

Геофизика



2026 Лекция №6

Носов Михаил Александрович

отделение геофизики, физический факультет МГУ

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

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 и снег Арктики и Антарктики, а также атмосферную воду и воду, содержащуюся в живых организмах.

Океан (Мировой океан) — непрерывная водная оболочка Земли, окружающая материки и острова и обладающая общностью солевого состава.

Ингредиенты Солнечной системы

<i>Металлы</i>	<i>T конденсации</i>	
Fe, Ni, Al	1600 K	0.2%
<i>минералы на основе кремния</i>		
силикаты	500-1300 K	0.4%
<i>льды: метан, аммиак, вода</i>		
CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O	~150 K	1.4%
<i>легкие газы</i>		
H, He	-	98%

Ингредиенты Солнечной системы

металлы

и

силикаты

0.6%

легкие газы

и

льды

99.4%

Масса гидросферы и атмосферы

Масса Земли

$\approx 0.025\%$

Общая масса воды в гидросфере **$1.46 \cdot 10^{21}$ кг**

Масса Земли **$5.98 \cdot 10^{24}$ кг**

Масса атмосферы (сухого воздуха) **$5.14 \cdot 10^{18}$ кг**

Гипотезы о происхождении атмосферы и гидросферы Земли

- ~~1. захвачены из протопланетного облака в процессе аккреции;~~
2. 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 появился 1.5 млрд. лет назад как результат фотосинтеза);
3. сформировались в результате интенсивной бомбардировки кометами и астероидами из внешних областей Солнечной системы.

**Условия
существования
атмосферы и
гидросферы**

Условие существования атмосферы

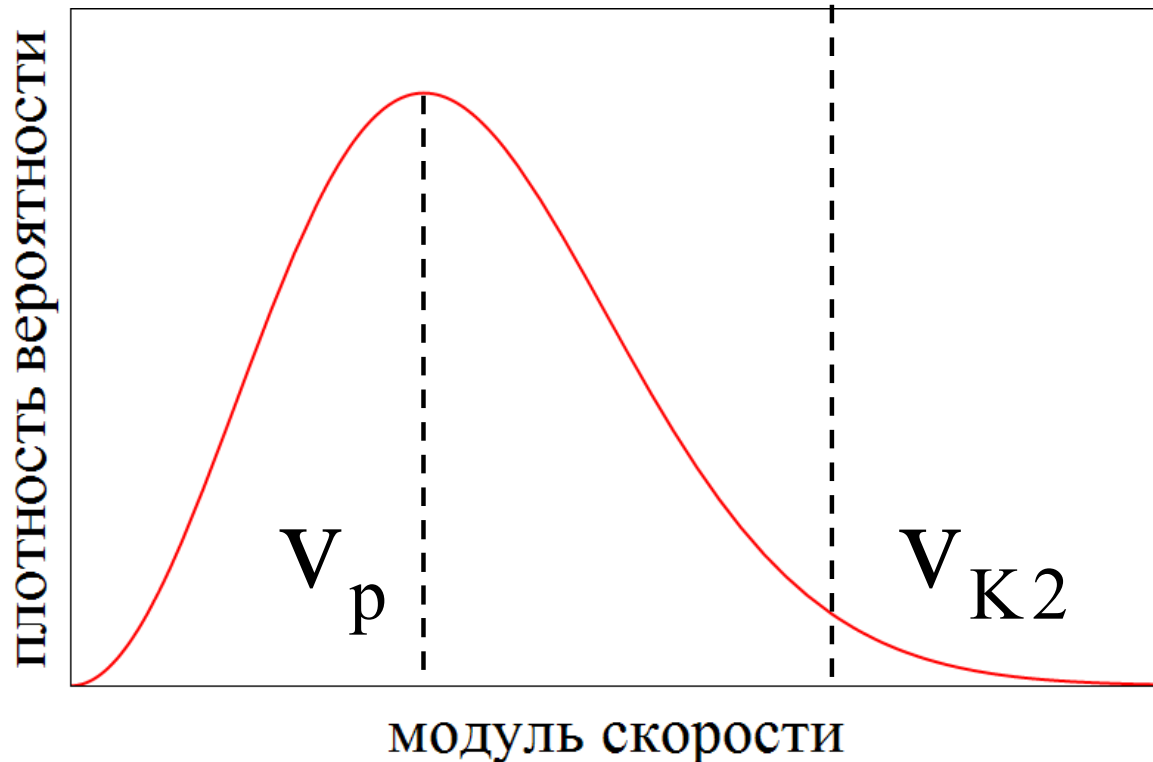
скорость тепл. движения < 2-й косм. скорости ?

