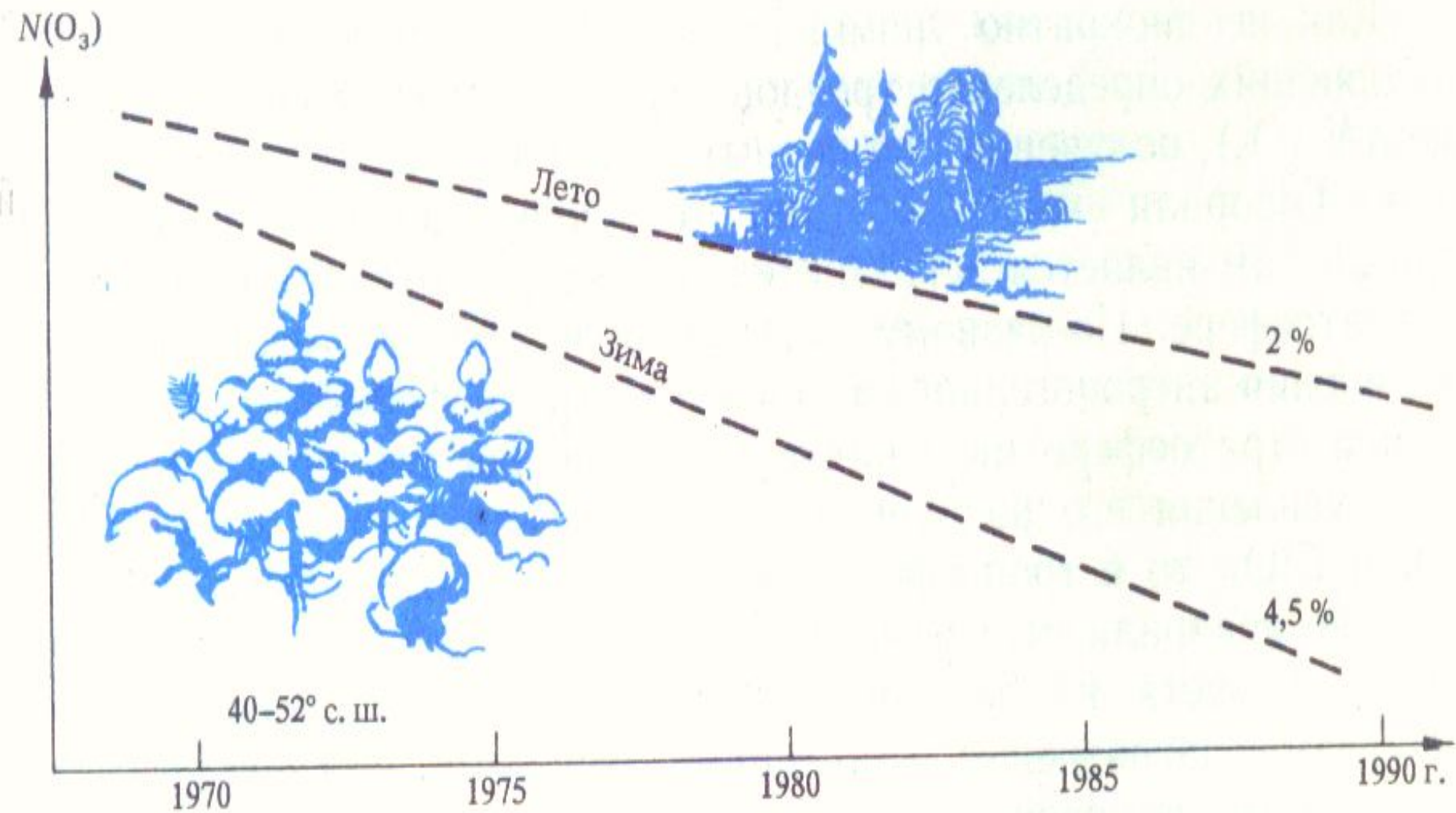


Озон в стратосфере образуется в результате взаимодействия атомарного кислорода с молекулой кислорода в присутствии третьего тела:



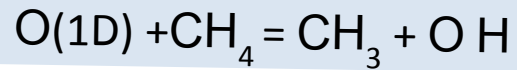
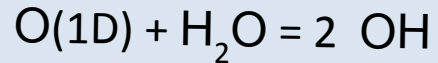
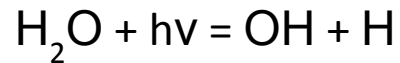
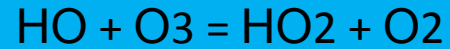
где M - любая молекула (обычно азота или кислорода), уносящая из реакции избыток энергии.

