

Геофизика



2023 Лекция №6

Носов Михаил Александрович

отделение геофизики, физический факультет МГУ

<http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/>

Атмосфера — воздушная оболочка Земли, состоящая из газов и взвешенных частиц примесей — аэрозолей.

Гидросфера — прерывистая водная оболочка Земли, располагающаяся между атмосферой и твёрдой земной корой (литосферой) и представляющая собой совокупность океанов, морей и поверхностных вод суши.

В более широком смысле в состав гидросферы включают также подземные воды, лёд, снег, атмосферную воду и воду, содержащуюся в живых организмах.

**Гипотезы о
происхождении
атмосферы и
гидросферы
Земли**

Гипотеза 1

Атмосфера и гидросфера были захвачены из протопланетного облака в процессе аккреции

Основания для сомнений...

1. Летучие элементы не могли быть удержаны в зоне формирования планет земной группы из-за высокой температуры в этой области протопланетного диска

2. Выметание первичных атмосфер солнечным ветром молодого Солнца

Гипотеза 2 (современная концепция)

Атмосфера и гидросфера Земли образовались около 4 млрд. лет назад в результате дегазации мантии. Первичная атмосфера состояла из H_2O , CO_2 и др. газов (H_2 , N_2 , CH_4 , CO , H_2S , NH_3 , HF , HCl , Ar)

O_2 отсутствовал

земное вещество сильно обеднено летучими и подвижными элементами и соединениями, в противном случае атмосфера и гидросфера были бы более мощными

Гипотеза 2 (современная концепция)

Атмосфера и гидросфера Земли образовались около 4 млрд. лет назад в результате дегазации мантии. Первичная атмосфера состояла из H_2O , CO_2 и др. газов (H_2 , N_2 , CH_4 , CO , H_2S , NH_3 , HF , HCl , Ar)

Эксперимент «Царев-2» (ИДГ РАН)

СВЧ нагрев в вакууме метеоритного образца (обыкновен. хондрит класса L)

Выделяются: H_2 , N_2 , CH_4 , CO , H_2O , etc.

Гипотеза 2 (современная концепция)

«Судьба» основных соединений:

H_2O – гидросфера, атмосфера, ...

CO_2 – большая часть связана в горных породах и органическом веществе

N_2 – органическое вещество, осадочные породы, современная атмосфера

O_2 – в заметном количестве появился 1.5 млрд. лет назад, источники: **фотосинтез** (по мере развития жизни), фотодиссоциация пара

Гипотеза 3 (современная концепция)

**Атмосфера и гидросфера
сформировались в результате
интенсивной бомбардировки кометами
и астероидами из внешних областей
Солнечной системы на ранних этапах
эволюции**

Состав атмосферы

**ПОСТОЯННЫЕ
КОМПОНЕНТЫ**

**переменные
КОМПОНЕНТЫ**

	% объема		% объема
Азот	78.11	Вода	0 – 7
Кислород	20.957	CO₂	0.01 – 0.1
Аргон	0.937	Озон	0 – 0.01

Постоянные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Относительная молекулярная масса	% объема
Азот	N₂	28.016	78.110
Кислород	O₂	31.9986	20.957
Аргон	Ar	39.942	0.937
Неон	Ne	20.182	0.001818
Гелий	He	4.003	0.000524
Криптон	Kr	83.80	0.000114
Ксенон	Xe	131.3	0.0000087
Водород	H ₂	2.016	0.00005
Метан	CH ₄	18.043	0.0002
Закись азота	N ₂ O	44.015	0.00005

Переменные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Относительная молекулярная масса	% объема
Вода	H_2O	18.005	0 – 7
Двуокись углерода	CO_2	44.009	0.01 – 0.1 у пов-ти среднее 0.032
Озон	O_3	47.998	0 – 0.01
Двуокись серы	SO_2	64.064	0 – 0.0001
Двуокись азота	NO_2	46.007	0 – 0.000002

Масса атмосферы

$\sim 5 \cdot 10^{18}$ кг

Масса Земли

$\sim 6 \cdot 10^{24}$ кг

Ингредиенты Солнечной системы

металлы

и

силикаты

0.6%

легкие газы

и

льды

99.4%

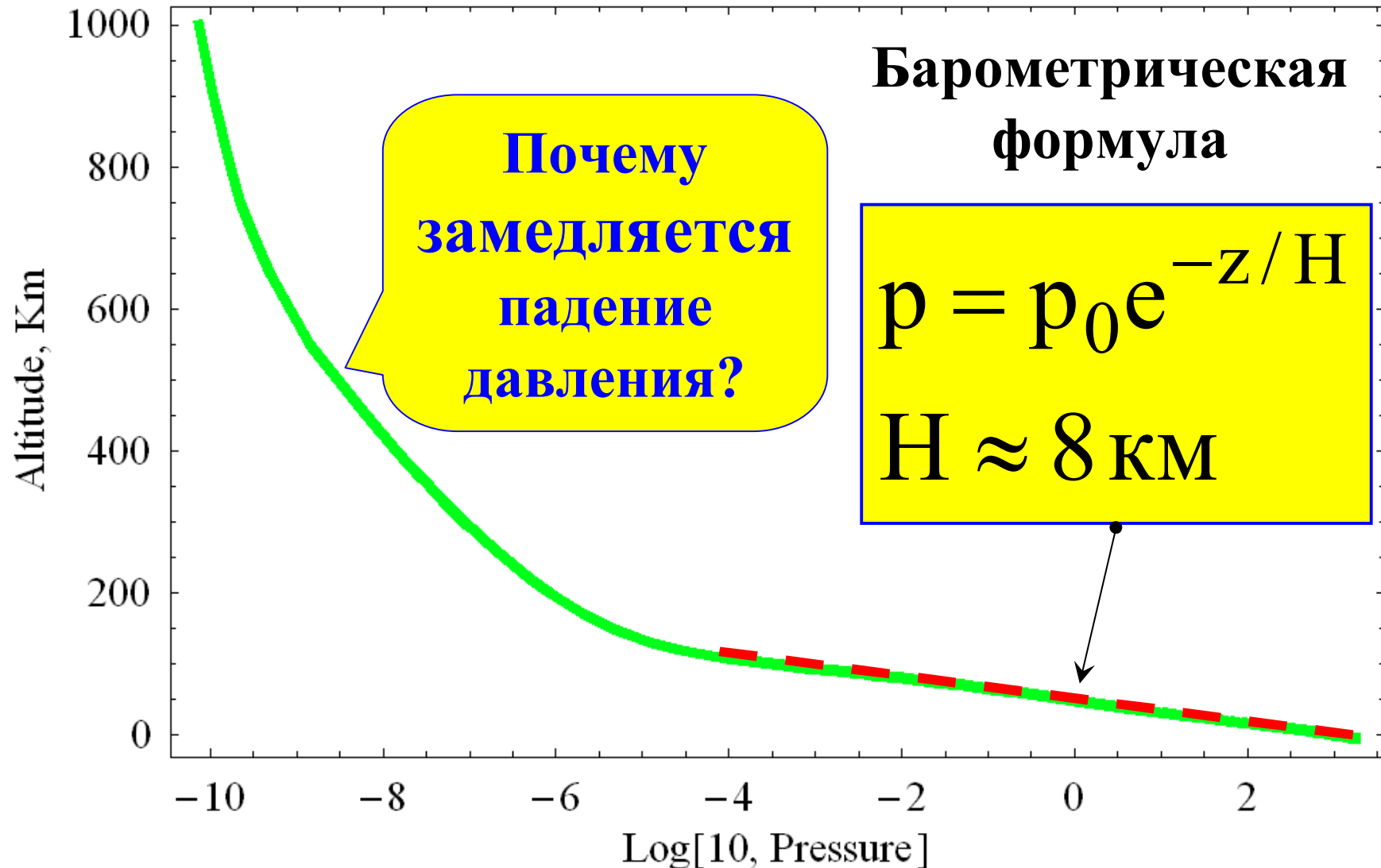
90% массы атмосферы в слое 16.3 км

99% массы атмосферы в слое 32.2 км

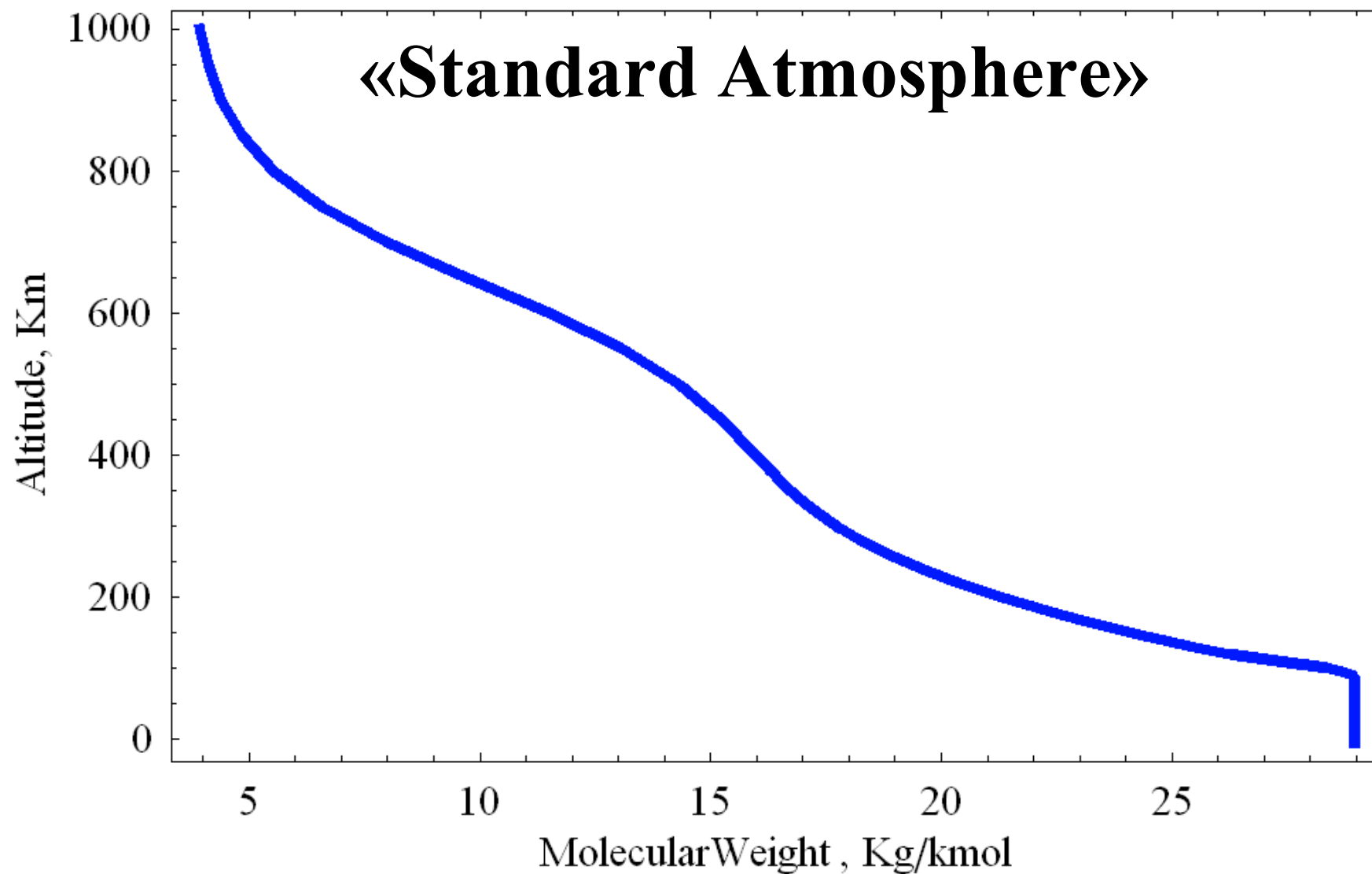
Радиус Земли

6371 км

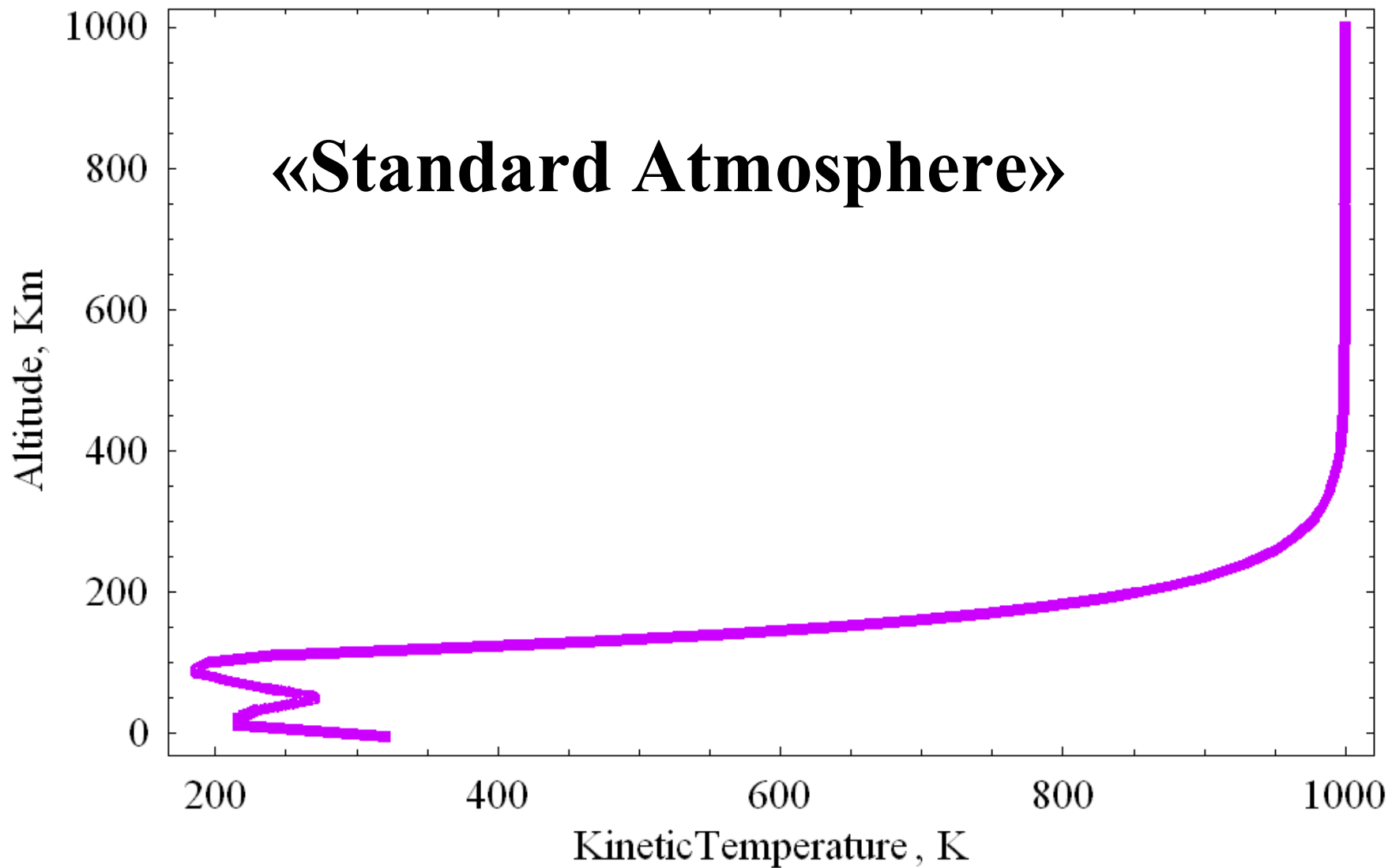
Зависимость давления воздуха от высоты «Standard Atmosphere»



Зависимость среднего молекулярного веса от высоты

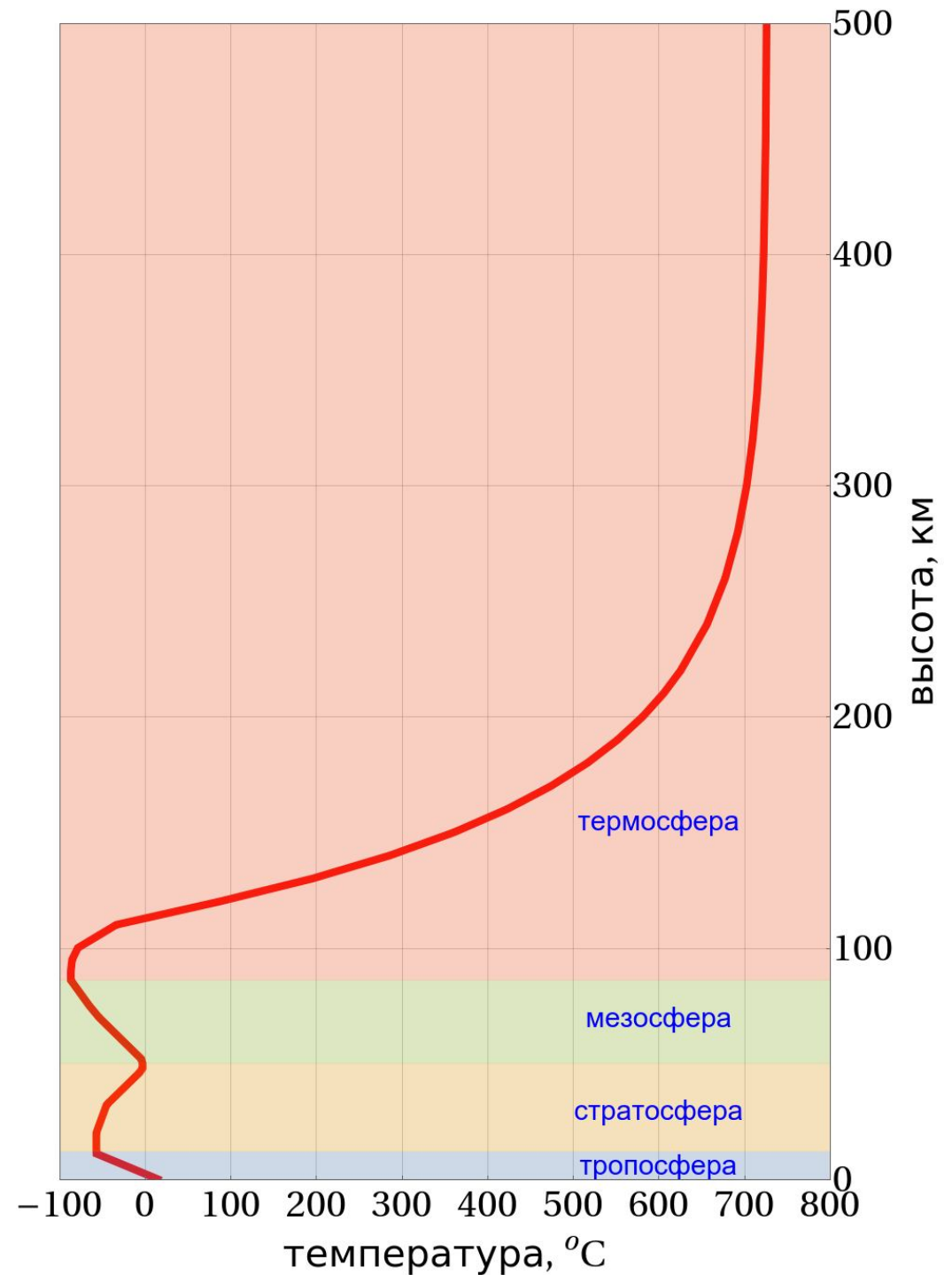


Зависимость температуры воздуха от высоты



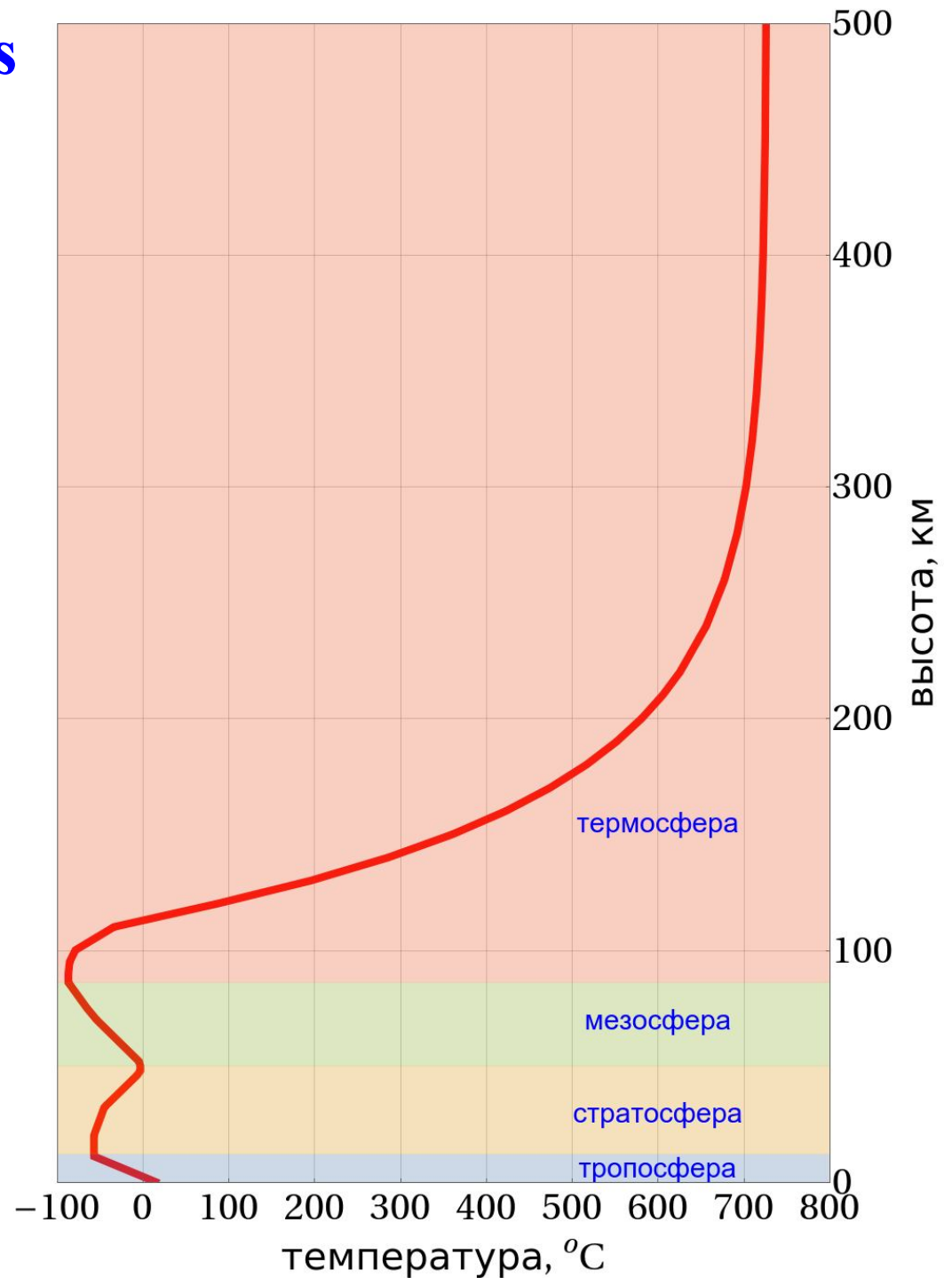
Вертикальная структура атмосферы

(классификация по изменению температуры с высотой)