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

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

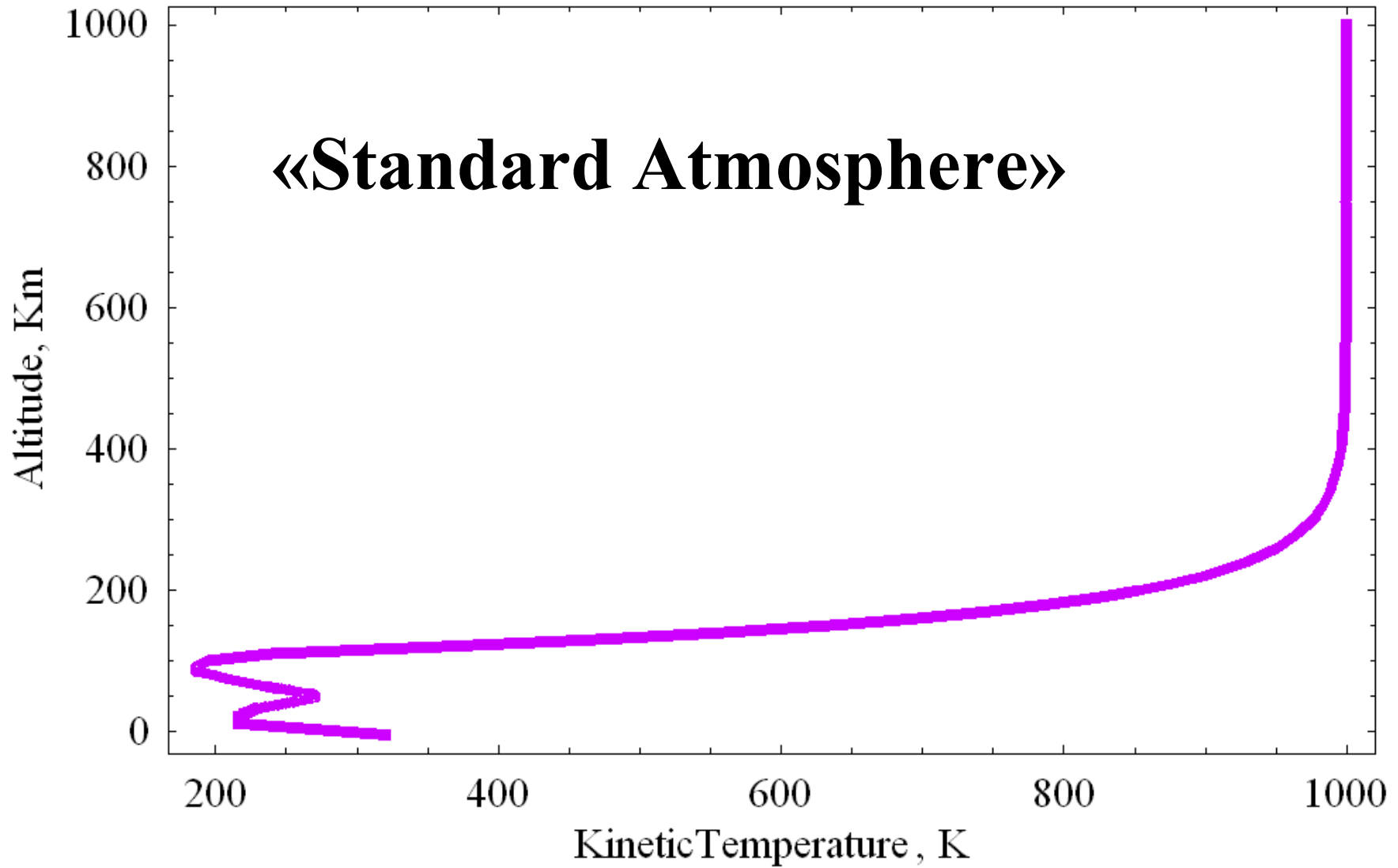