В дальнейшем озон при взаимодействии с излучением разлагается с образованием молекулы и атома кислорода



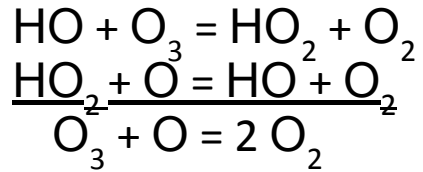
Процессы образования и гибели озона в атмосфере

Водородный цикл

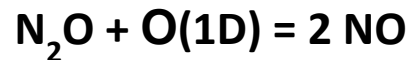
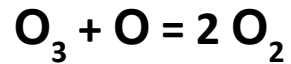
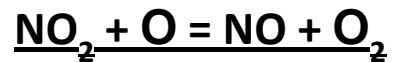
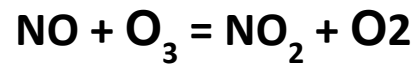


Процессы образования и гибели озона в атмосфере

Водородный цикл

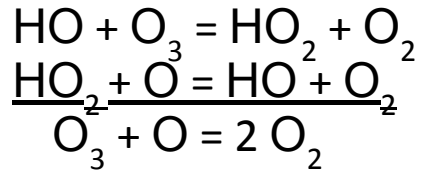


Азотный цикл

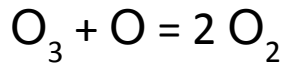
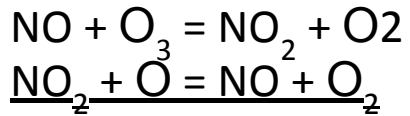


Процессы образования и гибели озона в атмосфере

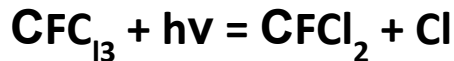
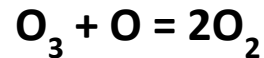
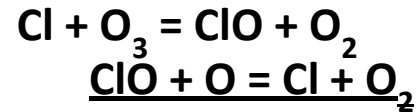
Водородный цикл



Азотный цикл

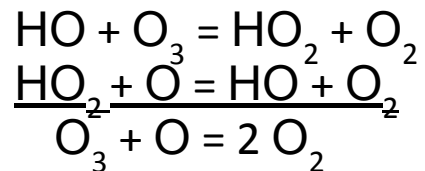


Хлорный цикл

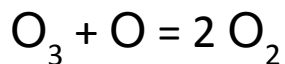
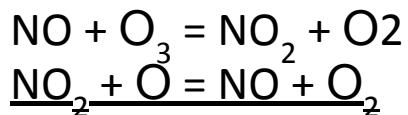


Процессы образования и гибели озона в атмосфере

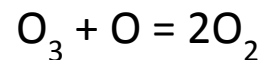
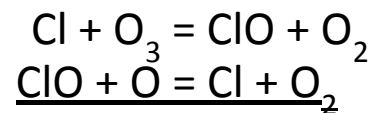
Водородный цикл



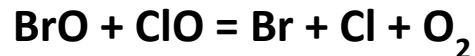
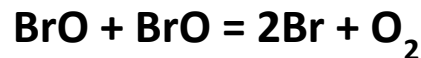
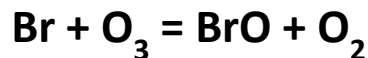
Азотный цикл



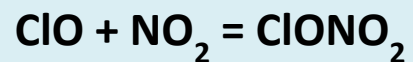
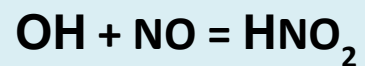
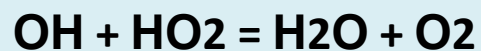
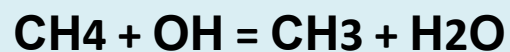
Хлорный цикл



Бромный цикл.