Тропосфера (от гр. tropos – поворот, изменение)

- ❑ Неустойчива, охвачена сильными горизонтальными и вертикальными движениями
- ❑ Погода, климат, облака, осадки
- ❑ Температура убывает с высотой ~ 6.5 К/км
- ❑ экватор: $T_{\min} = -62^{\circ}\text{C}$, полюса: $T_{\min} = -45^{\circ}\text{C}$
- ❑ Высота от 7-8 км в полярных областях до 15-16 км в районе экватора



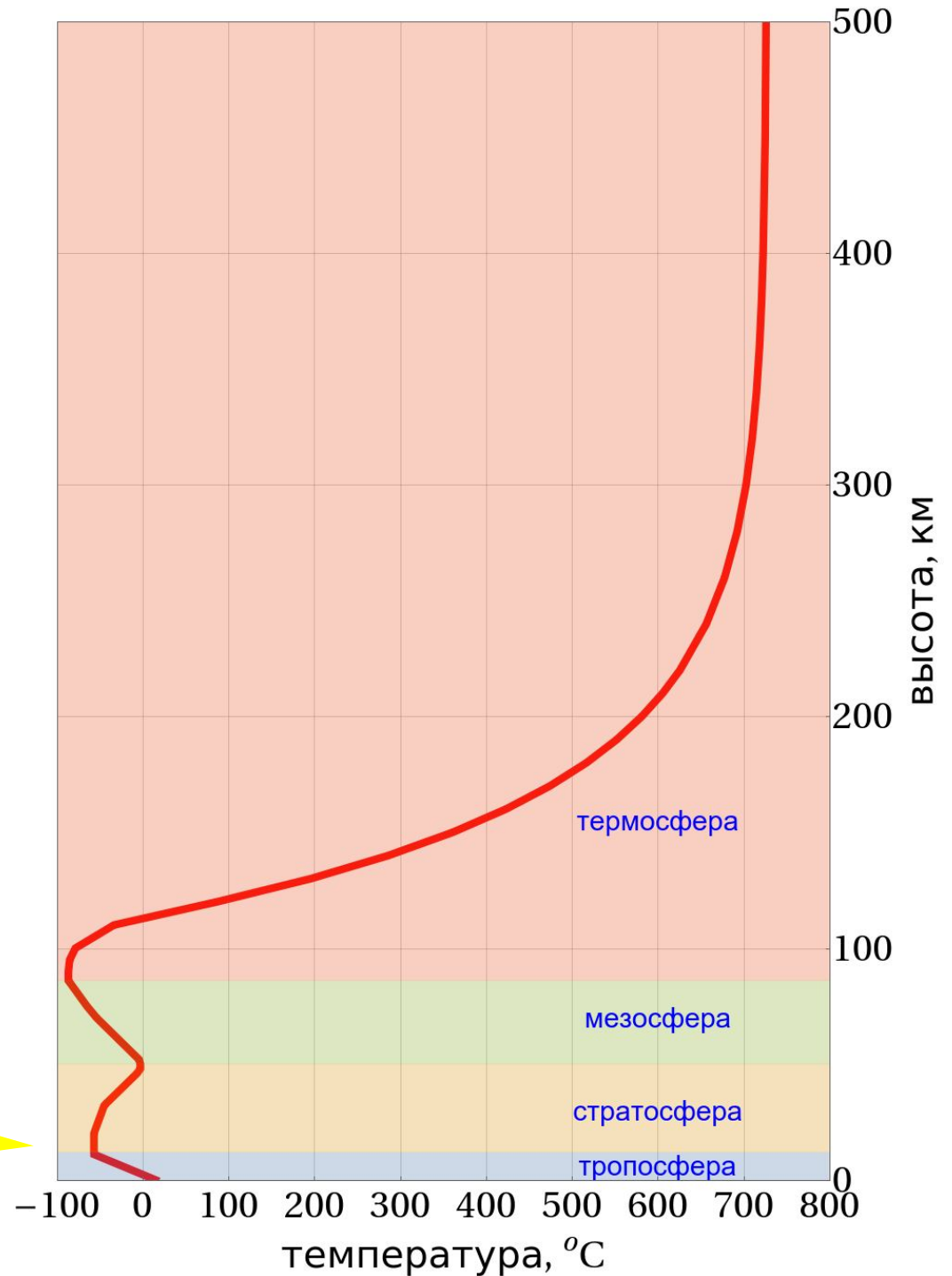


**Леон Филипп
Тейсерен де Бор
(1855-1913)**

французский метеоролог

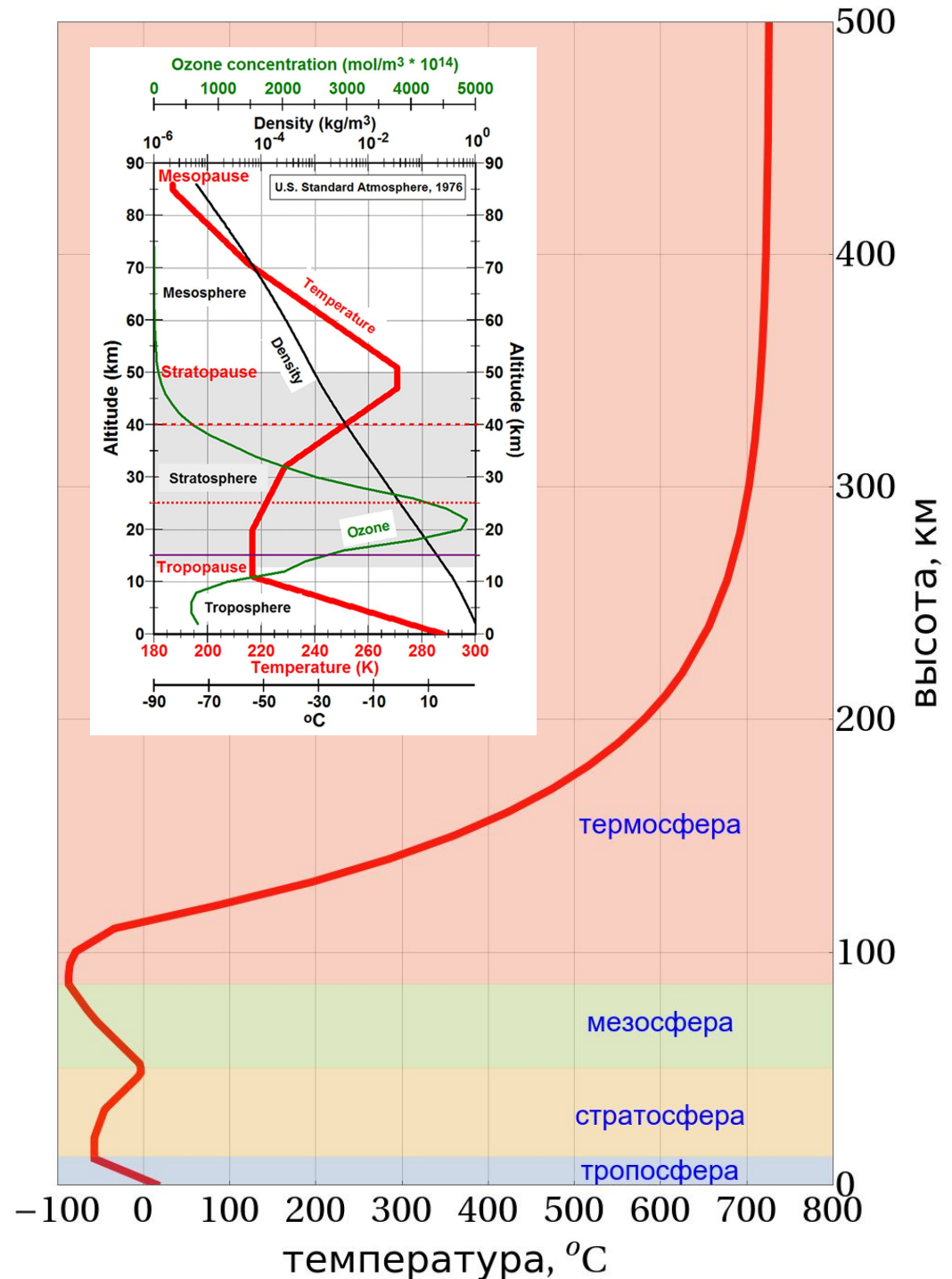
Переходный слой, в котором наблюдается минимум температуры (открыт на рубеже 19 и 20 веков)

тропопауза



Стратосфера (от лат. *stratum* – настил, слой)

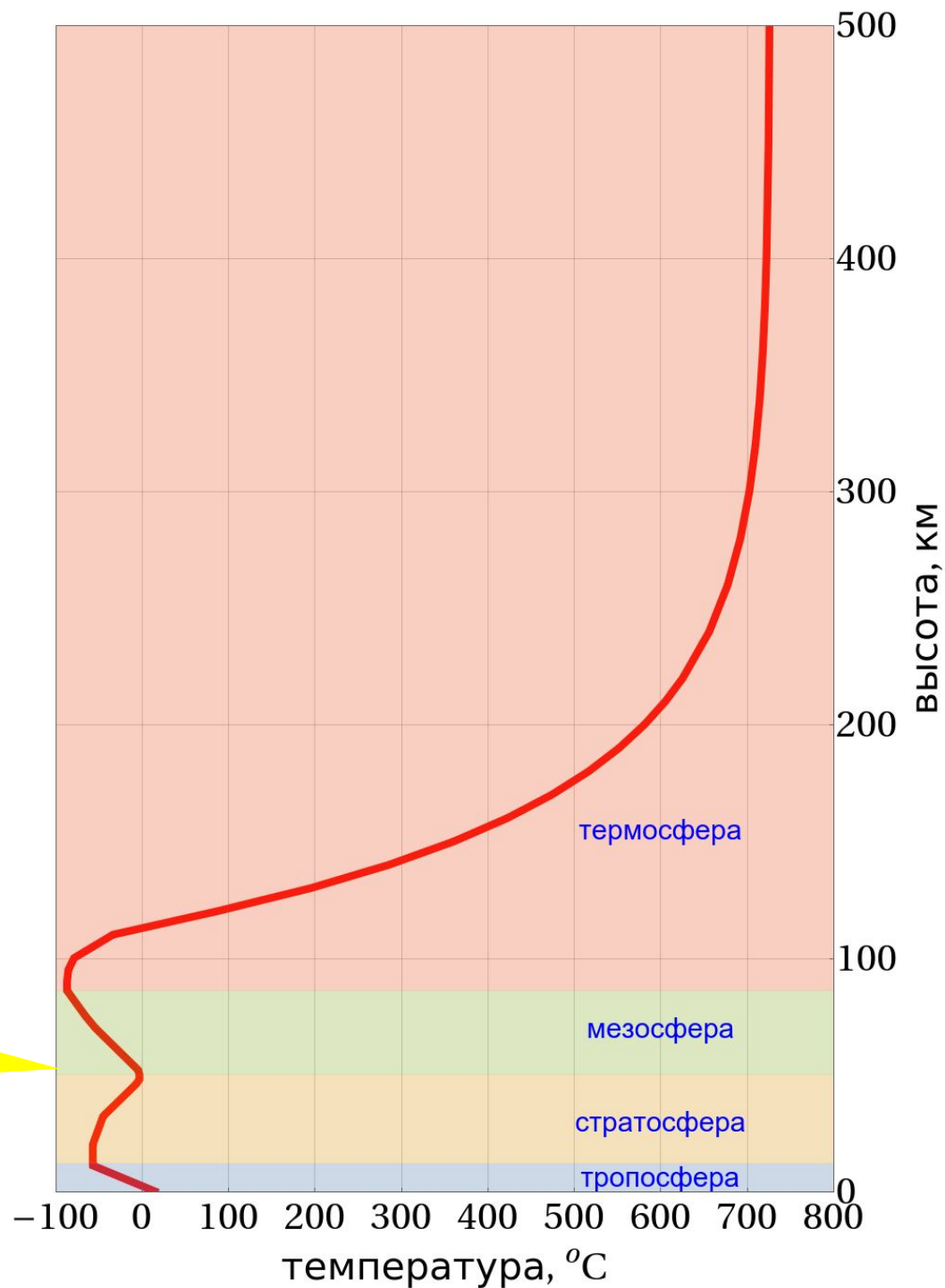
- ❑ Простирается до высот ~50 км
- ❑ Ограничивает высоту образования облаков
- ❑ Незначительное повышение температуры объясняется поглощением солнечной УФ радиации озоном



□ **Переходный слой на высоте ~50 км, что значительно выше уровня максимальной концентрации озона**

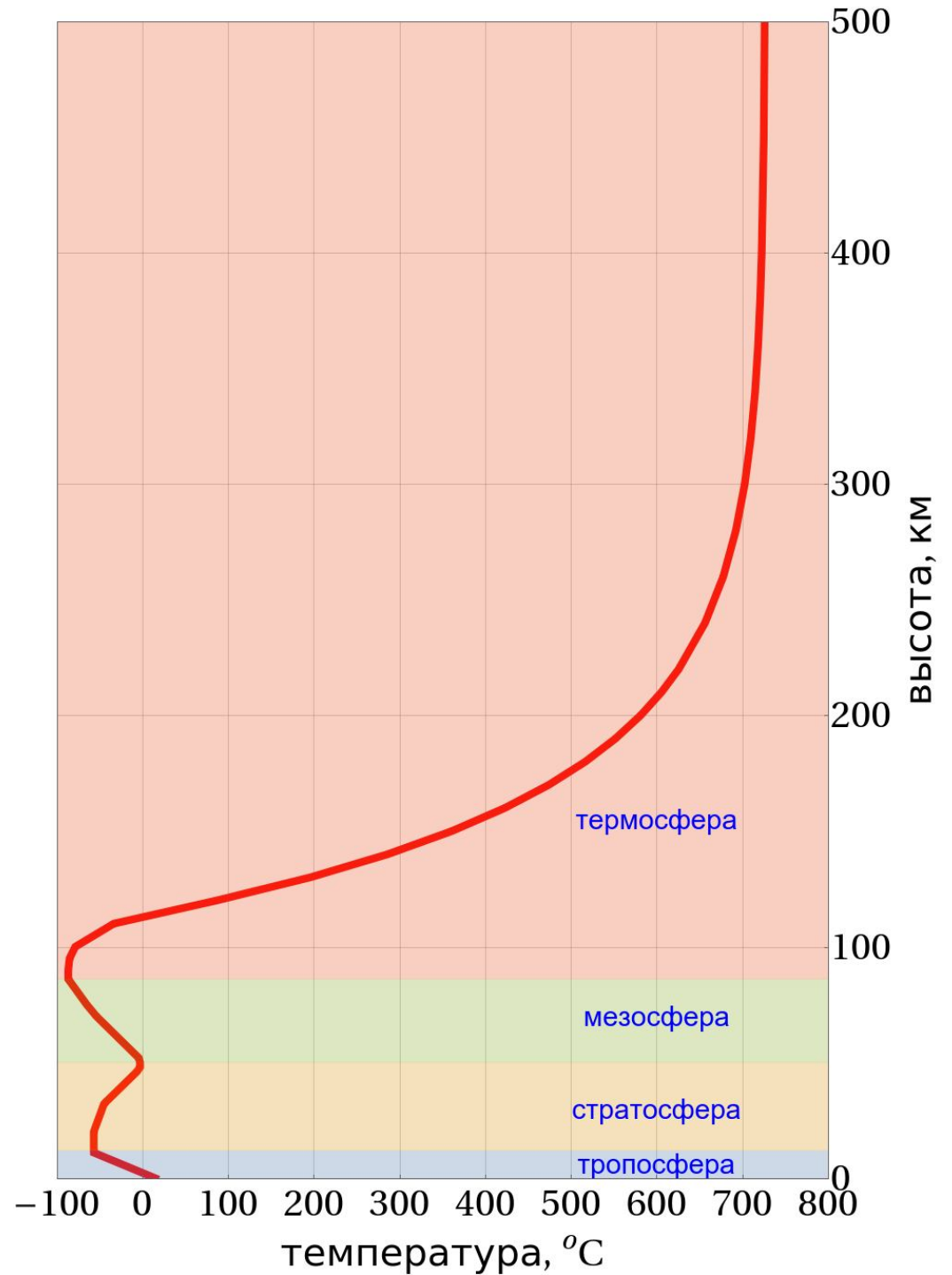
□ **Температура достигает 0°C**

стратопауза



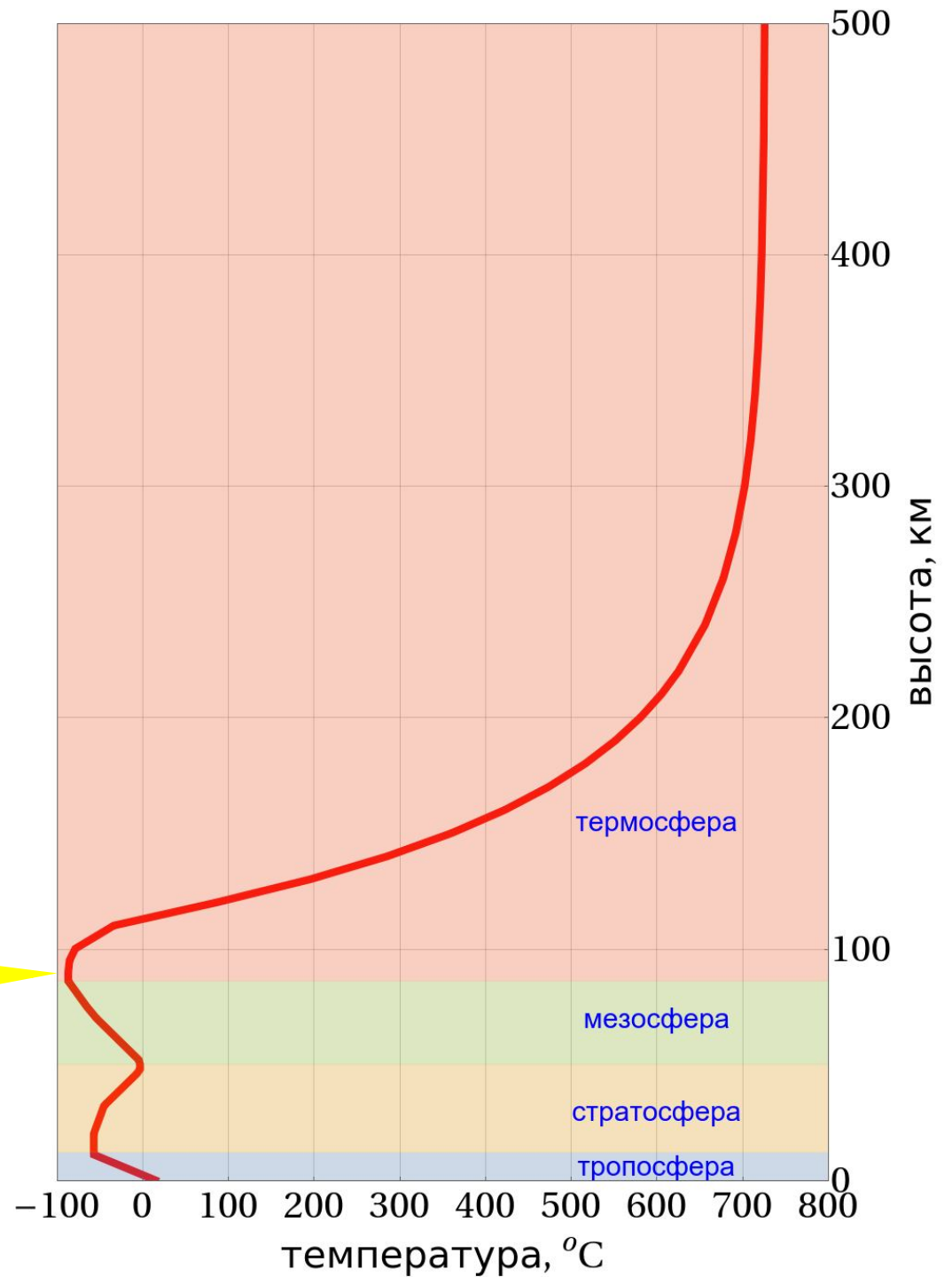
**Мезосфера (от гр.
mesos – средний,
промежуточный)**