$$v_p < v_{K2}$$

условие не обеспечивает отсутствие диссипации

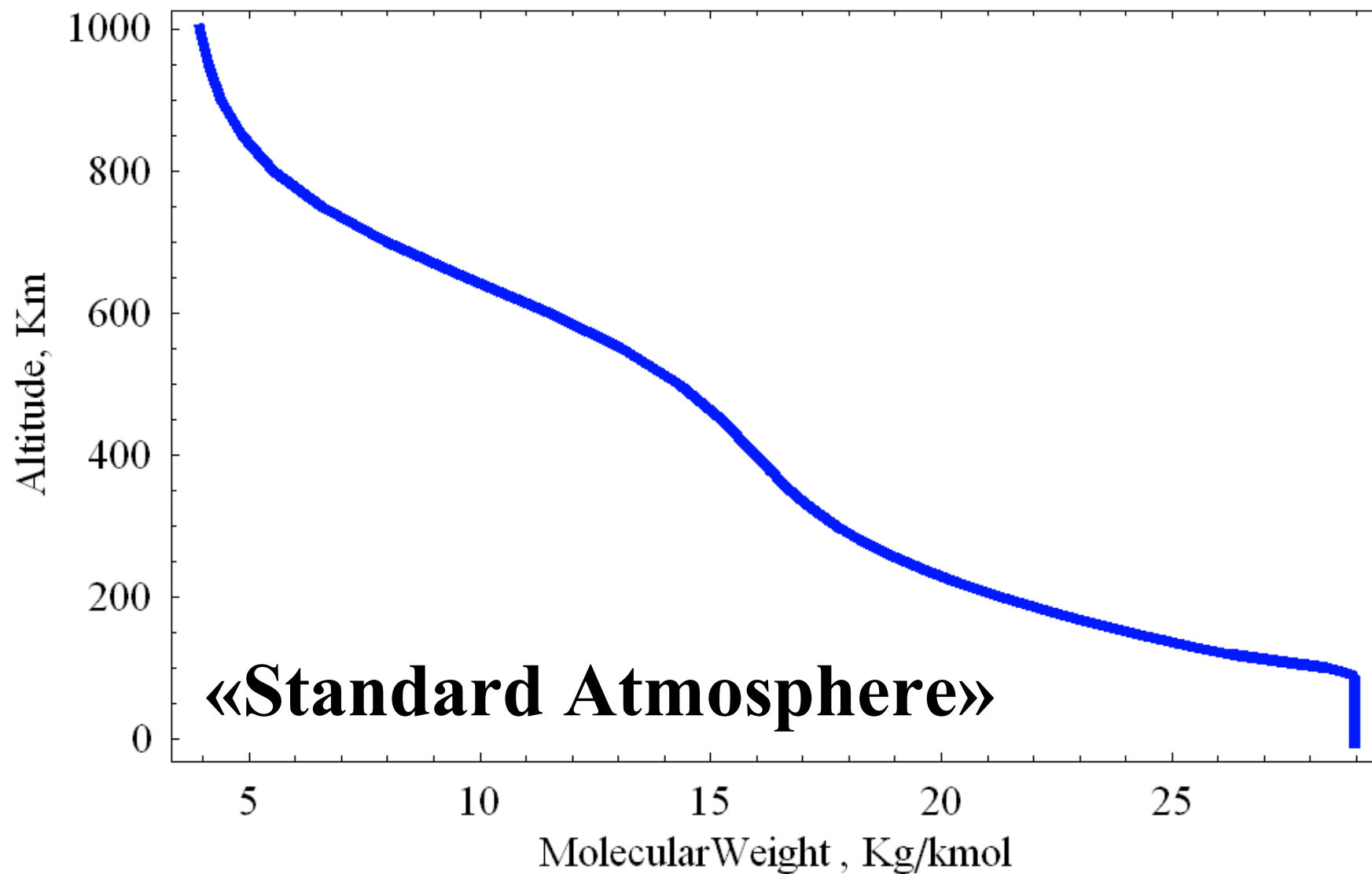
при $T = 300 \text{ K}$