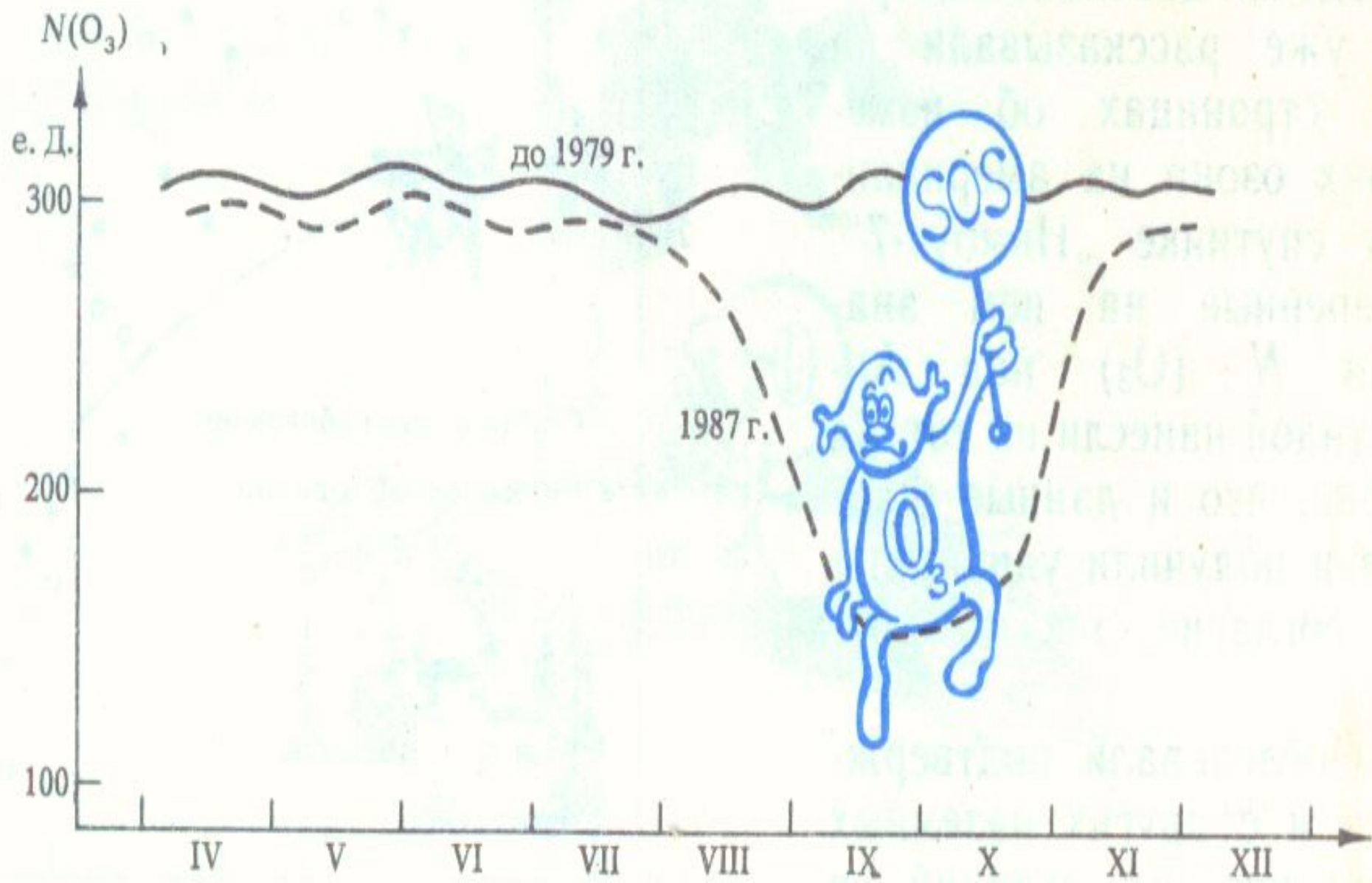


Обрыв цепных реакций разрушения озона