- На высотах от 50 до 80 км**
- Температура воздуха понижается**



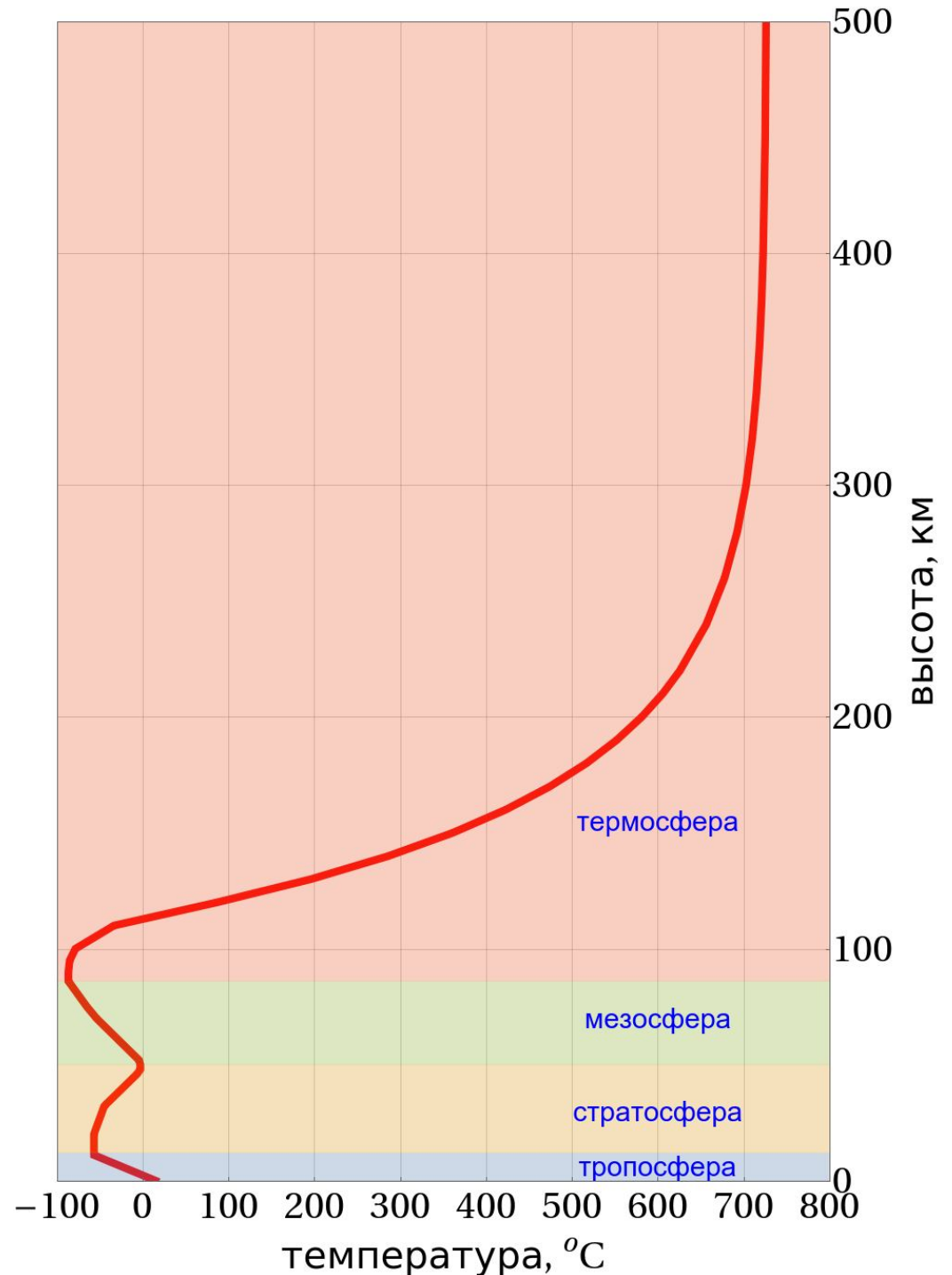
**Переходный слой
на высотах ~ 80 км**

мезопауза

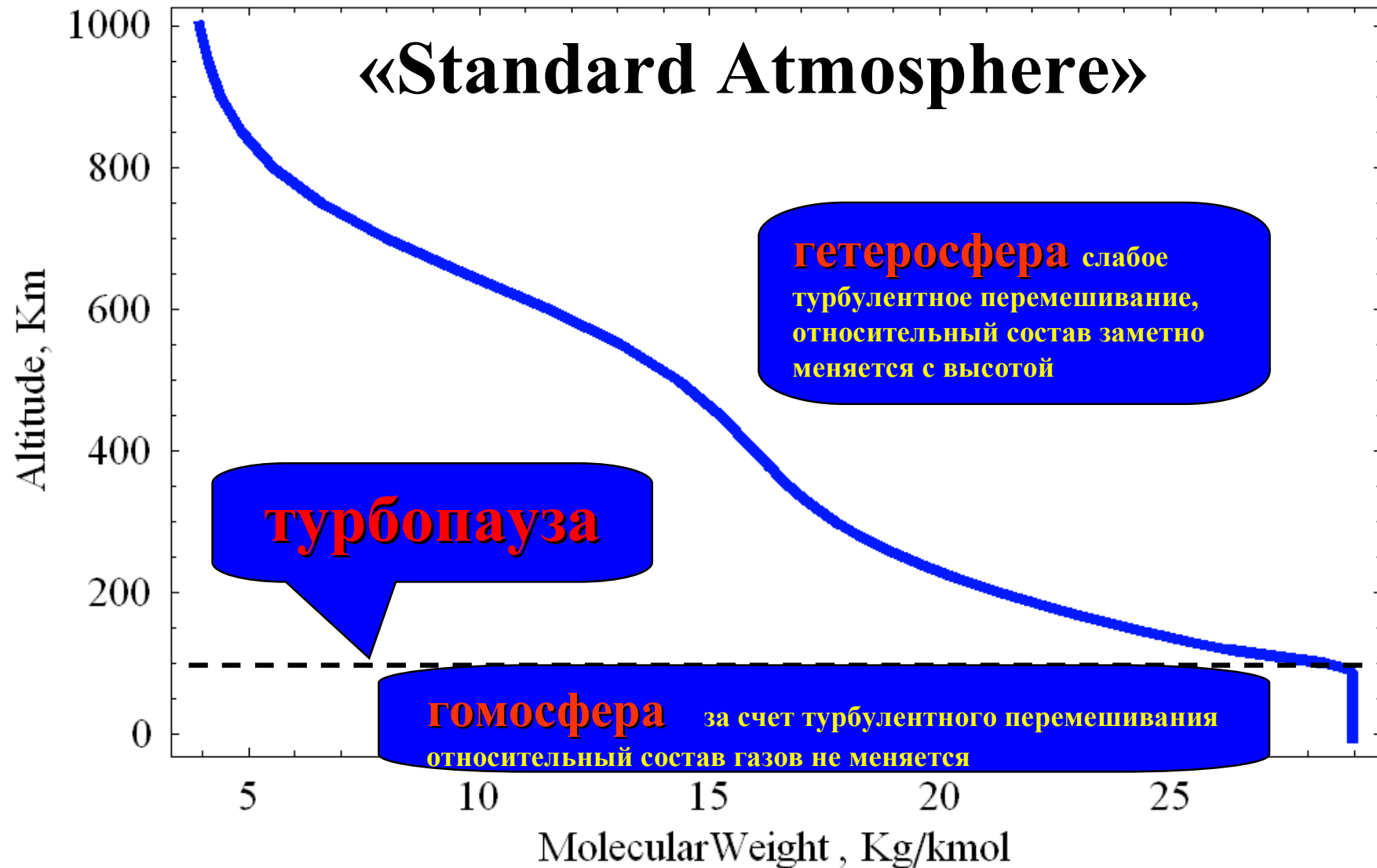


Термосфера

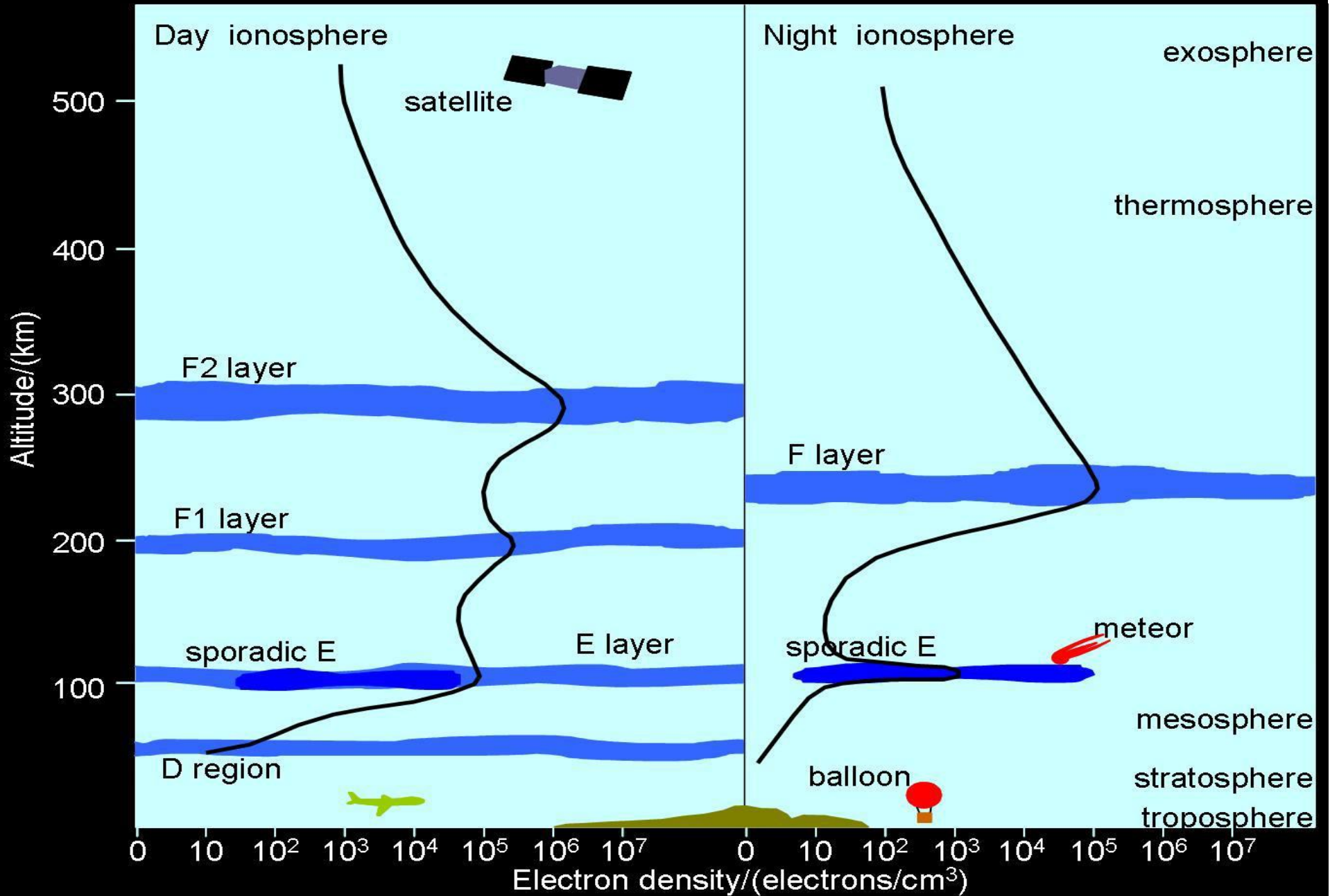
- ❑ Температура увеличивается до $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ за счет поглощения корпускулярной и рентгеновской радиации Солнца
- ❑ Высокая степень ионизации атмосферных газов



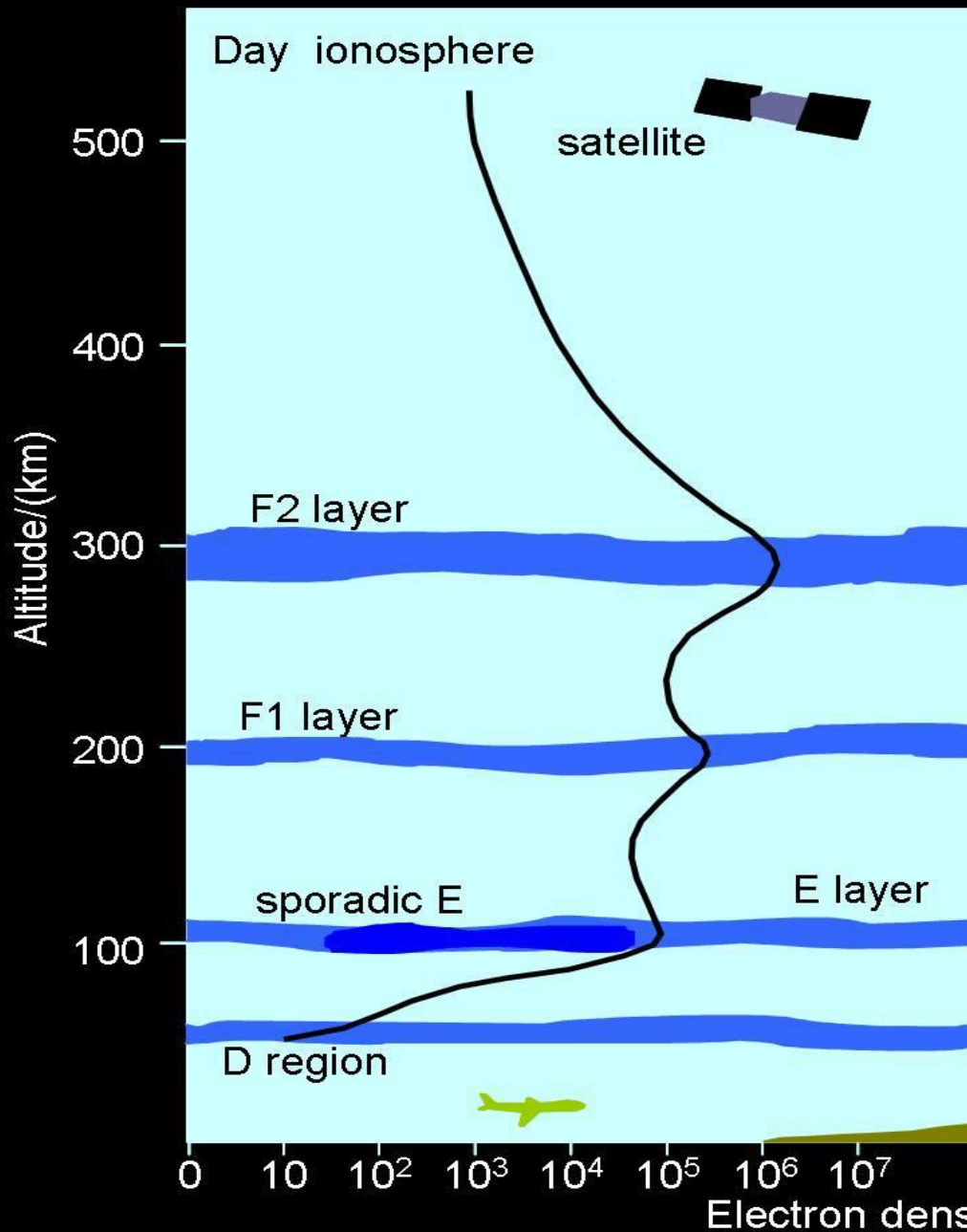
Зависимость среднего молекулярного веса от высоты



Ионосфера



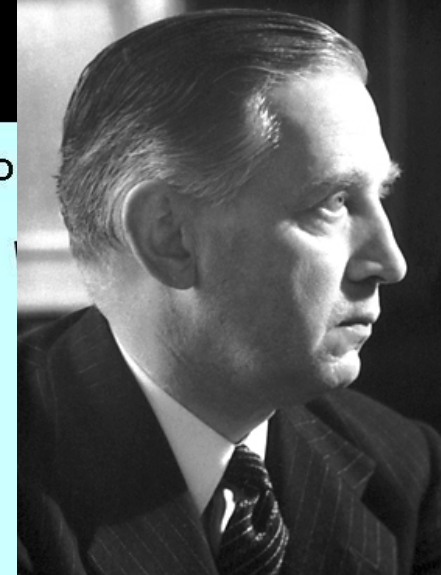
Ионосфера



Night io

xosphere

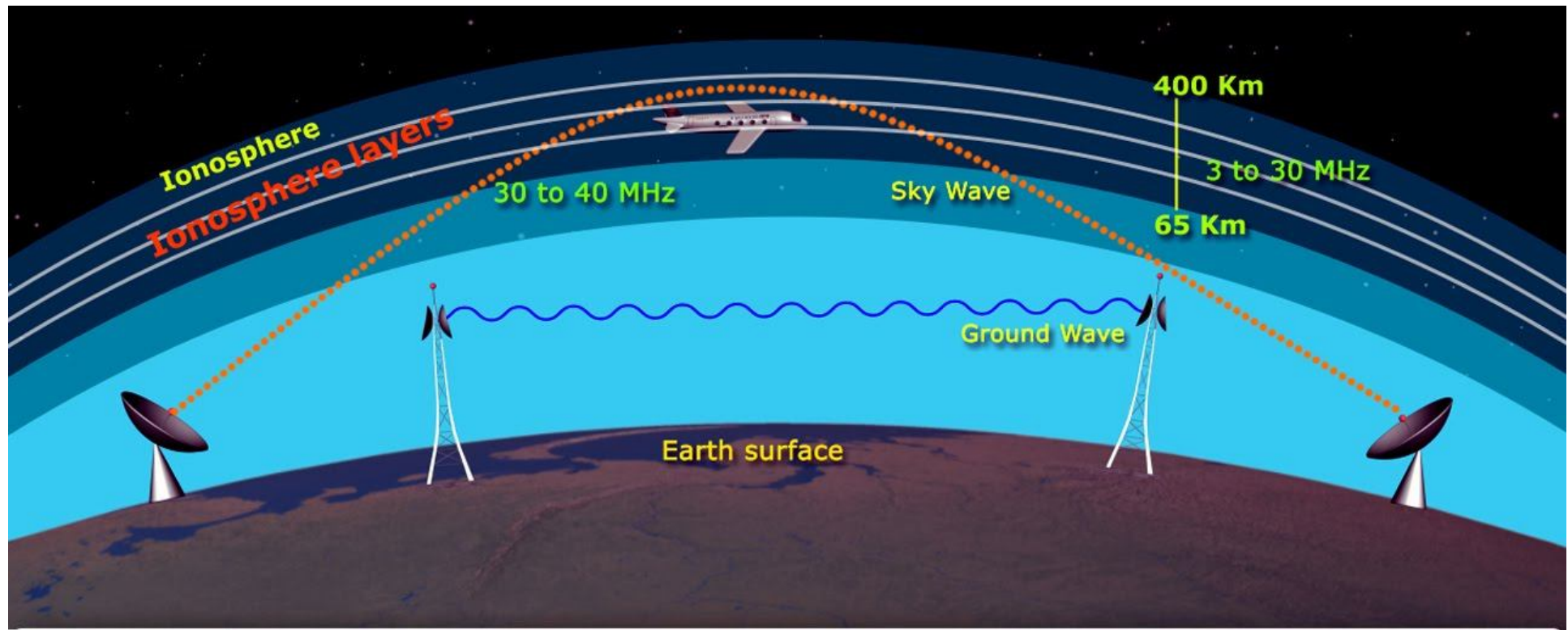
nosphere



**Sir Edward Victor
Appleton (1892-1965)**

**Нобелевская премия по
физике 1947 г.**

За исследования физики
верхних слоев атмосферы,
в особенности за открытие
«слоя Эплтона» (слой F)



PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES

Условия существования* атмосферы

***Диссипация атмосфер – ускользание газов из атмосфер космических тел, вызванное тепловым движением атомов и молекул**

Условие существования атмосферы

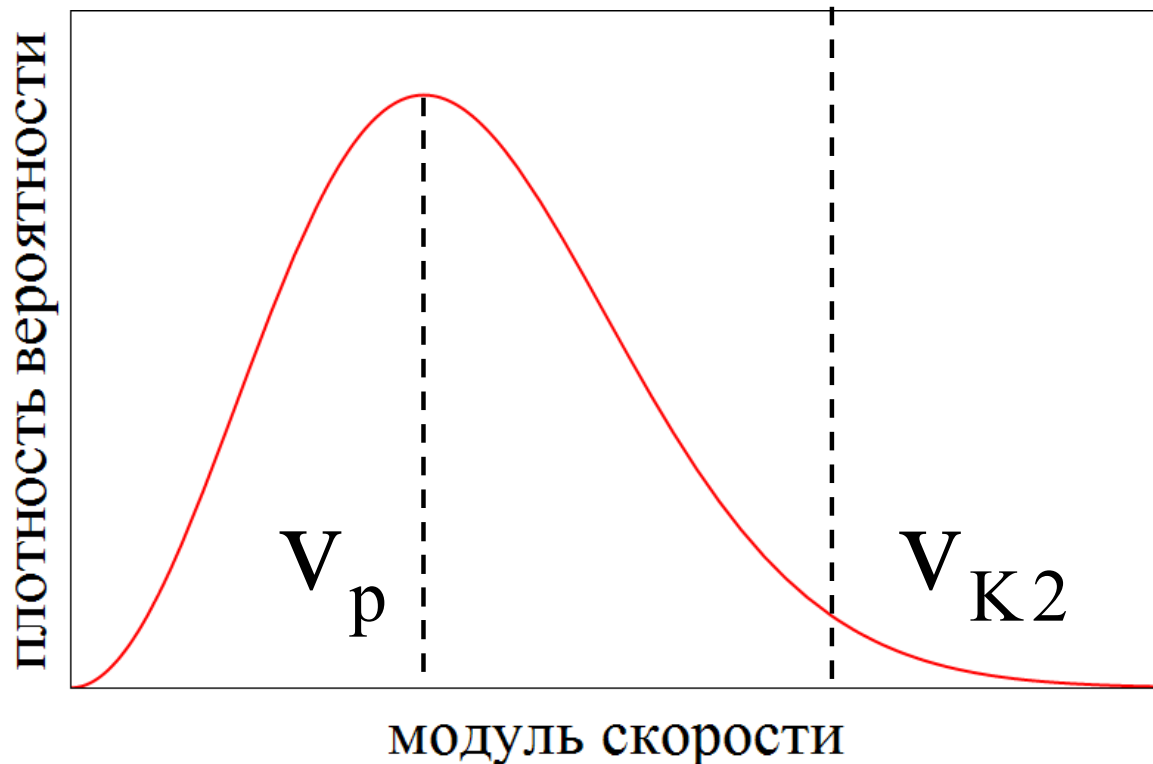
скорость тепл. движения < 2-й косм. скорости

$$V_{K2} = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} \approx \sqrt{2gR_{\oplus}} \approx 11.2 \text{ км/с}$$

Распределение Максвелла

наиболее
вероятная
тепловая
скорость

$$V_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$



Диссипация атмосфер – ускользание газов из атмосфер космических тел, вызванное тепловым движением атомов и молекул

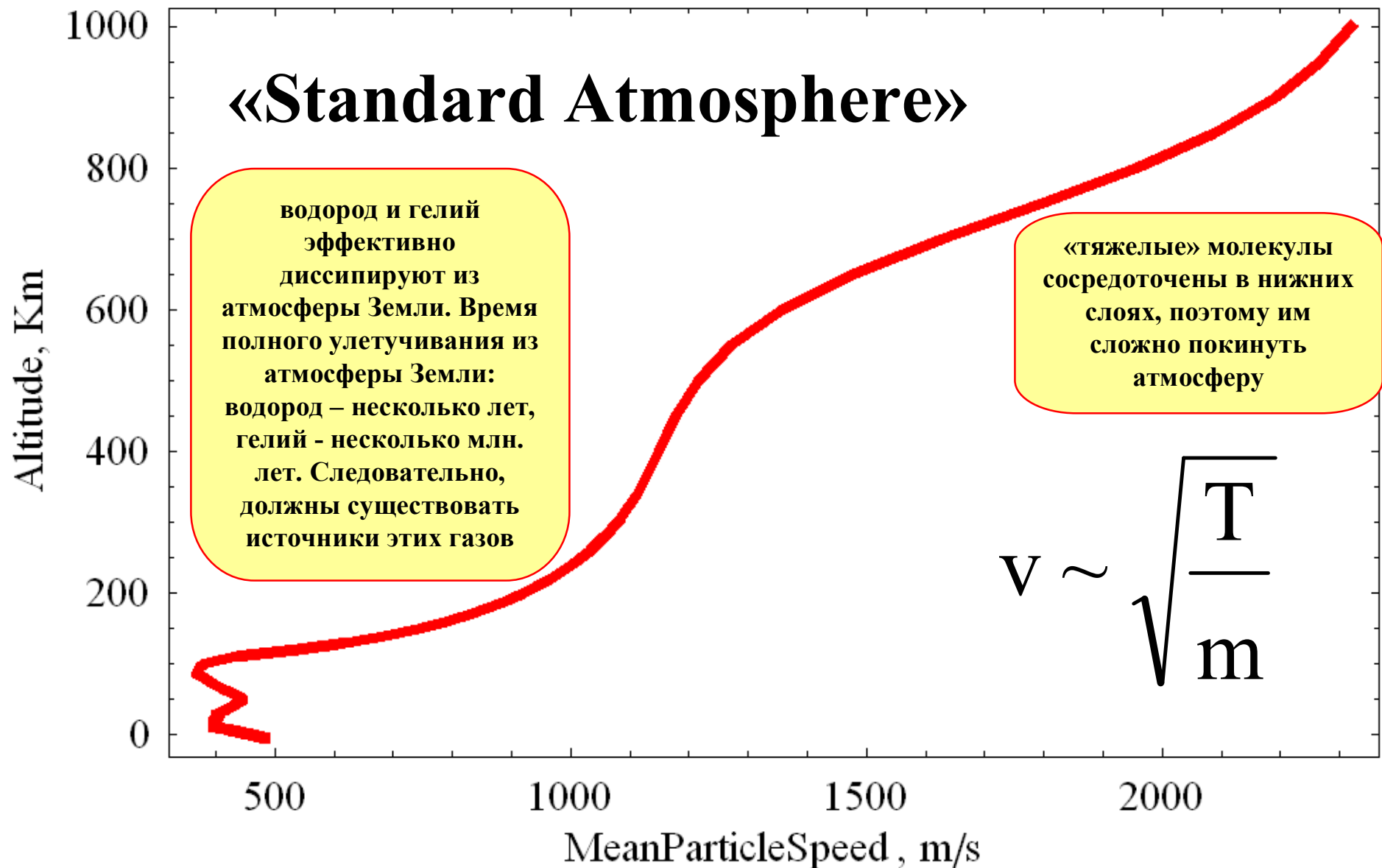
$$v_p < v_{K2}$$

условие не обеспечивает отсутствие диссипации

при $T = 300 \text{ K}$

$$\left. \begin{array}{l} v_{\text{H}_2} \approx 1.5 \text{ км/с} \\ v_{\text{N}_2} \approx 0.5 \text{ км/с} \end{array} \right\} < 11.2 \text{ км/с}$$

Зависимость средней скорости от высоты



Гидросфера Земли:

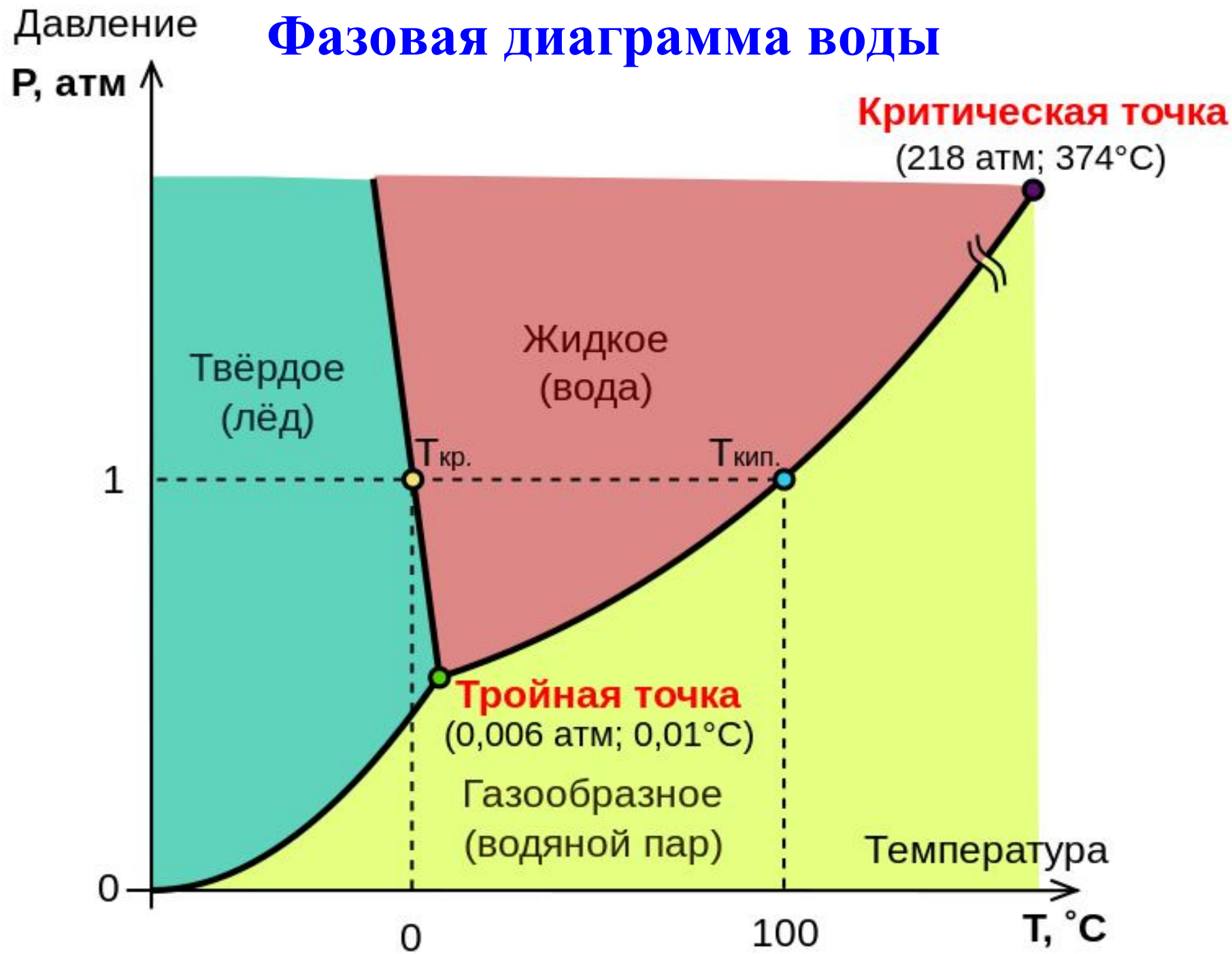
- условия существования
- происхождение
- состав
- элементы структуры

Условия существования гидросферы (океана)

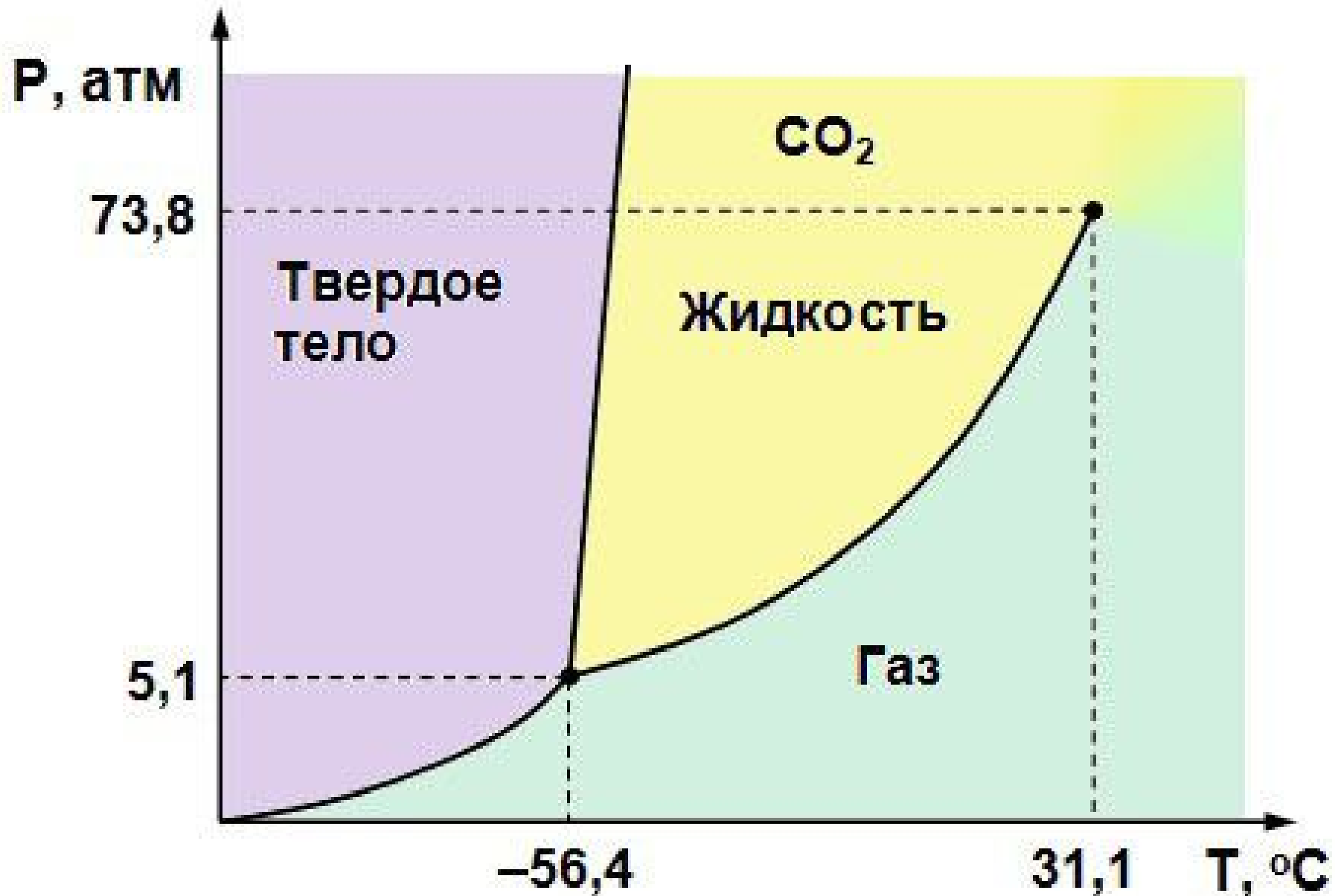
1. Температура на планете должна быть выше температуры плавления вещества, из которого состоит океан
2. Парциальное давление газообразной фазы этого вещества должно быть выше насыщающего давления
3. Температура и давление должны быть ниже критической точки (для воды: 647.3К, 22.12МПа)

Точка, в которой фазы вещества становятся тождественными: обращаются в ноль теплота фазового перехода и поперхн. натяжение

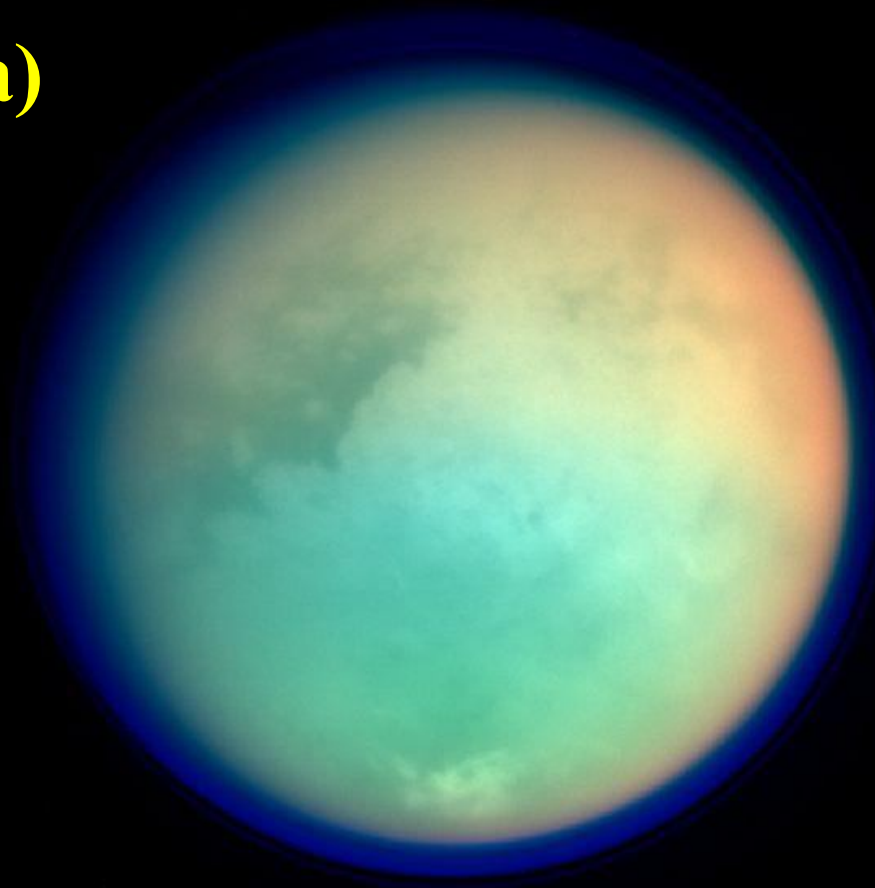
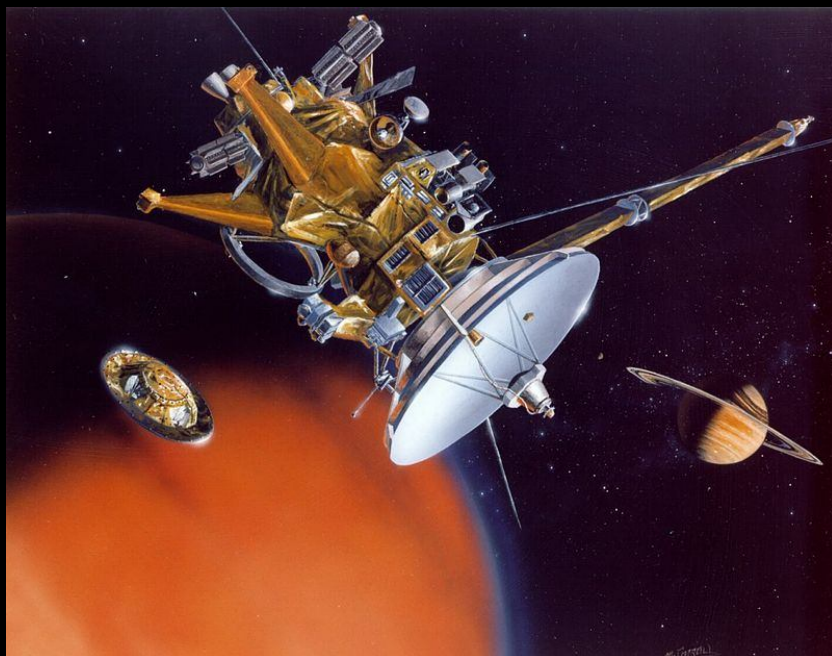
Фазовая диаграмма воды