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

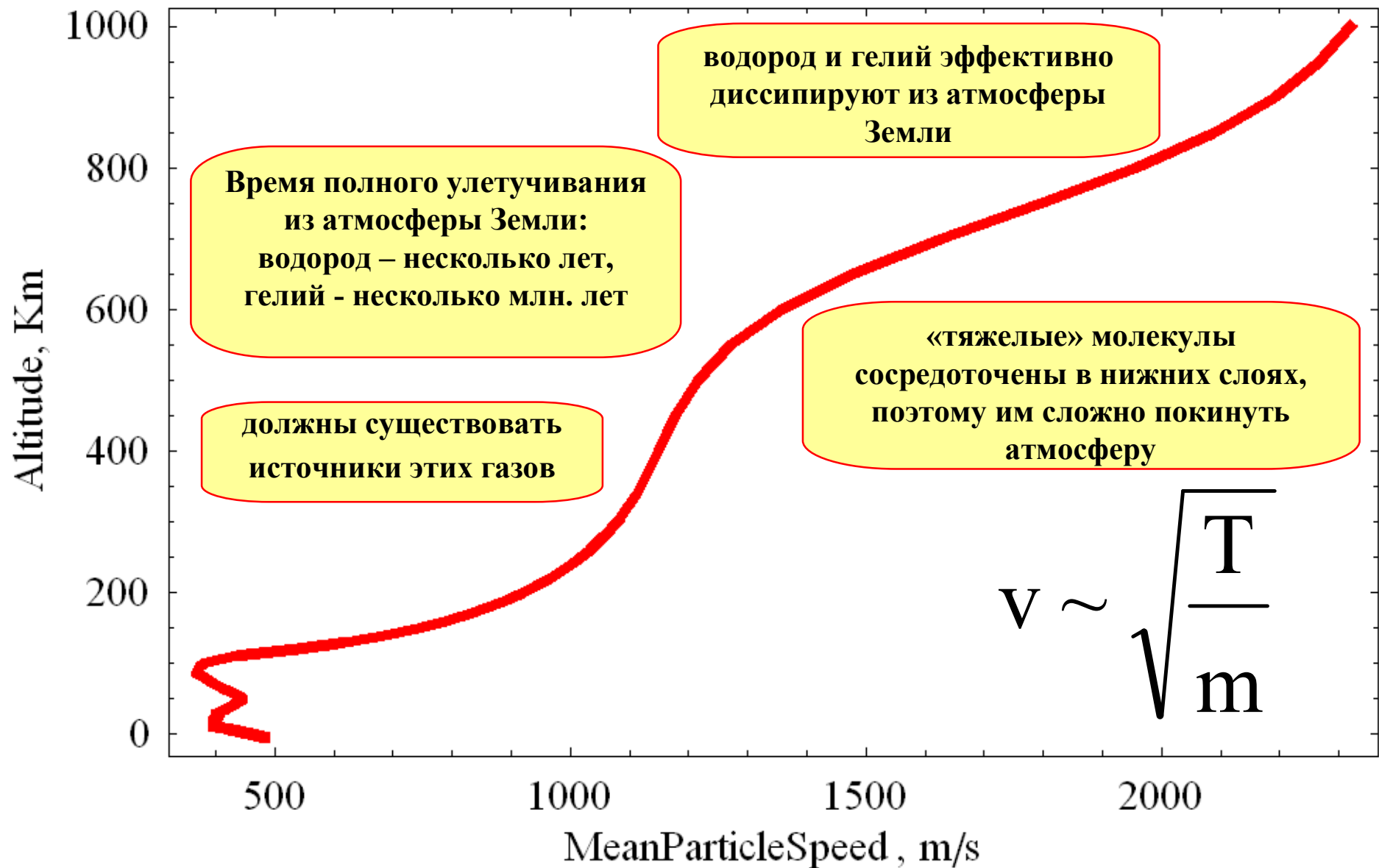
Зависимость температуры воздуха от высоты