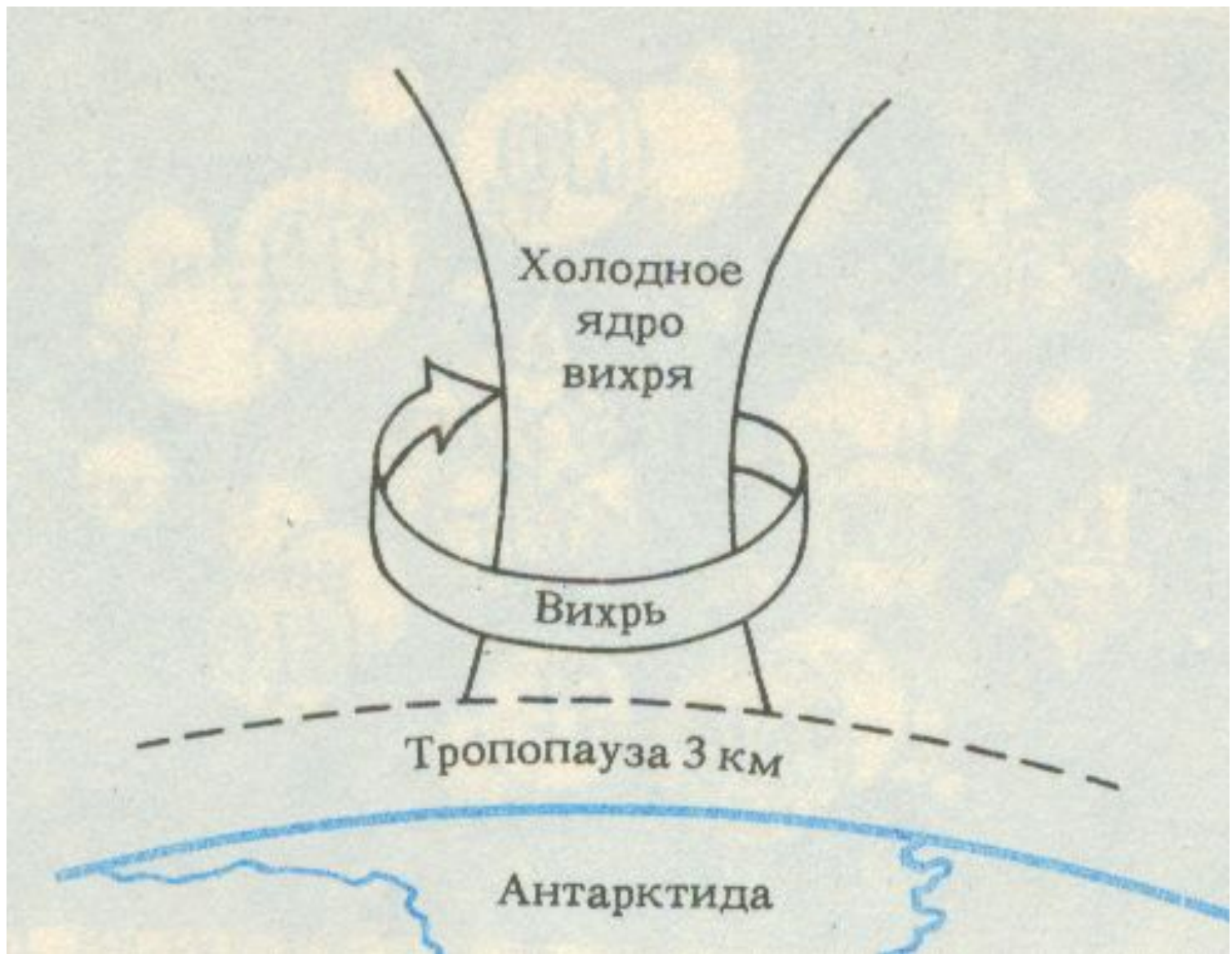
Озо́новая дыра́

— локальное падение концентрации озона
в озоновом слое Земли.