Фазовая диаграмма углекислоты

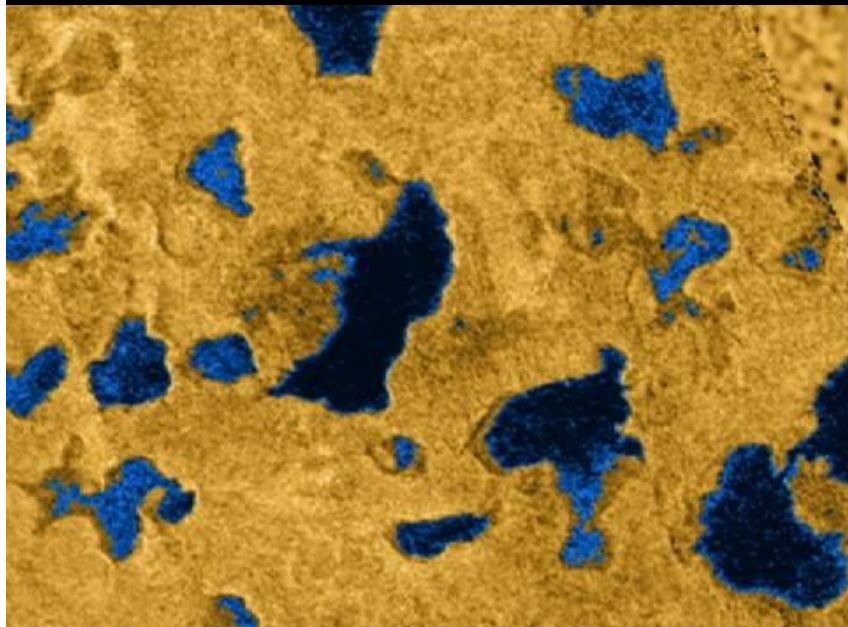


Титан (спутник Сатурна)



**«Кассини-Гюйгенс»
(старт 1997 г.)**

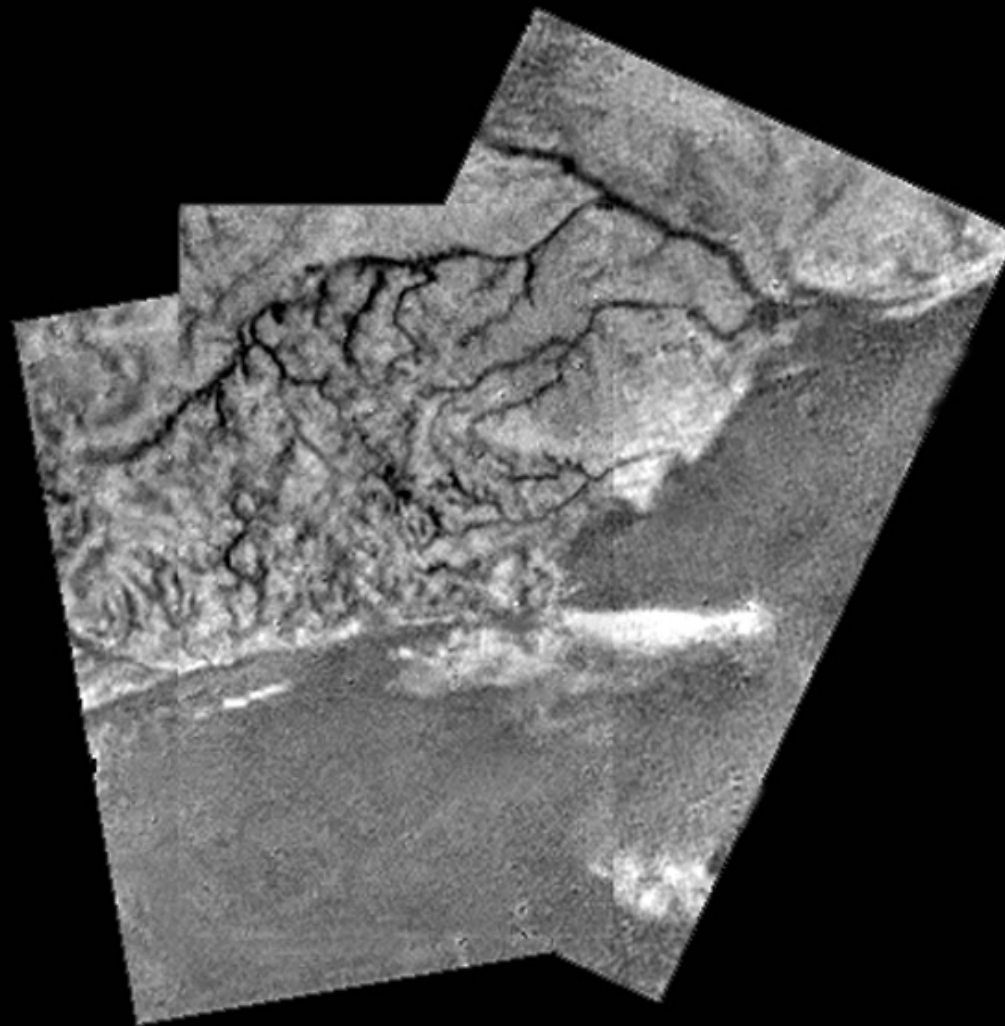
Титан (спутник Сатурна)



Озера (этан,
пропан, метан)

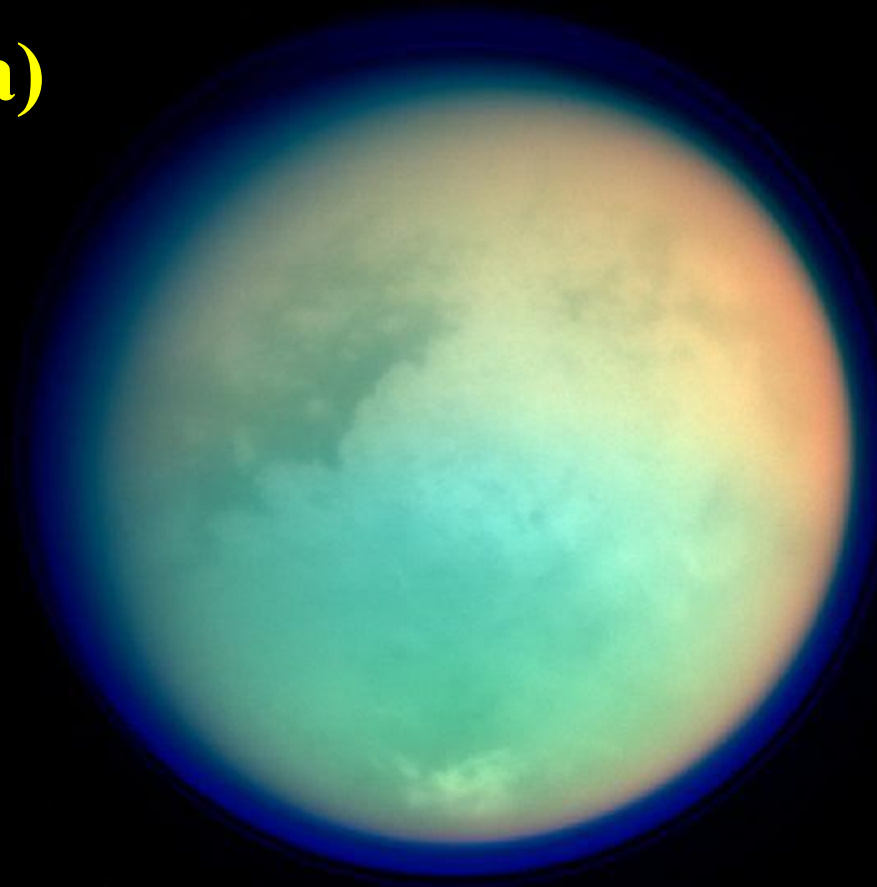
T=94 К

p=1.45 атм



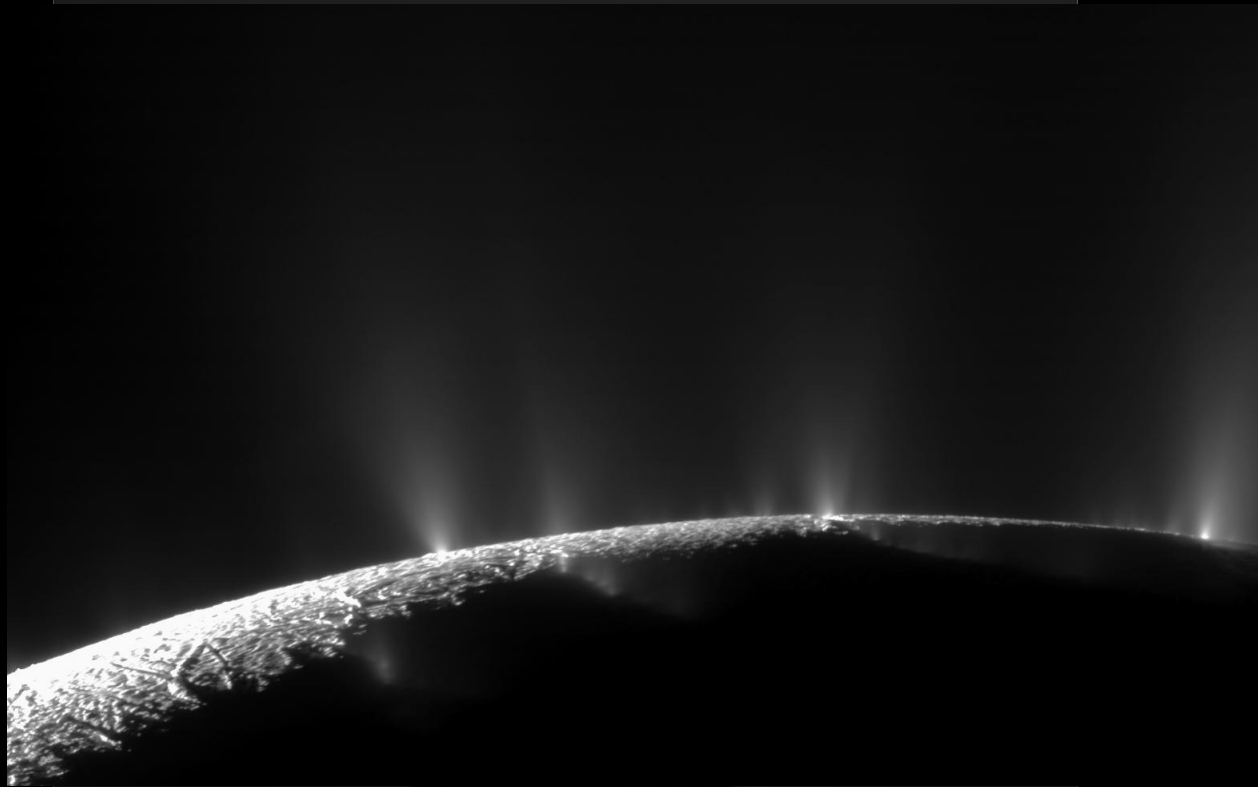
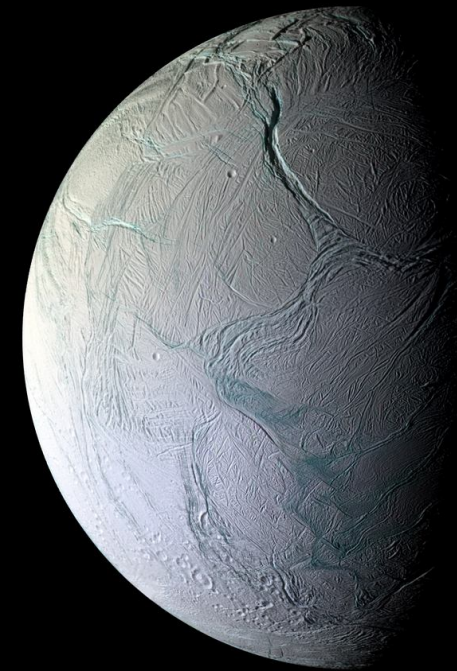
Русла рек

Титан (спутник Сатурна)



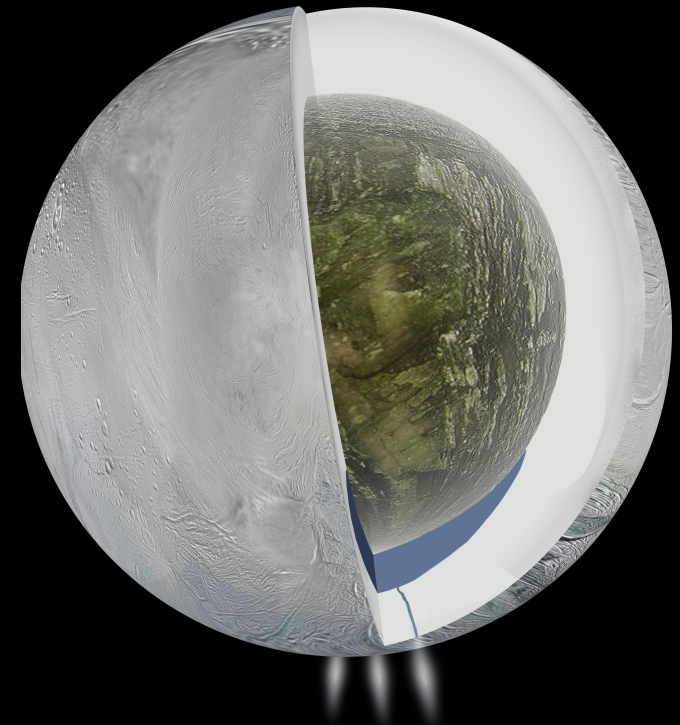
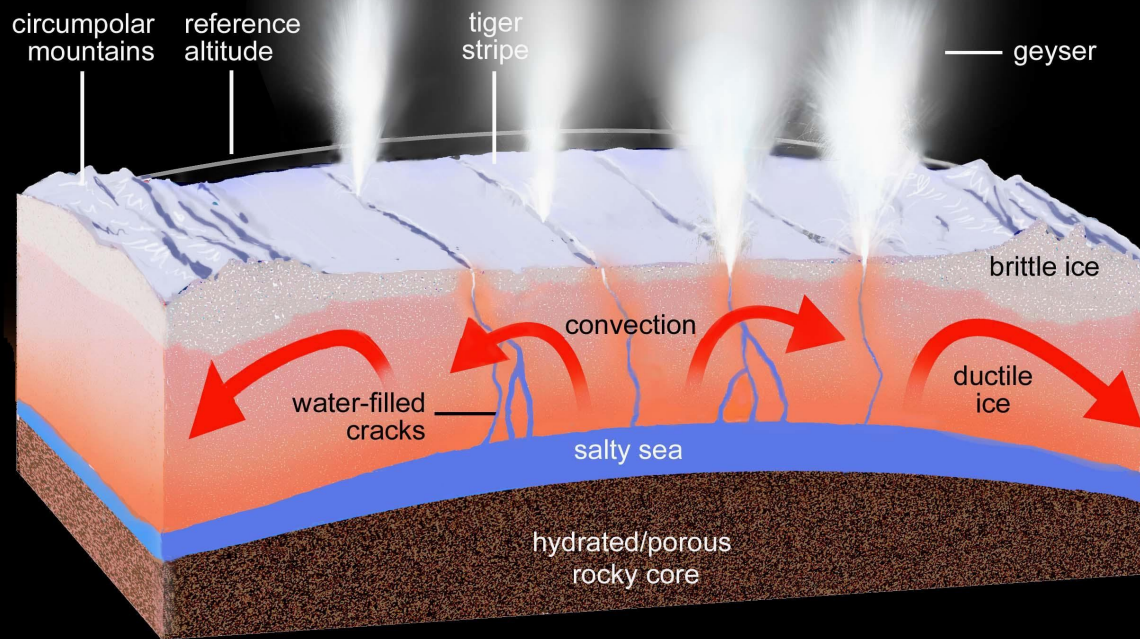
Ландшафт Титана в месте посадки зонда «Гюйгенс» (2005 г.). Камни округлой формы могли образоваться при воздействии жидкости.

Энцелад (спутник Сатурна)



Гейзеры на южном полюсе

Энцелад (спутник Сатурна)



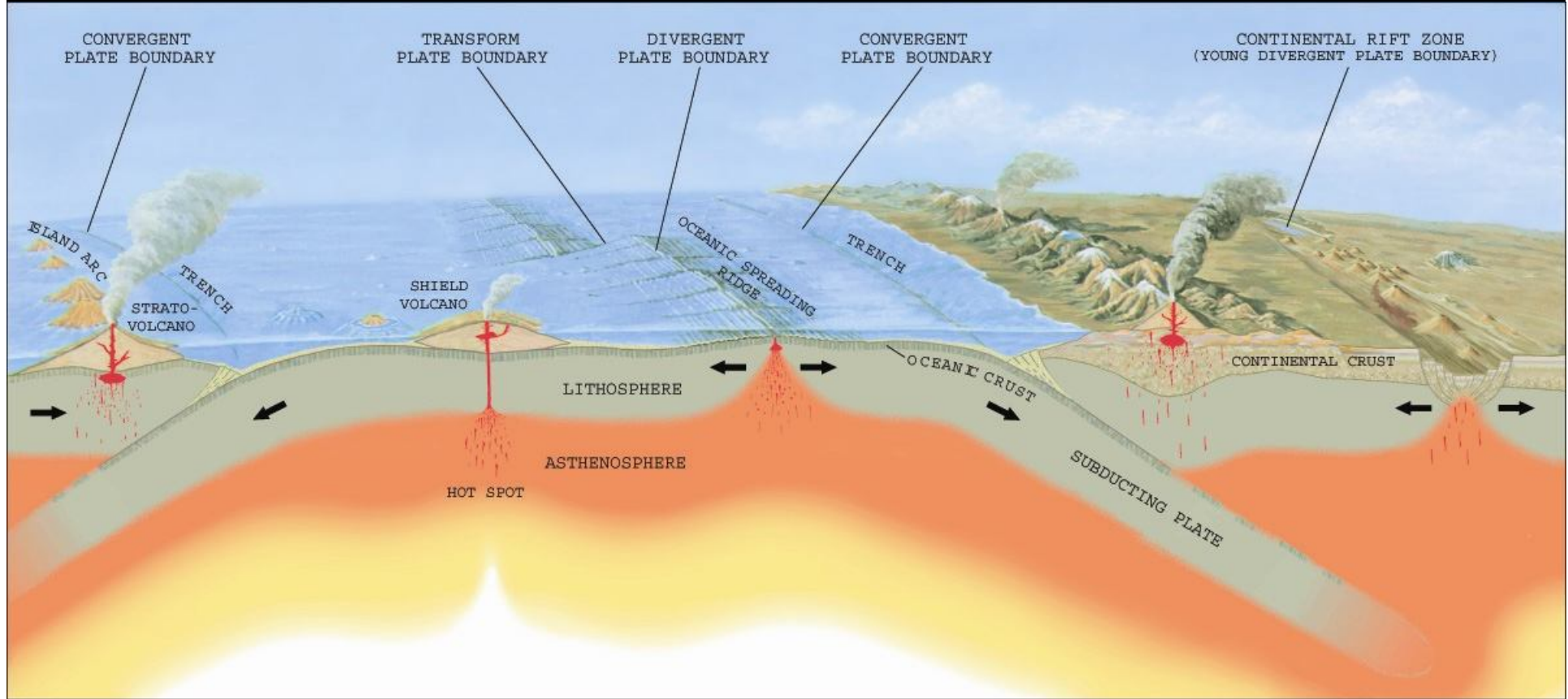
Гейзеры на южном полюсе

- ❑ Вода (водяной пар) появилась на поверхности Земли 4 млрд.лет назад как следствие дегазации мантии при тектономагматической активности**
- ❑ Гидросфера (океан) возникла на Земле 3 млрд. лет назад**
- ❑ Современные океанские котловины сформировались значительно позднее (в последние 250 млн. лет)**