Зависимость среднего молекулярного веса от высоты



Зависимость средней скорости от высоты



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 поверхн. натяжение

Фазовая диаграмма воды

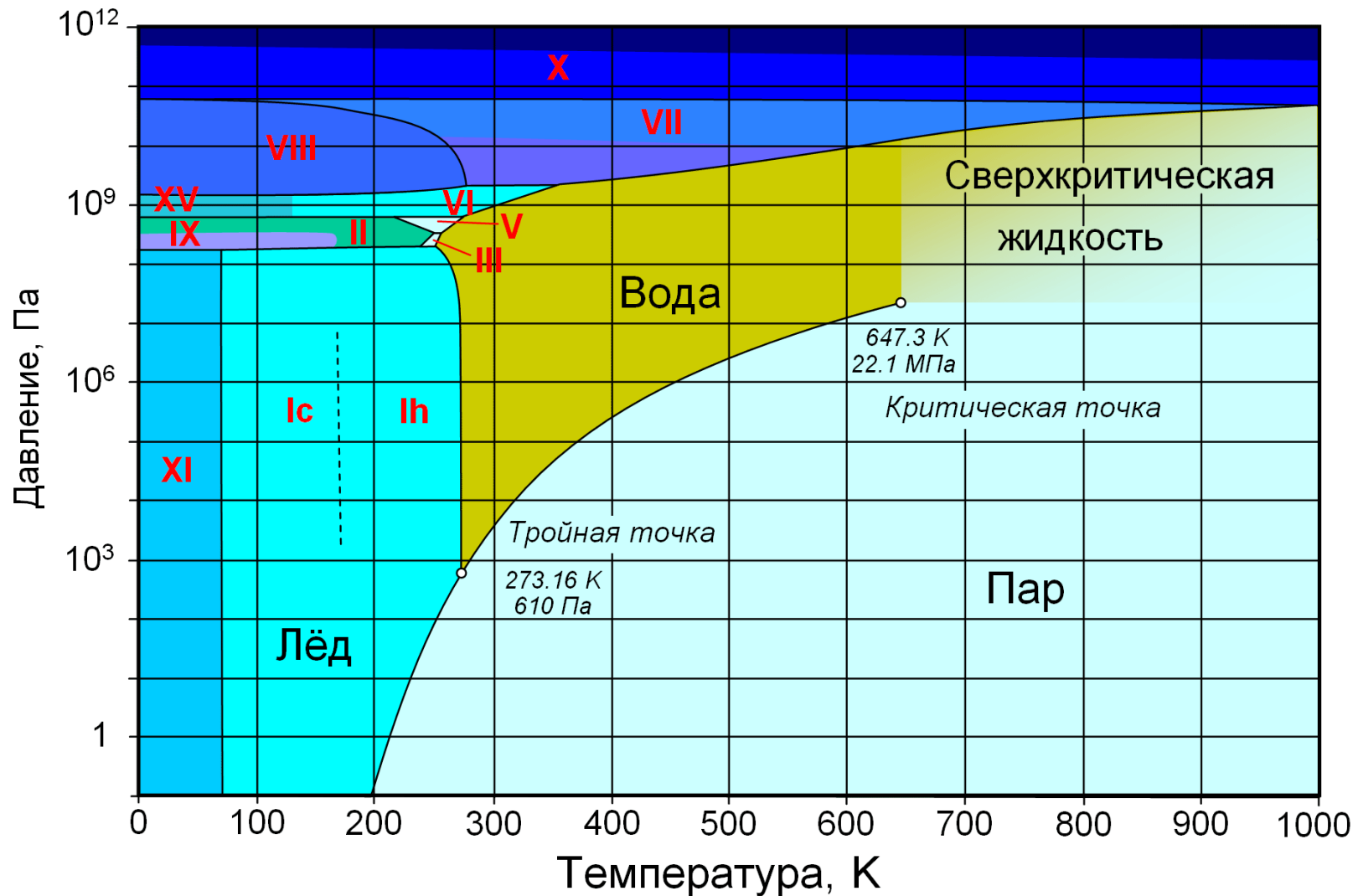
$$p_b = \rho g H_{\max}$$

$$p_b \sim 10^8 \text{ Па}$$

$$T_{\min} \approx -90^\circ\text{C} (\approx 183 \text{ K})$$