Озоновая дыра диаметром свыше 1000 км впервые была обнаружена в [1985 году](#), на [Южном полушарии](#), над [Антарктидой](#), группой британских учёных: [Дж. Шанклин \(англ.\)](#), [Дж. Фармен \(англ.\)](#), [Б. Гардинер \(англ.\)](#), опубликовавших соответствующую статью в журнале [Nature](#). Каждый август она появлялась, а в декабре — январе прекращала своё существование. Над [Северным полушарием](#) в Арктике образовывалась другая дыра, но меньших размеров. На данном этапе развития человечества, мировые учёные доказали, что на Земле существует громадное количество озоновых дыр. Но наиболее опасная и крупная расположена над Антарктидой.

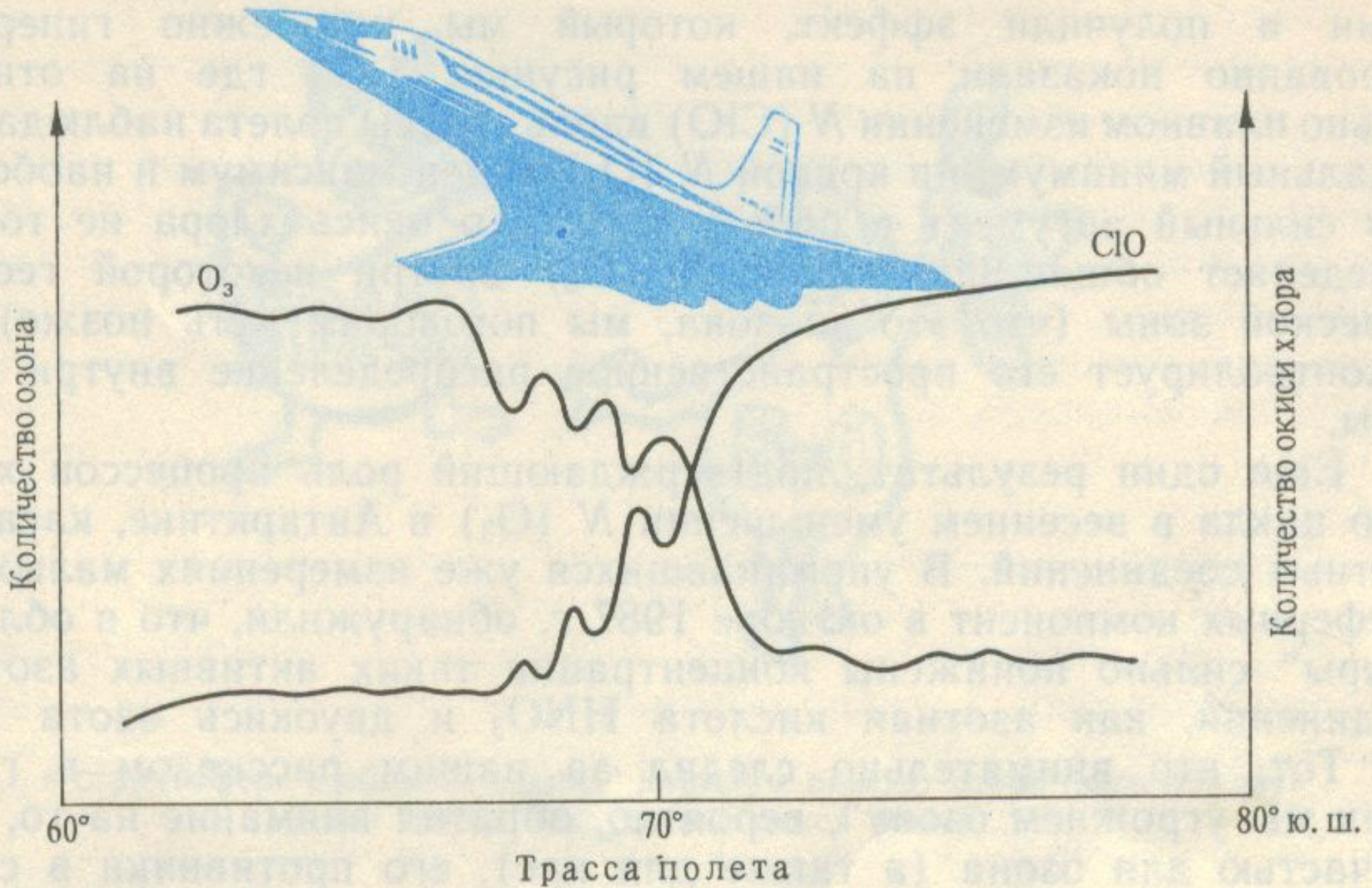
Антарктическая озоновая дыра формируется ежегодно в весенний период, охватывает большую площадь (> 20 млн. км²) и существует в течение нескольких месяцев. Арктические озоновые аномалии – крайне редкое явление, они имеют небольшую площадь (< 10 млн. км²), непродолжительны по времени существования (1–3 недели), смещены относительно полюса и дрейфуют в течение своего времени жизни.