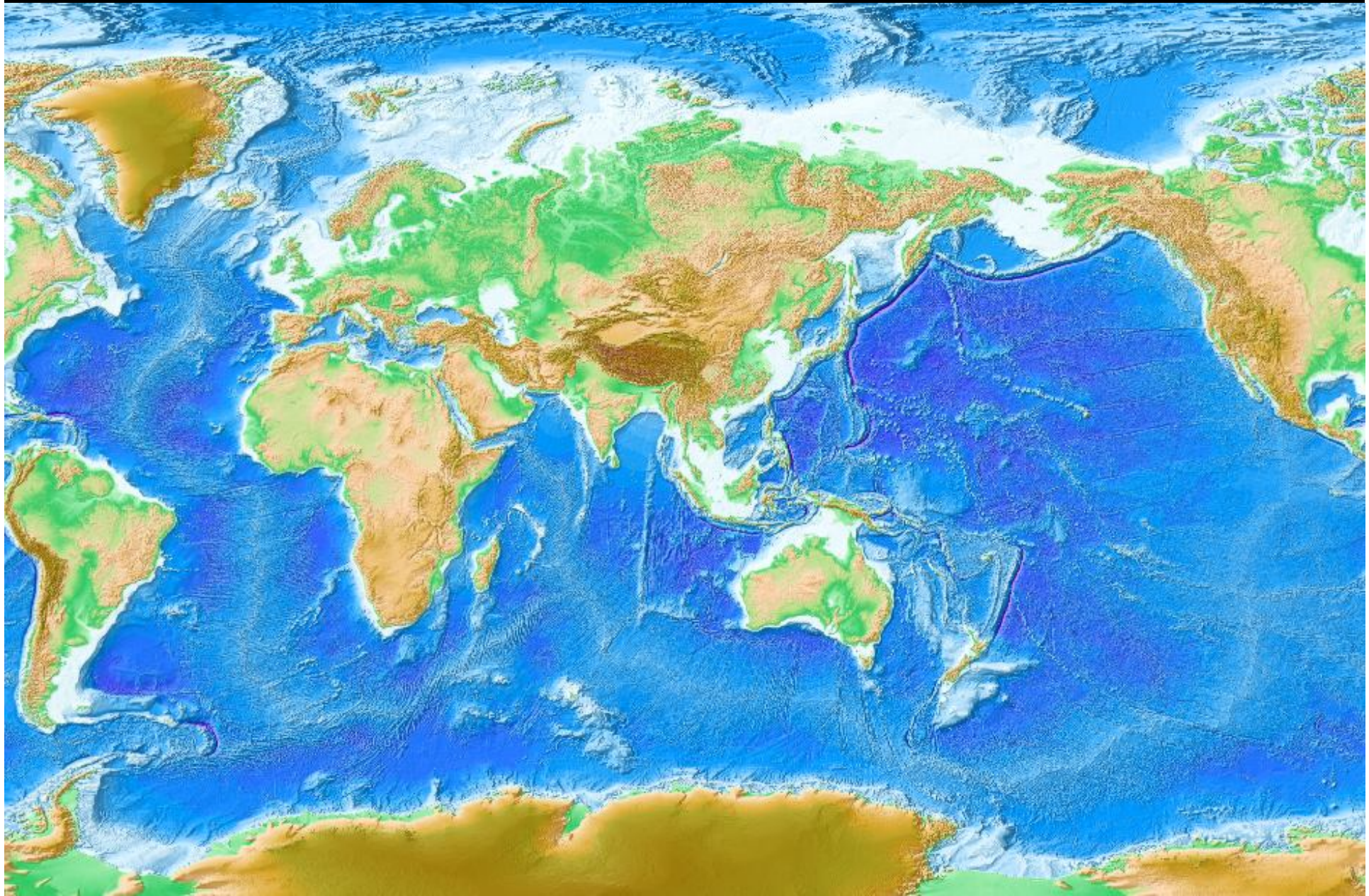
**Мировой океан занимает
71% поверхности Земли
(361 млн.кв.км)**



Формирование рельефа дна



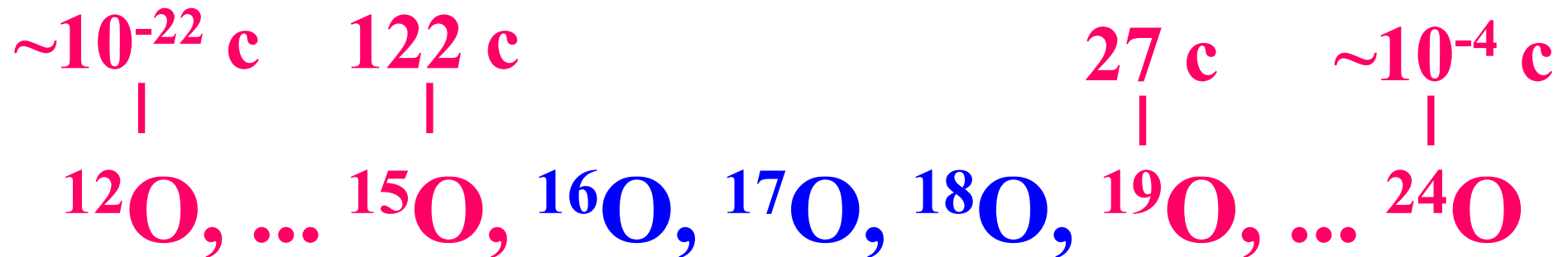
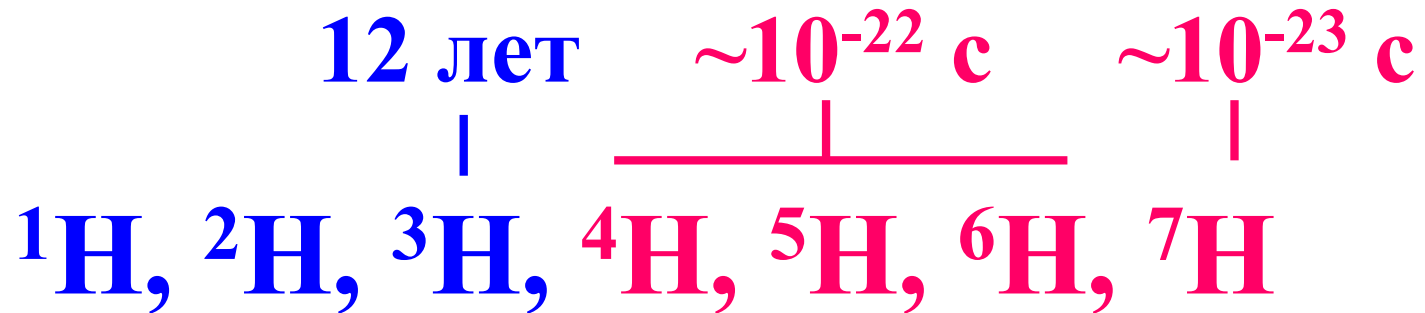
Топография океанического дна



Основные крупномасштабные формы рельефа дна

<i>Форма</i>	<i>Глубины, м</i>	<i>Уклон</i>
Шельф	0-200	0.002 (ср.)
Материковый склон	200-3000	~0.01-0.1
Материковое подножие	3000-4000	~0.001-0.01
Ложе океана, Океанические котловины	4000-6000	
Срединно-океанические хребты	2500-4000	~0.005
Глубоководные желоба	>6000	~0.1

Известны следующие изотопы водорода и кислорода:



стабильны (существуют в природе)

нестабильны (малый период полураспада)

Виды молекул воды, встречающиеся в природе

Молекулы воды	% содержание	название
${}^1\text{H}_2{}^{16}\text{O}$	99.73	протиевая (легкая) вода 99.97%
${}^1\text{H}_2{}^{18}\text{O}$	0.20	
${}^1\text{H}_2{}^{17}\text{O}$	0.04	
${}^1\text{H}{}^2\text{H}{}^{16}\text{O}$	0.02	дейтерий-протиевая вода
${}^1\text{H}{}^2\text{H}{}^{18}\text{O}$	0.00006	
${}^1\text{H}{}^2\text{H}{}^{17}\text{O}$	0.00001	
${}^2\text{H}_2{}^{16}\text{O}$	0.000003	дейтериевая (тяжёлая) вода
${}^2\text{H}_2{}^{18}\text{O}$	0.000000006	
${}^2\text{H}_2{}^{17}\text{O}$	0.000000001	

тритиевой (сверхтяжелой) воды в Мировом океане ~1 кг

Соленость морской воды

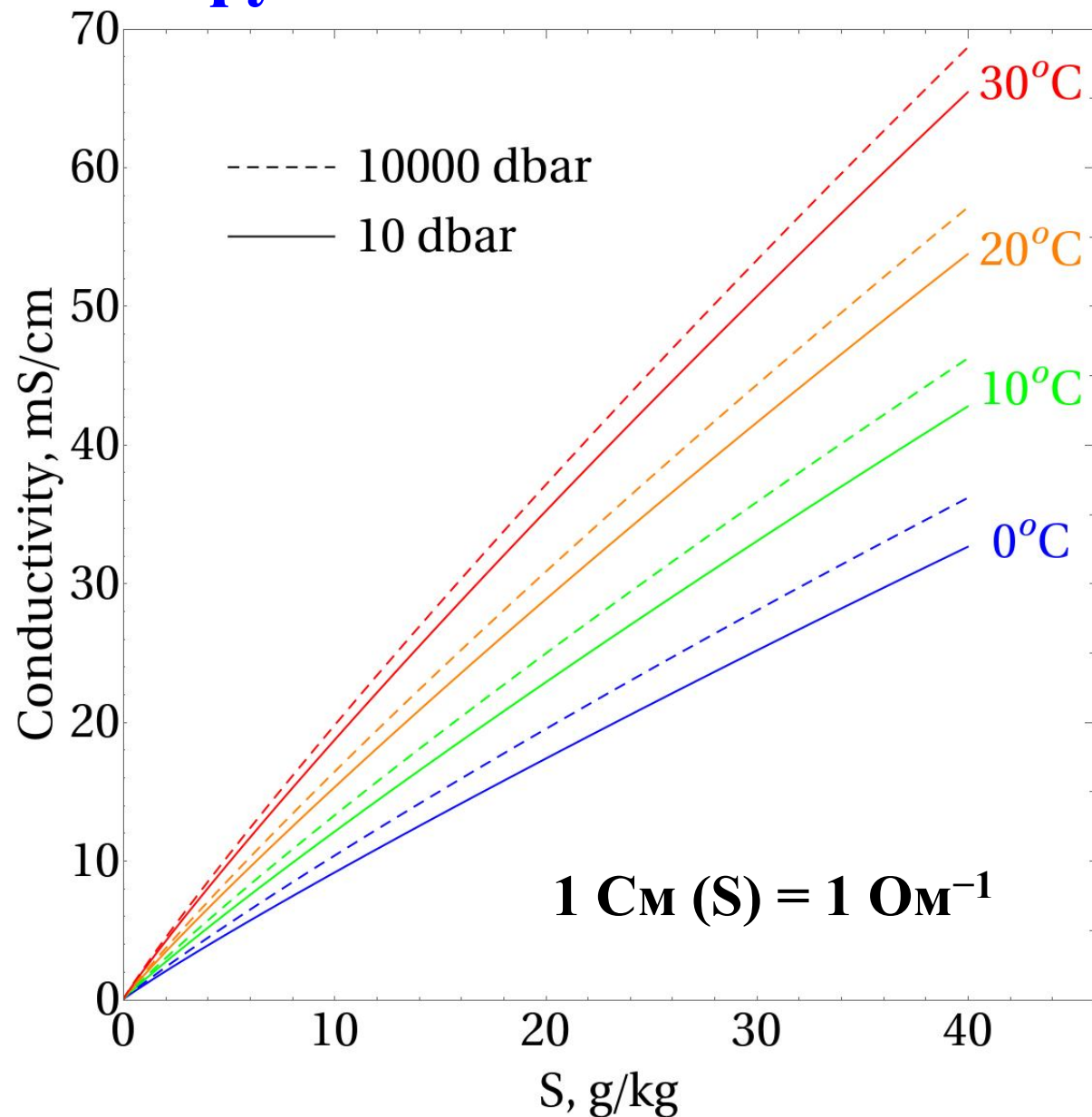
$$S = \frac{m_{\text{примеси}}}{m_{\text{примеси}} + m_{\text{чистой воды}}} \left[\text{‰ промилле} \right]$$

PSU (Practical Salinity Unit)

Соленость – масса в граммах твердых веществ, растворенных в 1 кг воды, при условии, что карбонаты (CO_3^{2-} , HCO_3^-) превращены в оксиды, галогены (Br, I) заменены хлором, и все органические вещества сожжены при температуре 480 °C

*Точное определение $m_{\text{примеси}}$ в результате испарения, высушивания и взвешивания на практике очень сложно, т.к. некоторые вещества улетучиваются (например, хлористые соединения)

Электропроводность морской воды как функция солености и температуры



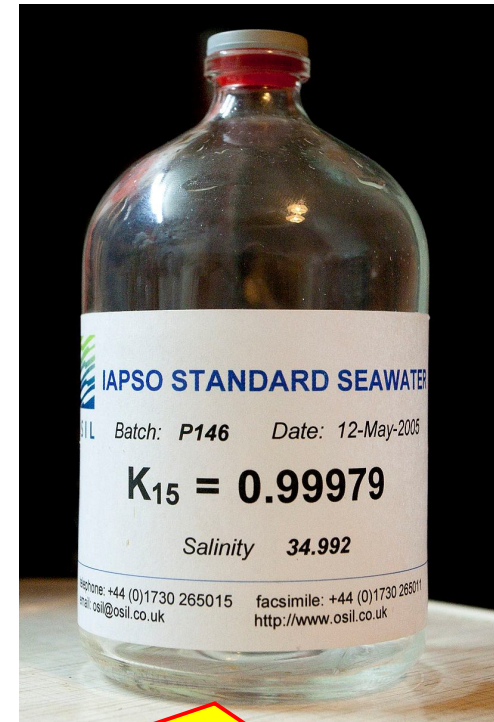
Электропроводность некоторых веществ (См/м) при 20°C

серебро	62 500 000
медь	58 100 000
золото	45 500 000
алюминий	37 000 000
нихром	893 000
графит	125 000
вода морская	3
земля влажная	10 ⁻²
вода дистилл.	10 ⁻⁴
мрамор	10 ⁻⁸
стекло	10 ⁻¹¹
фарфор	10 ⁻¹⁴

На практике определение солености основано на измерении **электропроводности** воды и ***закономерности** постоянства солевого состава морской воды

**Закономерность может нарушаться в полностью изолированных морях (Каспийское, Аральское), в морях с ограниченным водообменом, вблизи устьев рек.*

возможно измерение солености по показателю преломления (рефрактометрия)



Стандартная морская вода для градуировки солемеров (Ocean Scientific International Limited, UK)

Типичная соленость:

в океане	35 ‰
в реках	до 0.5‰

Повышенная соленость наблюдается в зонах максимального испарения и минимума осадков, пониженная – в высоких широтах, где сказывается опресняющее действие талых ледниковых вод и приустьевых зонах.

Красное море - 41 ‰

Средиземное море - 39 ‰

Северный Ледовитый океан - 32‰

Балтийское море - 7‰

Азовское море - 11‰

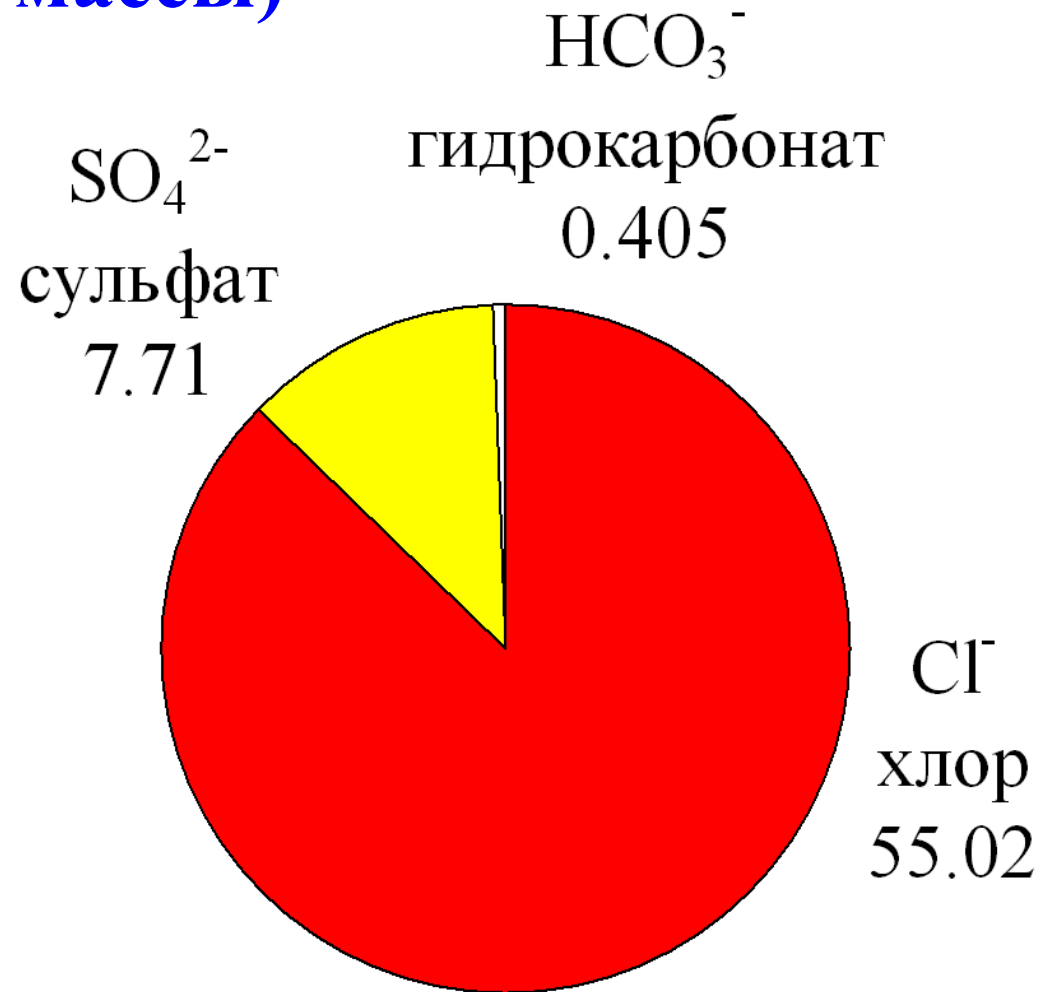
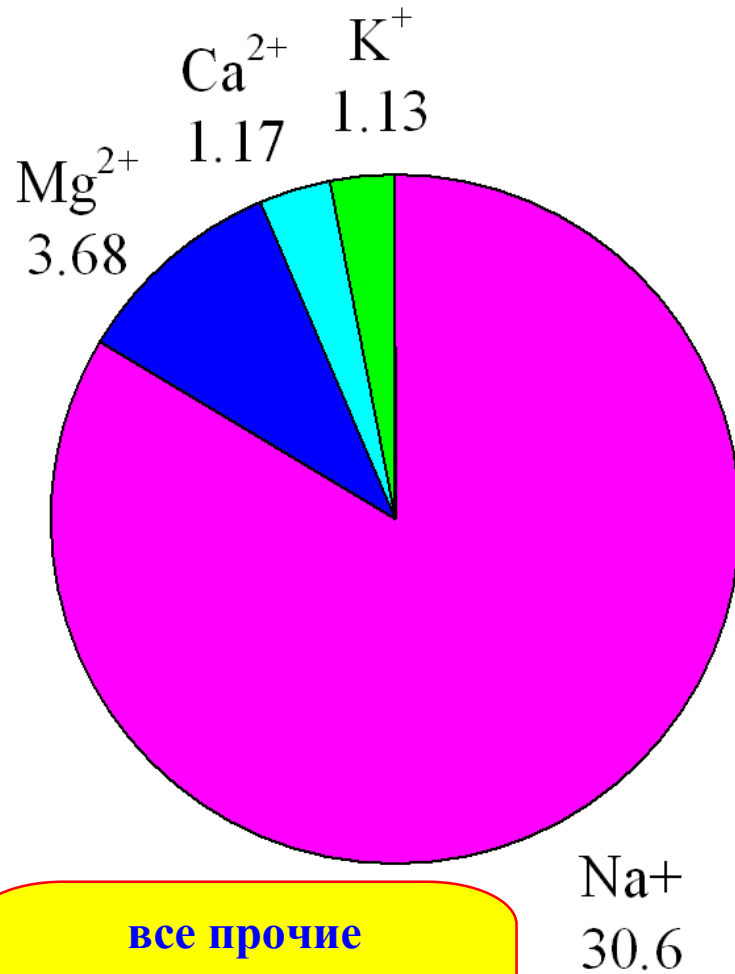
**Мертвое море
250-300 ‰**

**Общее количество
соли в Мировом
океане $\sim 4.9 \cdot 10^{19}$ кг**

**На порядок больше
массы атмосферы!!!**

**Соль Мирового океана способна
покрыть поверхность суши
слоем ~ 150 м**

Главные компоненты примеси в морской воде (% массы)