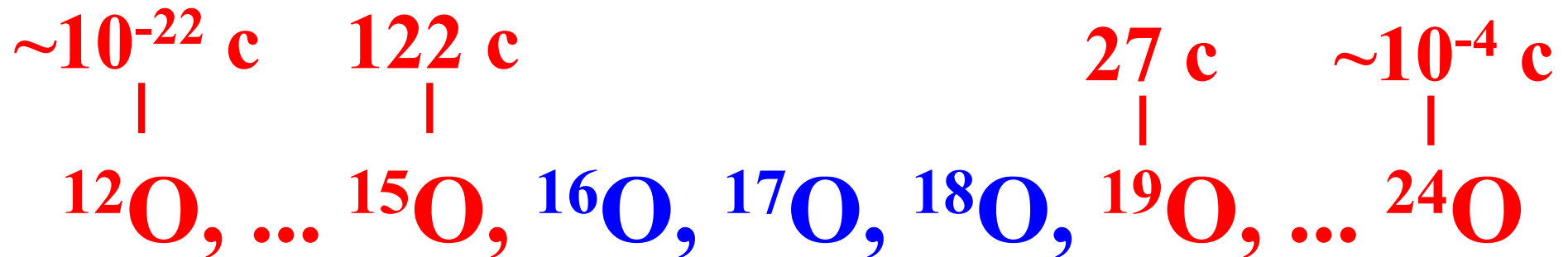
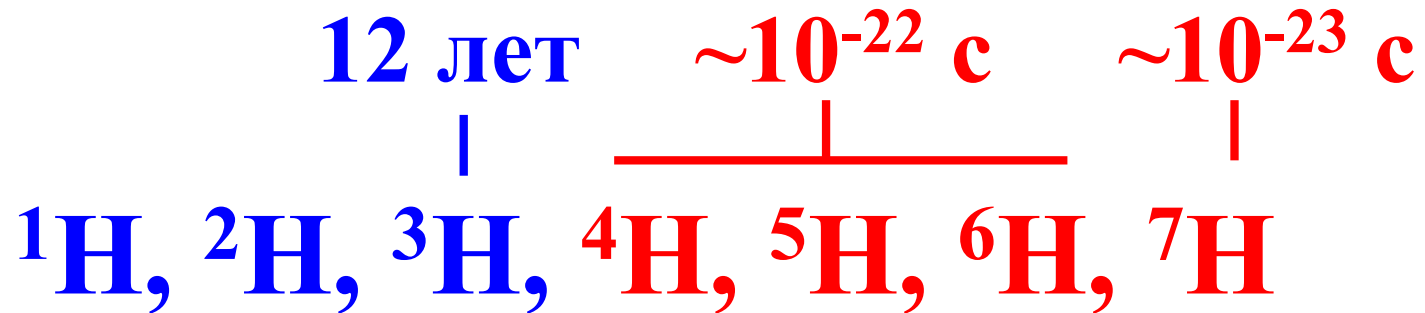
$$H_{\max} \approx 11 \text{ км}$$

$$T_{\max} \approx 400^\circ\text{C} (\approx 673 \text{ K})$$



Состав гидросферы Земли

Известны следующие изотопы водорода и кислорода:



стабильны (существуют в природе)

нестабильны (малый период полураспада)