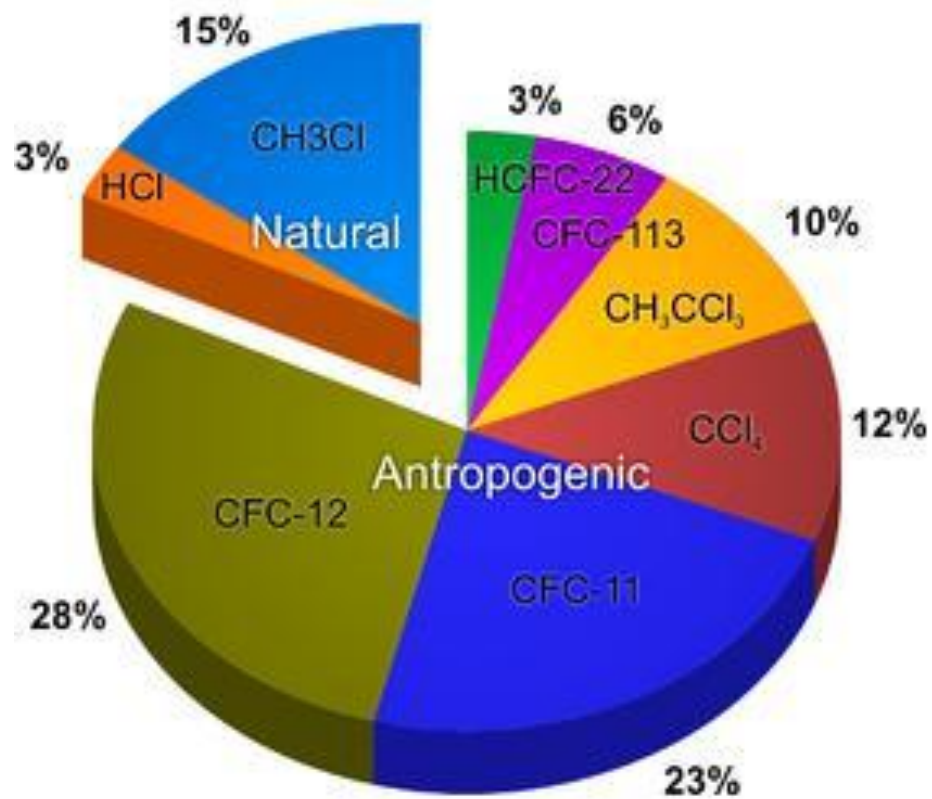
Океаническая поверхность, окружающая Антарктиду, существенно усиливает зимний градиент температур у полярного фронта, в отличие от материкового окружения в Арктике.

В результате образующийся южный циркумполярный вихрь значительно устойчивее северного: он превышает его более чем в 2,5 раза по скорости, в 1,7 раза по площади и в 1,5 раза по времени существования.