**все прочие
компоненты
(микроэлементы)
≈ 0.3% массы**

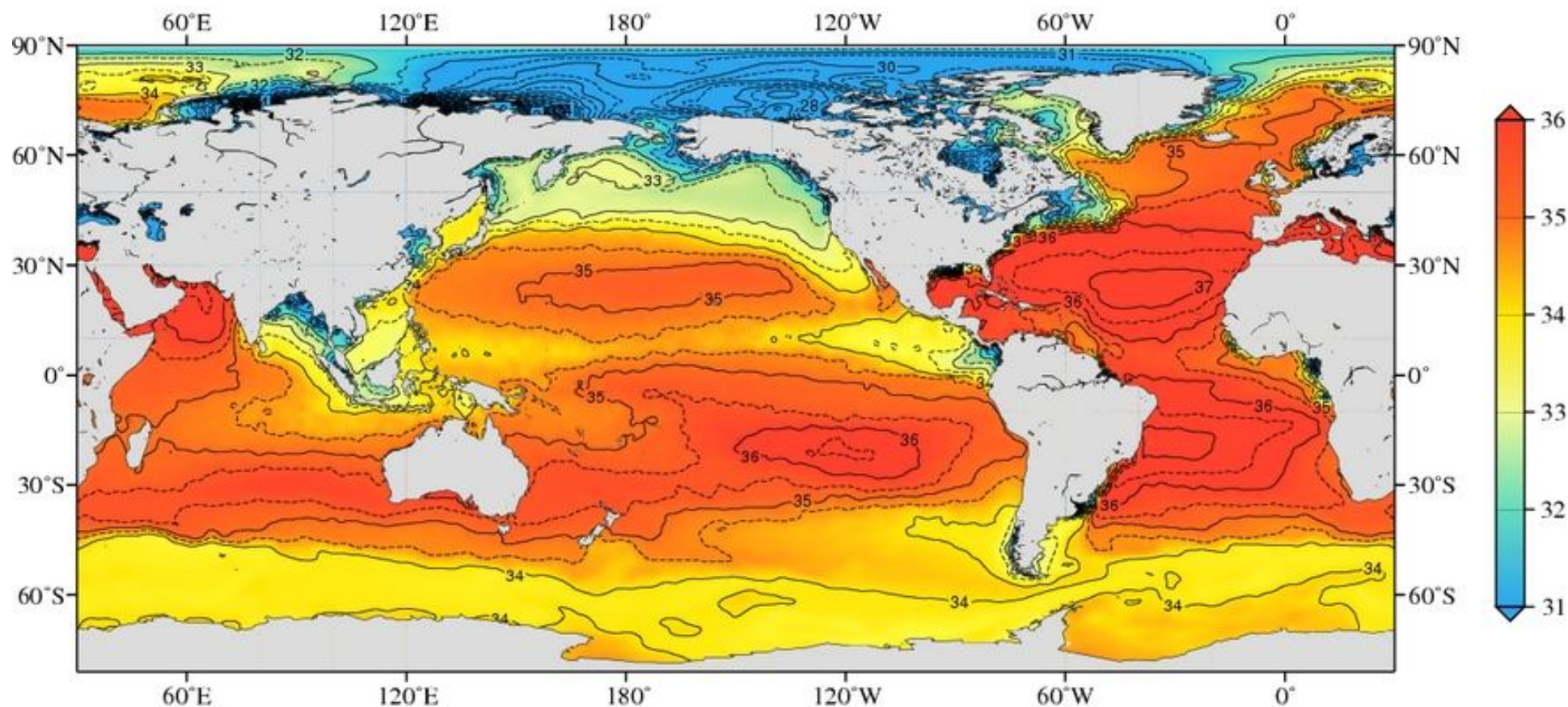
**в 1 кг морской
воды содержится ≈
3·10⁻¹⁰ кг золота**

Среднегодовая солёность на поверхности Мирового океана (в промилле)

World Ocean Atlas Climatology

Decadal Average: 1955 - 2012

Contour Interval=0.5



Annual salinity at the surface (quarter-degree grid)

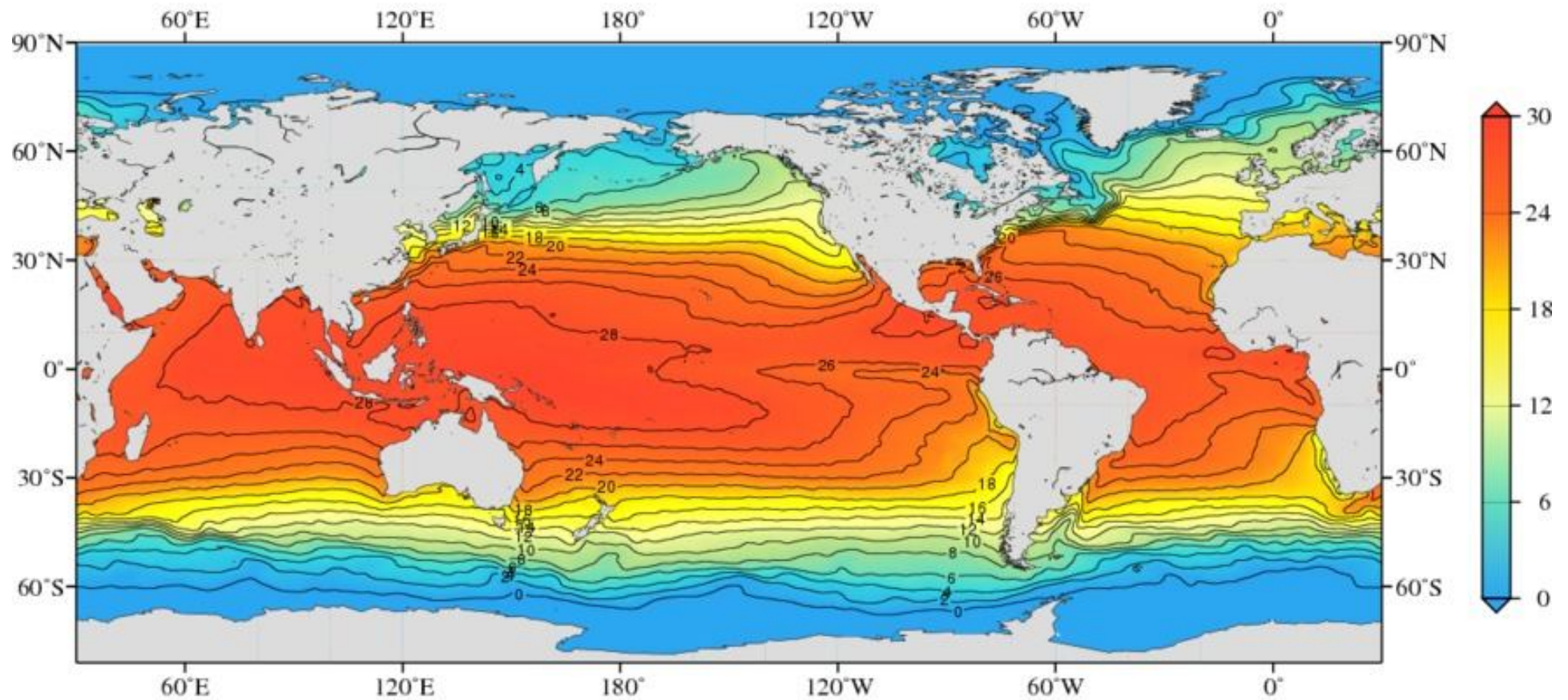
WORLD OCEAN ATLAS 2013 <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>

Среднегодовая температура поверхности Мирового океана

World Ocean Atlas Climatology

Decadal Average: 1955 - 2012

Contour Interval=2

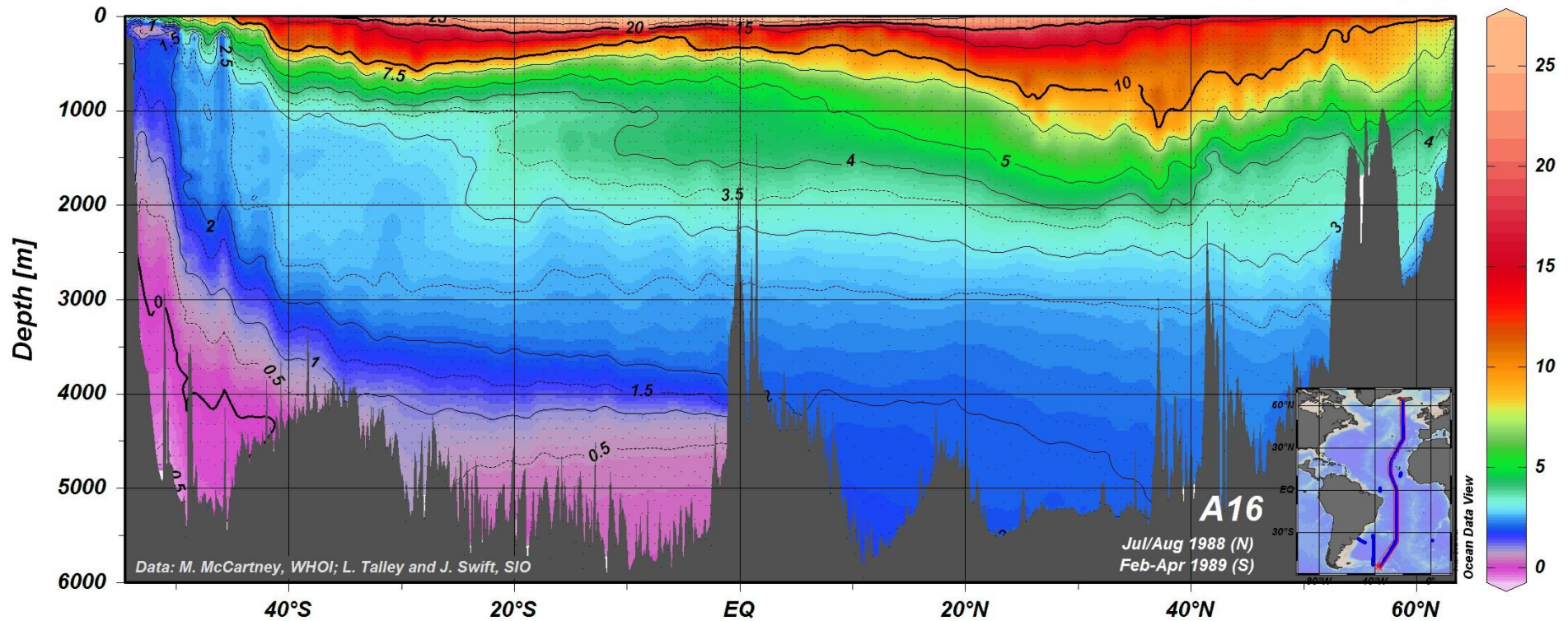


Annual temperature [°C] at the surface (quarter-degree grid)

Вертикальный разрез (температура)

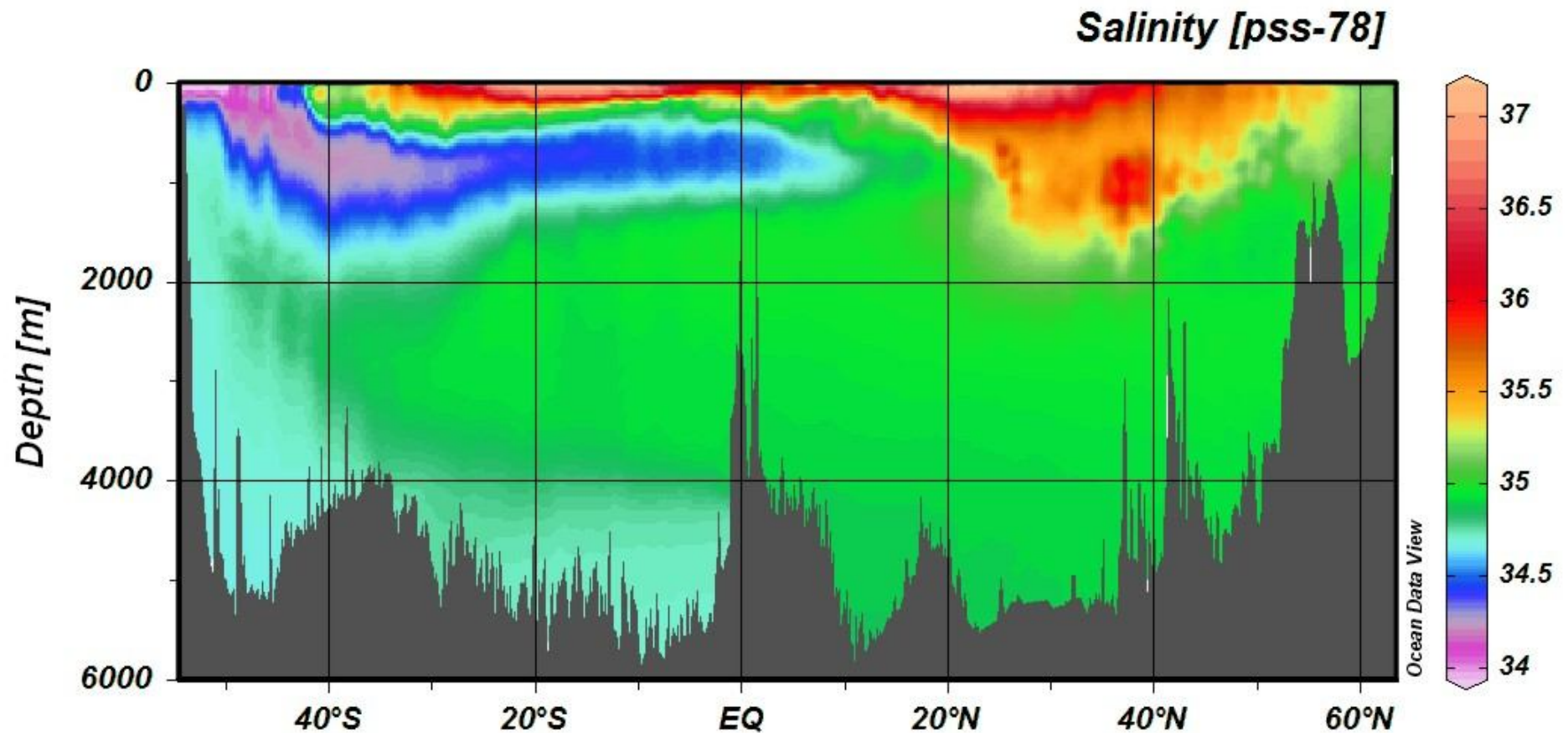
eWOCE

Potential Temperature θ [$^{\circ}\text{C}$]



<http://www.ewoce.org>

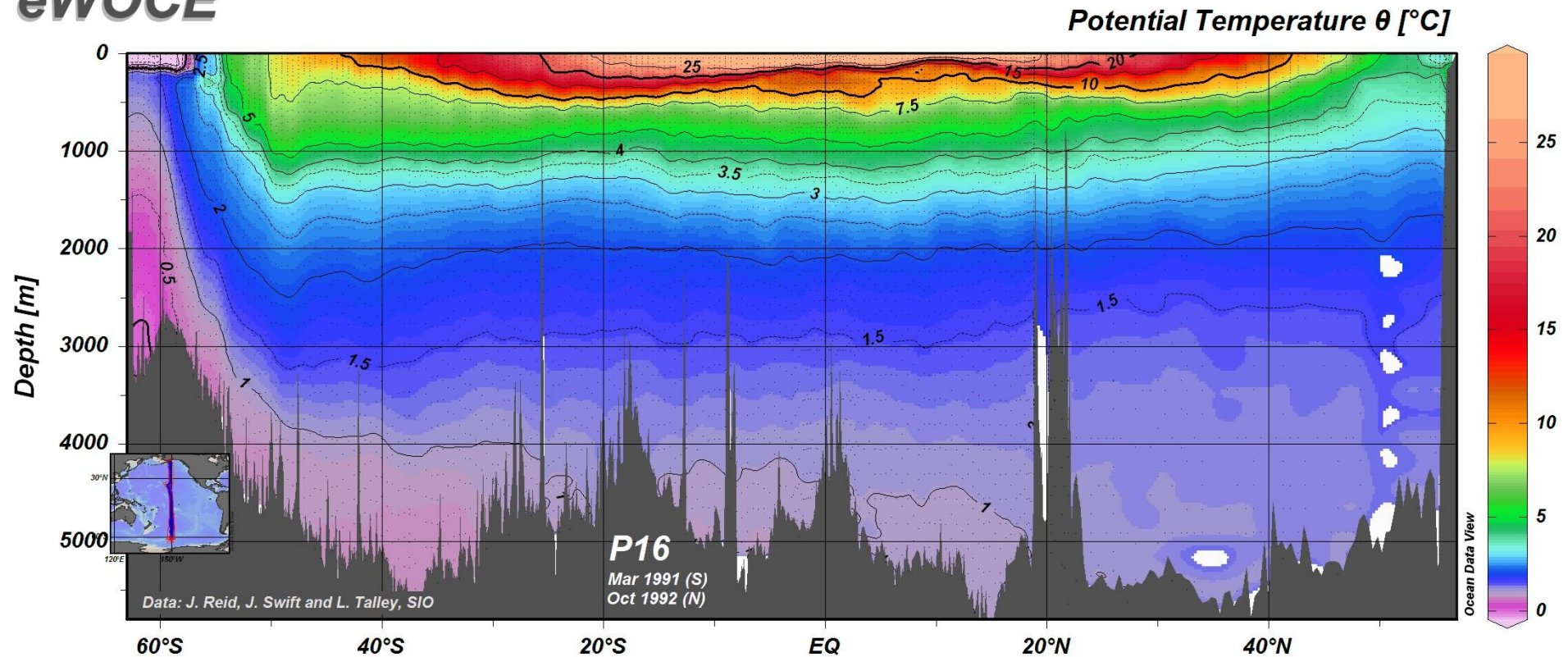
Вертикальный разрез (соленость)