Виды молекул воды, встречающиеся в природе

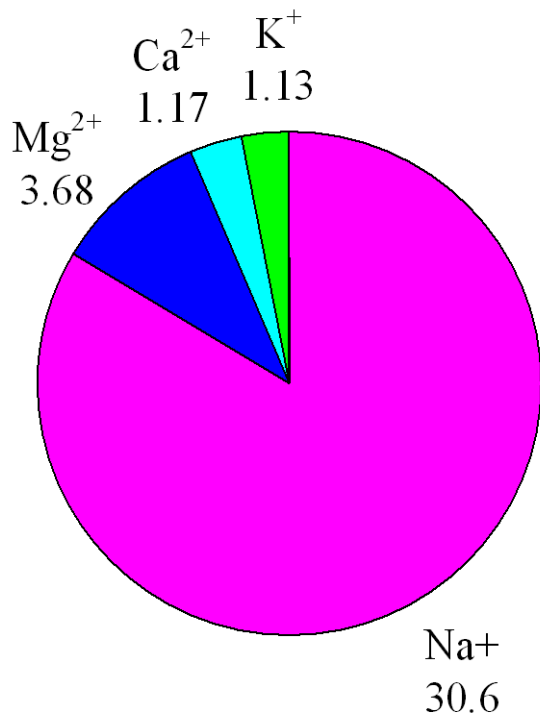
Молекулы воды	% содержание	название
${}^1\text{H}_2{}^{16}\text{O}$	99.73	протиевая (легкая) вода
${}^1\text{H}_2{}^{18}\text{O}$	0.20	
${}^1\text{H}_2{}^{17}\text{O}$	0.04	
${}^1\text{H}{}^2\text{H}{}^{16}\text{O}$	0.02	дейтерий-протиевая вода
${}^1\text{H}{}^2\text{H}{}^{18}\text{O}$	0.00006	
${}^1\text{H}{}^2\text{H}{}^{17}\text{O}$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

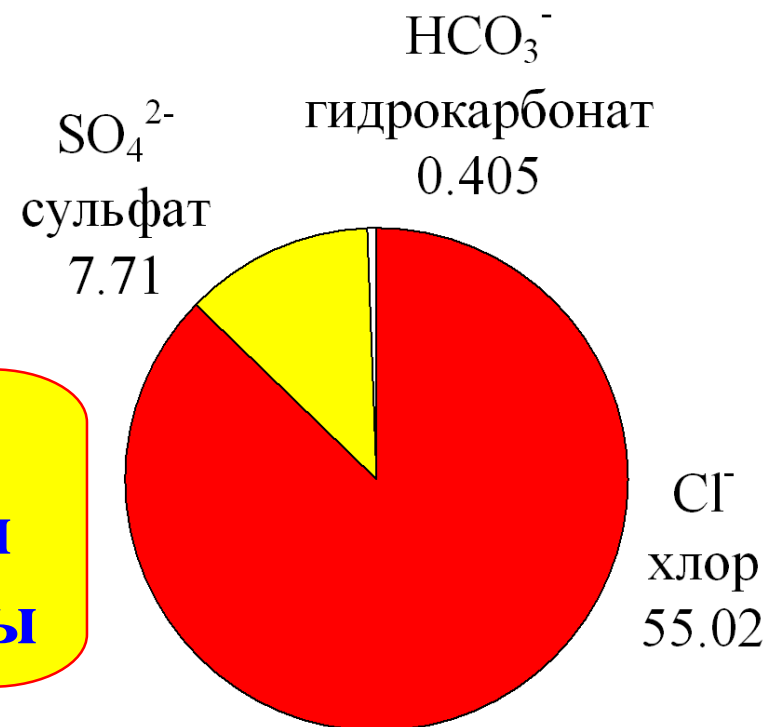
Соленость морской воды

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

PSU (Practical Salinity Unit)



**все прочие
компоненты
≈ 0.3% массы**



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)

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**

Элементы

геофизической

гидродинамики

**Геофизическая гидродинамика –
динамика бароклинной жидкости (газа)
в поле силы тяжести на неравномерно
прогретой, вращающейся сфере (геоиде)**