По данным Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета, в середине августа 2000 г. озоновая дыра над Антарктидой начала расти. В результате ее размер достиг рекордных размеров 28,3 млн км², что в 3 раза больше территории США. Для сравнения — еще 10-15 лет назад она составляла 22 млн км². В октябре 2000 г. она приблизилась к значениям 1999 г. и составила 23-24 млн км², а минимальное значение содержания озона составило 100 единиц Добсона, что в 3 раза меньше нормы



Sources of stratospheric chlorine



Заблуждения об озоновой дыре

1. **Озон разрушается только над Антарктикой**
2. **Озоновая дыра должна находиться над источниками фреонов**
3. **Фреоны слишком тяжелы, чтобы достигать стратосферы**
4. **Основные источники галогенов природные, а не антропогенные**

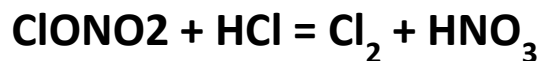
“Озонная дыра” над Антарктидой

Теоретически процесс был описан в начале 70 годов 20 века, экспериментальные доказательства механизма образования “озоновой дыры” над Антарктидой получены в 80 годах.

В 1993 г. ученые Ш. Роуланд (США), М. Молина (США), П. Крутцен (ФРГ), занимавшиеся этой проблемой, удостоены Нобелевской премии по химии.



или



Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой ([англ. *The Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer*](#)) — международный протокол к [Венской конвенции об охране озонового слоя](#) 1985 года, разработанный с целью защиты [озонового слоя](#) с помощью снятия с производства некоторых химических веществ, которые разрушают озоновый слой. Протокол был подготовлен к подписанию [16 сентября 1987 года](#) и вступил в силу [1 января 1989 года](#). После этого последовала первая встреча в [Хельсинки](#) в мае 1989 года. С тех пор протокол подвергался пересмотру семь раз: в 1990 ([Лондон](#)), 1991 ([Найроби](#)), 1992 ([Копенгаген](#)), 1993 ([Бангкок](#)), 1995 ([Вена](#)), 1997 ([Монреаль](#)) и 1999 ([Пекин](#)). Если страны, подписавшие протокол, будут его придерживаться и в будущем, то можно надеяться, что озоновый слой восстановится к [2050 году](#). [Генеральный секретарь ООН](#) (1997—2006)

По состоянию на декабрь [2009 года](#) 196 государств-членов ООН ратифицировали первоначальную версию Монреальского протокола.

- [Кофи Аннан](#) сказал, что «возможно, единственным очень успешным международным соглашением можно считать Монреальский протокол».

Монреальский протокол
предусматривает для каждой группы
галогенированных углеводородов
определённый срок, в течение которого
она должна быть снята с производства
и исключена из использования.

Влияние вулканов на озоновый слой

В Антарктиде находится постояннодействующий вулкан Эребус ($77,5^{\circ}$ ю.ш., $167,2^{\circ}$ в.д.; высота – 3794 м.), входящий в список самых активных вулканов на Земле.

В его главном кратере находится лавовое озеро, не застывающее из-за непрерывных конвективных процессов подъема и перемешивания магмы, которая циркулирует от камеры, расположенной глубоко в вулкане.

Рядом с лавовым озером, в главном кратере находится жерло активной дегазации (пепловое жерло), из которого периодически выбрасывается столб вулканических газов.

Эребус – один из немногих вулканов, представляющий собой систему открытого жерла, объясняющую устойчивость и разнообразие активности вулкана: частую смену между пассивной и активной дегазацией и взрывными извержениями.

Весной над Антарктидой одновременно с сильным понижением стратосферного озона наблюдается рост концентрации монооксида хлора ClO.

По максимальным значениям концентрации ClO в стратосфере над станцией McMurdo в сентябре 1992 г. с учетом площади озоновой дыры рассчитана масса хлороводорода HCl, необходимого для ее образования. Масса HCl составила 9,3 кт.

Наиболее вероятным источником такого количества HCl в Антарктиде является вулкан Эребус.

Существенное сокращение антарктической стратосферной озоновой дыры в 2010 году и в течение ряда предыдущих лет — результат чрезвычайного метеорологического явления, иногда свойственного полярной зиме.

Учёные называют это внезапным стратосферным потеплением ([sudden stratospheric warming](#), SSW).

В ООН 16 сентября отмечается Международный день охраны озонового слоя. Он был установлен в 1994 году в память о подписании Монреальского протокола по веществам, разрушающим озоновый слой.