<http://www.ewoce.org>

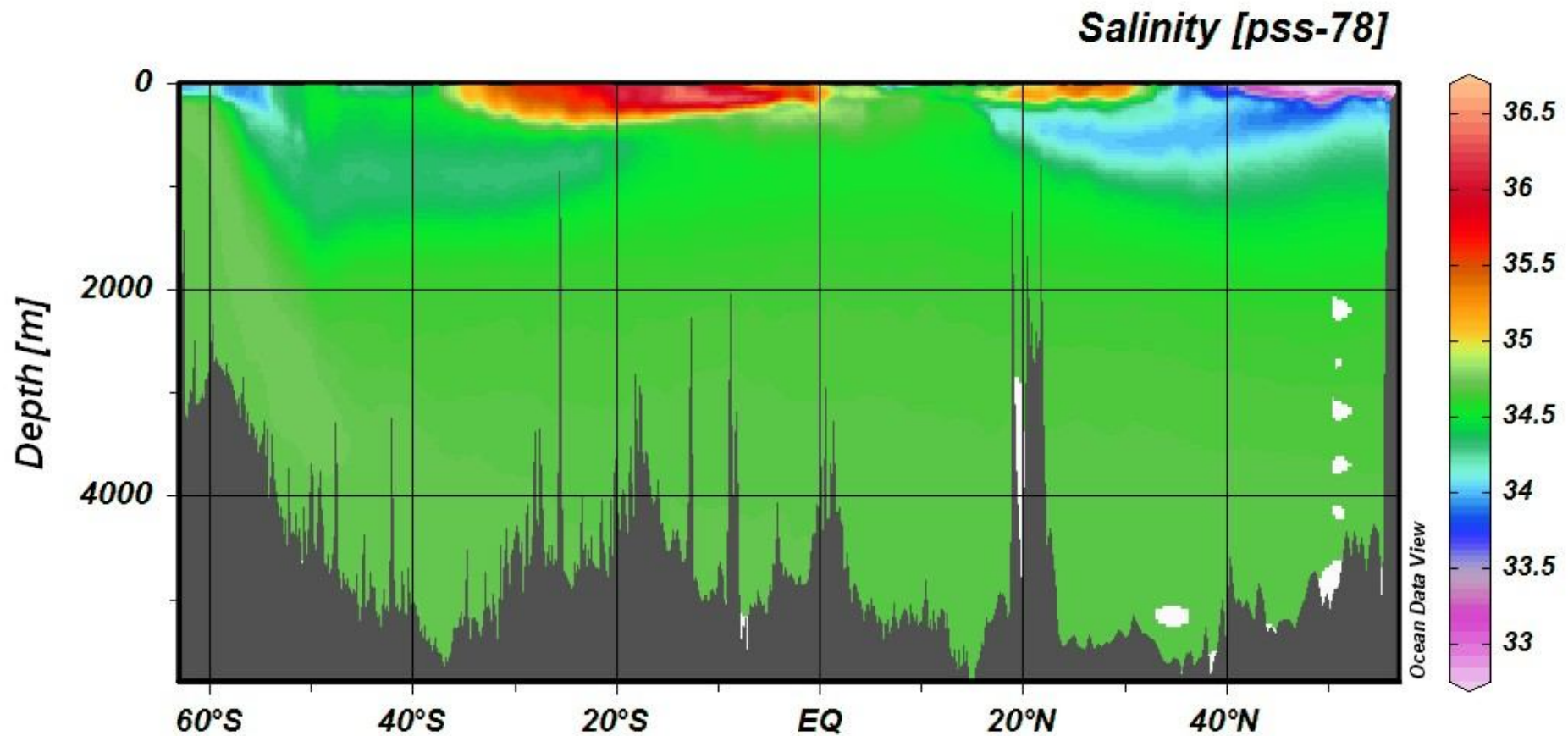
Вертикальный разрез (температура)

eWOCE



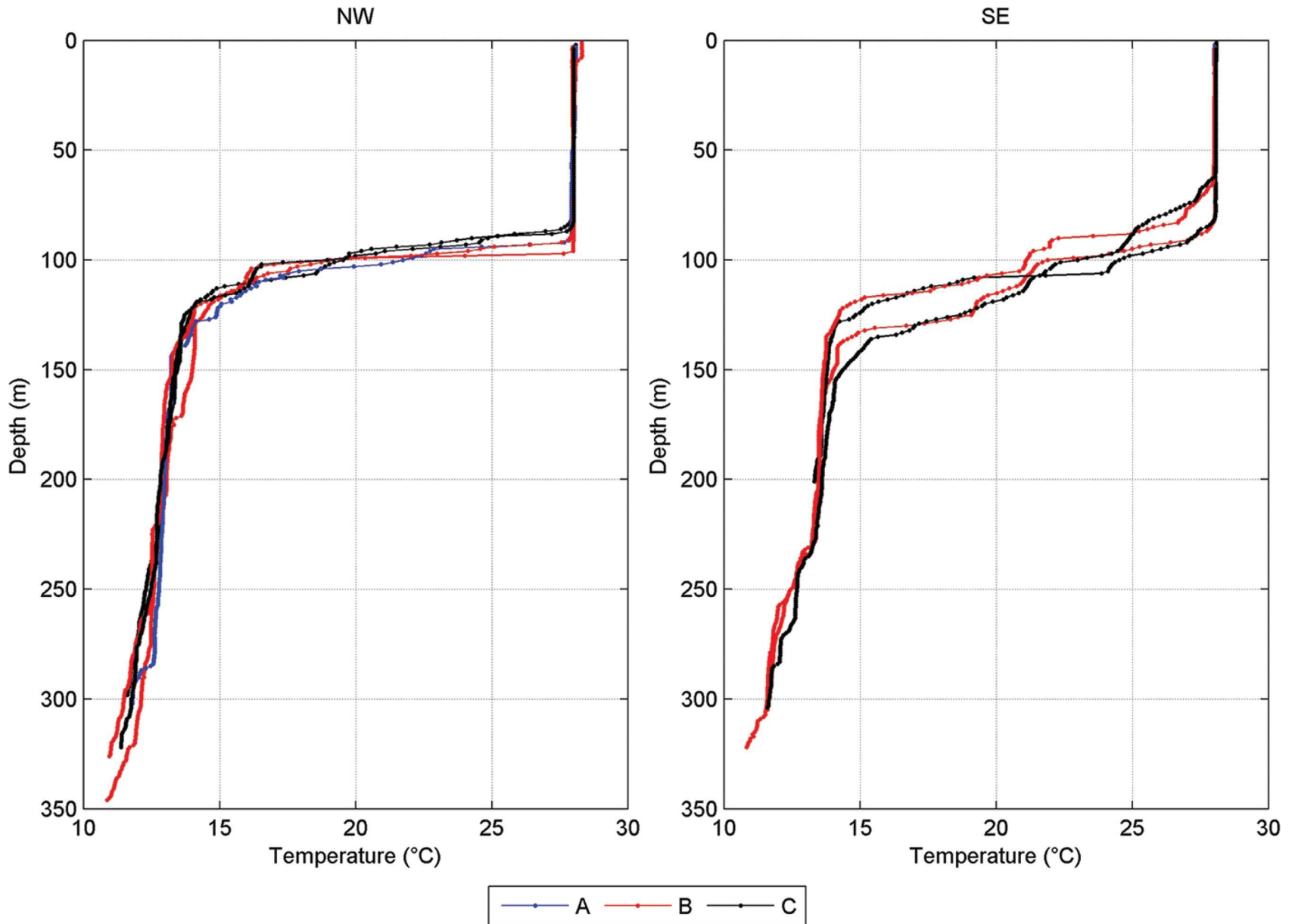
<http://www.ewoce.org>

Вертикальный разрез (соленость)

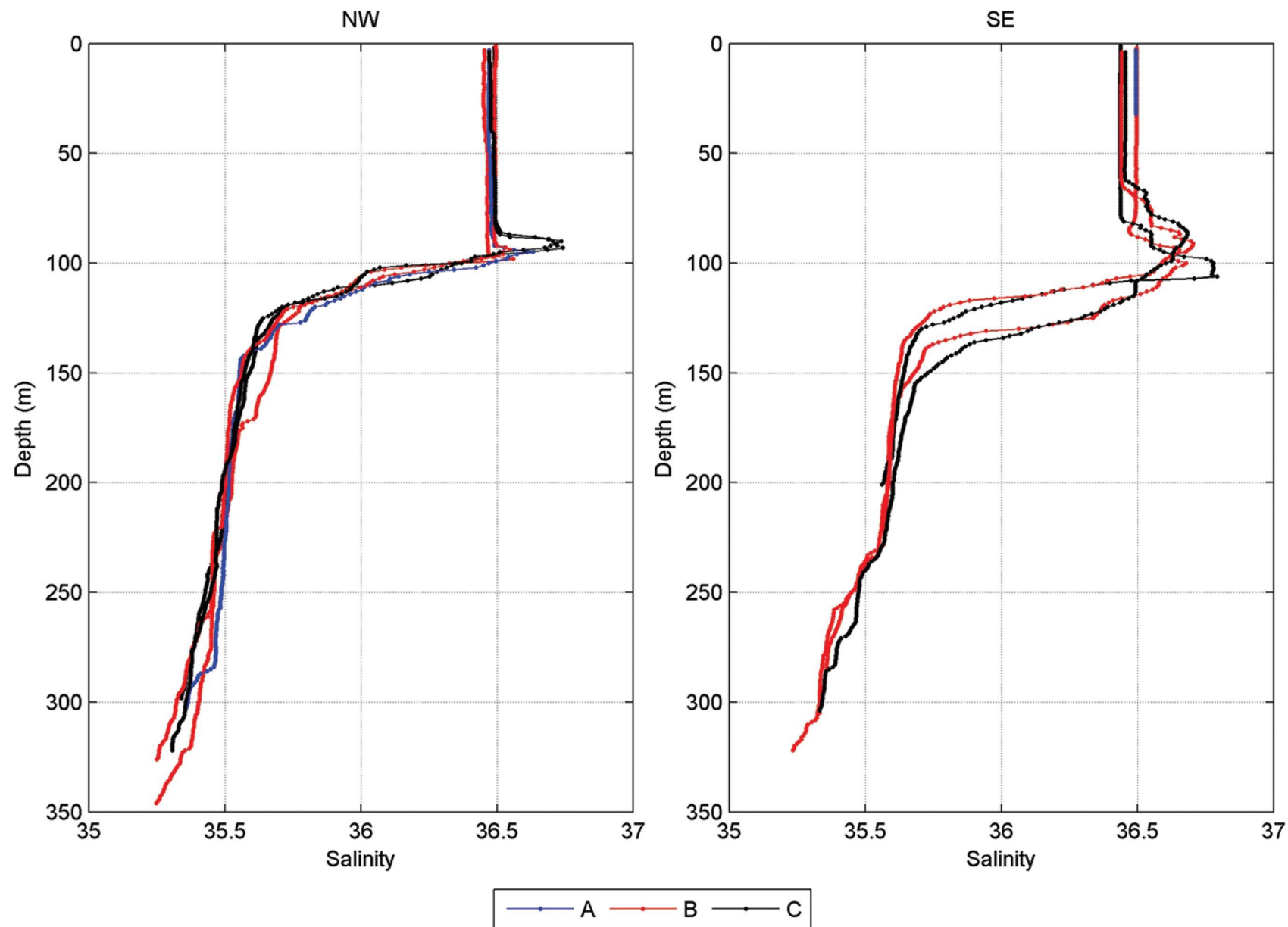


<http://www.ewoce.org>

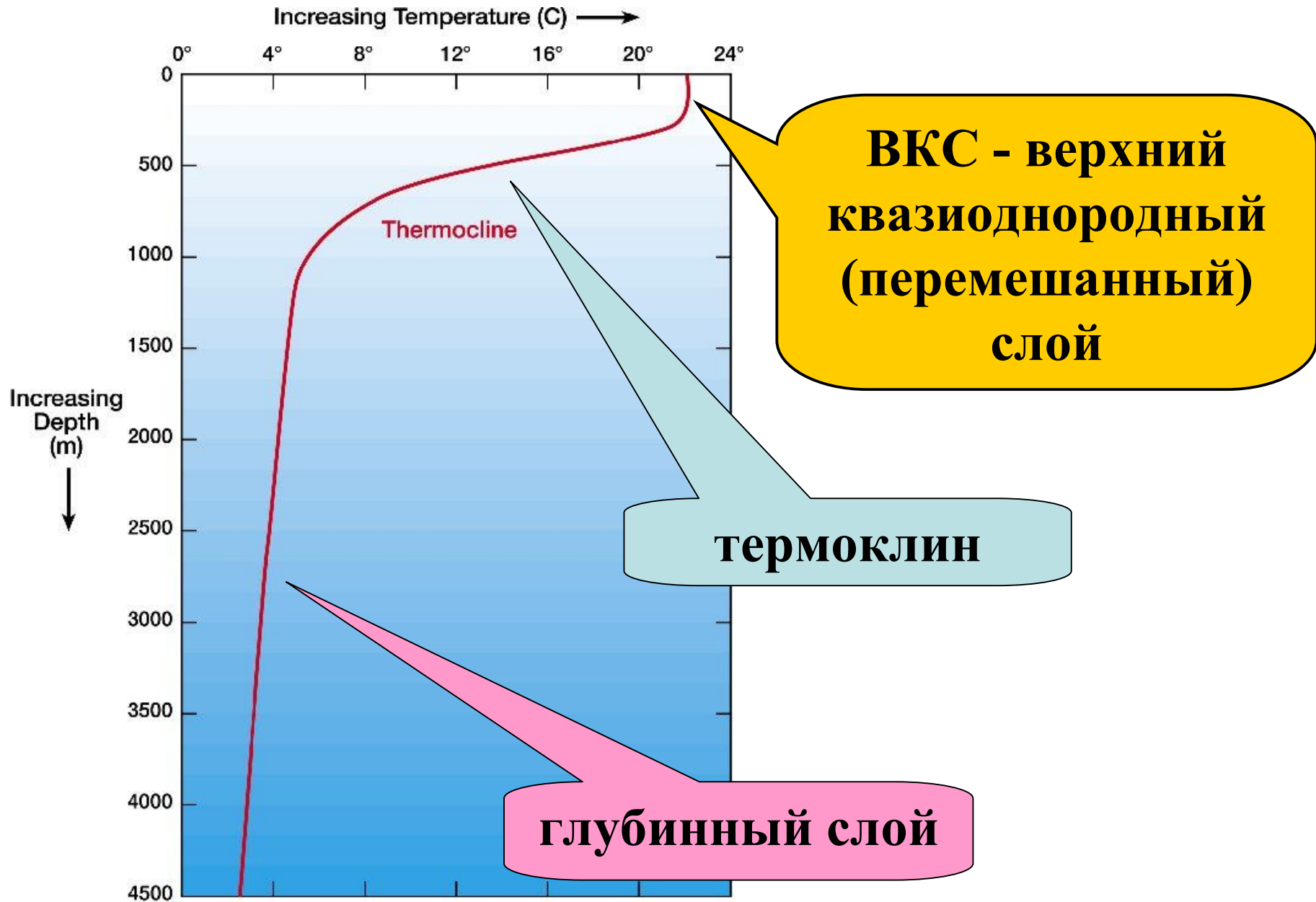
Вертикальный профиль температуры (примеры регистрации)



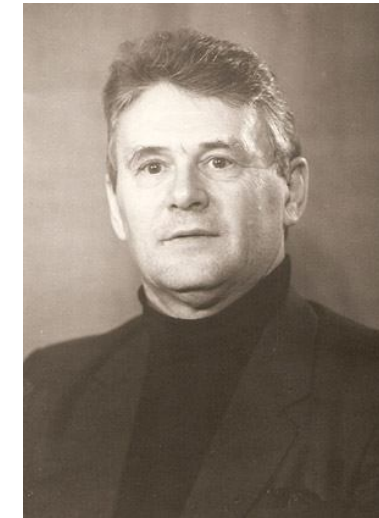
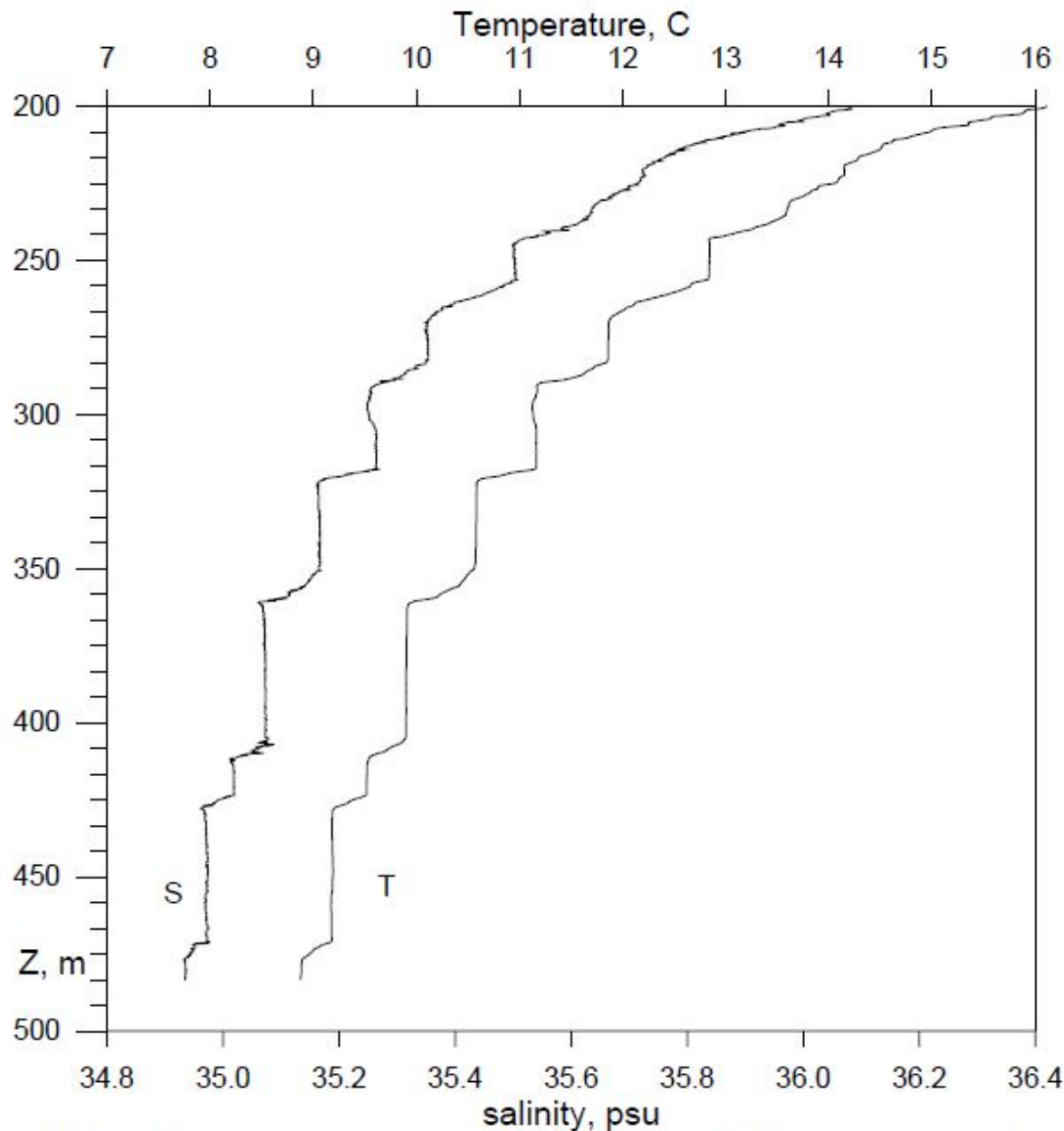
Вертикальный профиль солёности (примеры регистрации)



Типичный вертикальный профиль температуры в океане



Тонкая структура в океане

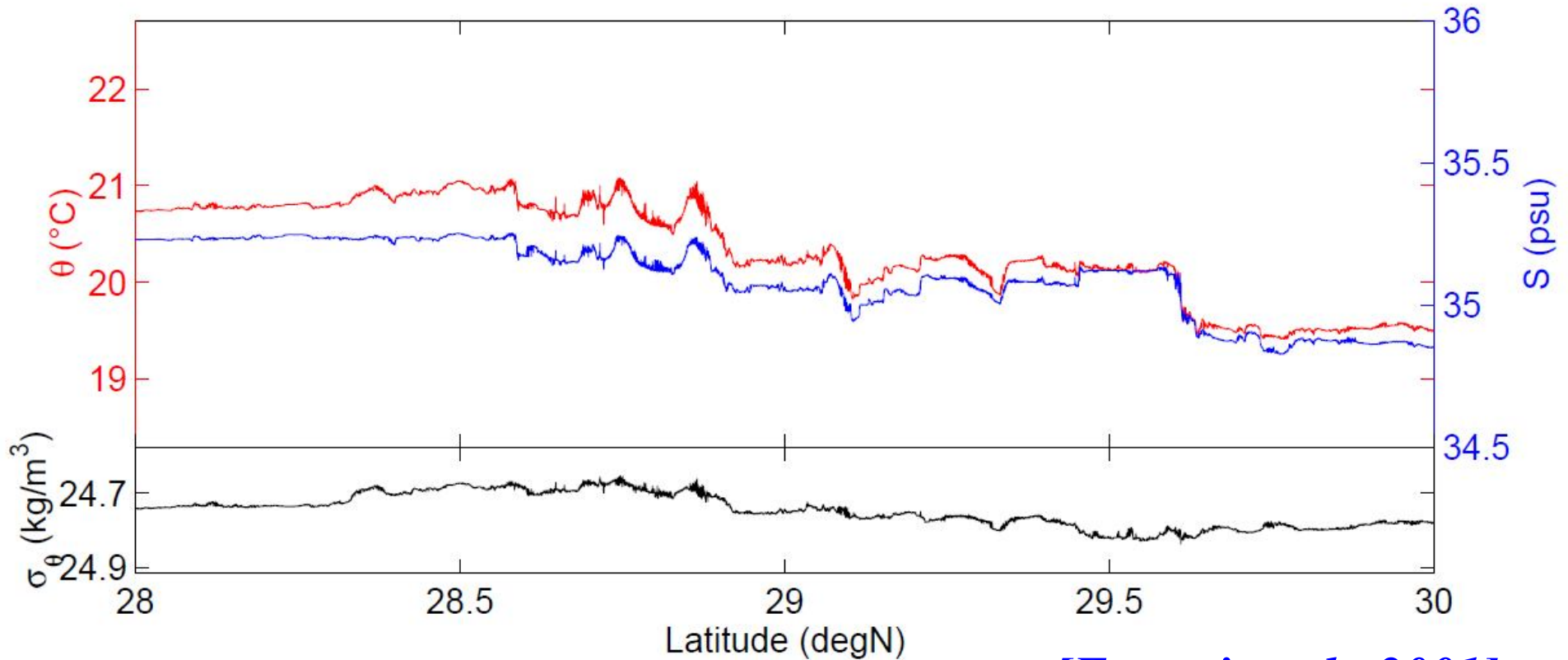


**Федоров Константин
Николаевич
(1927-1988)**

**Выдающийся
советский океанолог,
член-корр АН СССР**

Step-like finestructure in the Northwest Tropical Atlantic

Температура, соленость и плотность воды на глубине 50 м (при буксировке зонда вдоль 140°W, между 28° и 30° N)



[Ferrari et al., 2001]

$$\Delta\rho / \rho = -\alpha\Delta T + \beta\Delta S$$