Классическая гидродинамика

**бароклинная
жидкость**

$$\rho = \rho(p, T, \dots)$$

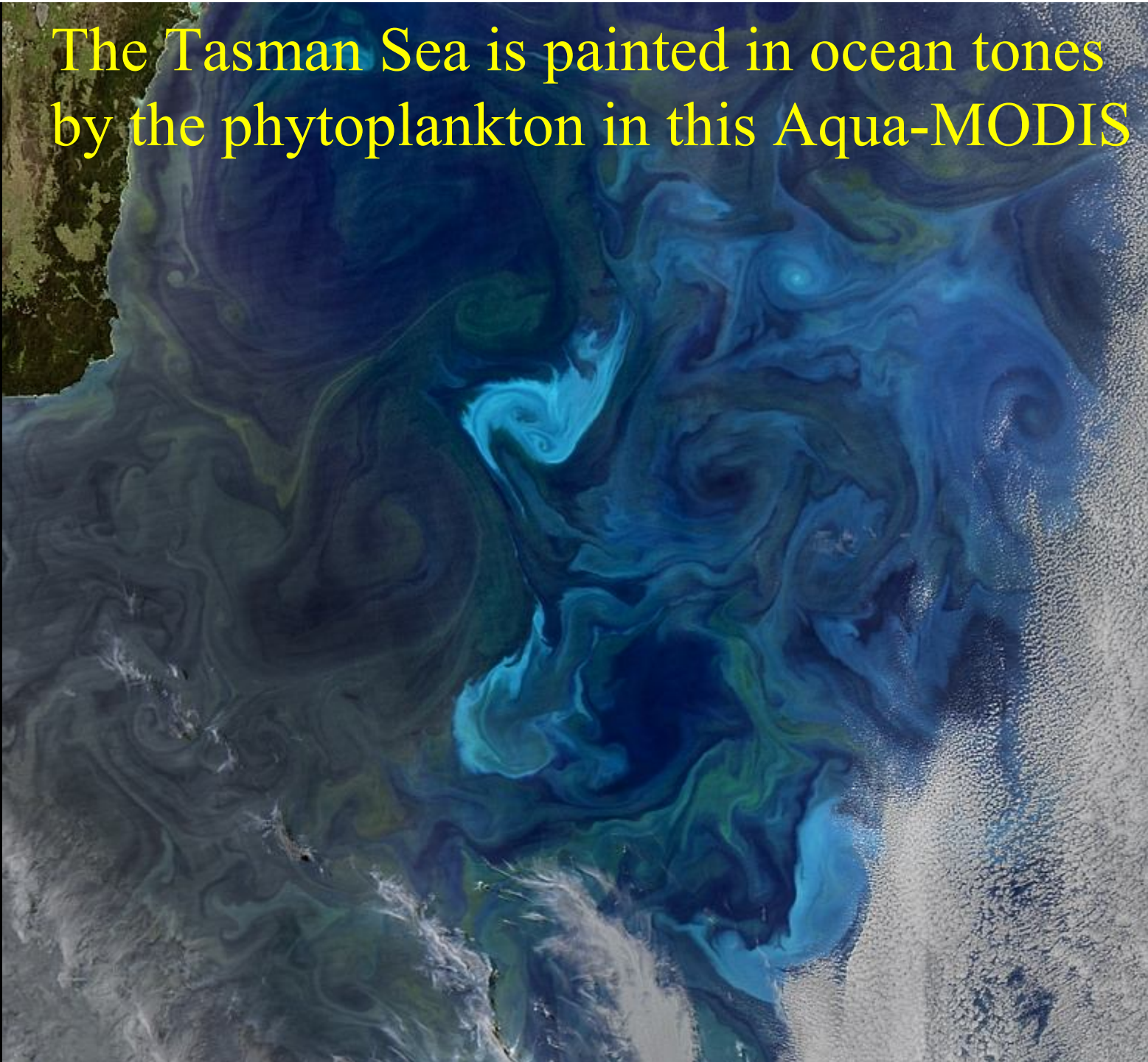
**баротропная
жидкость**

$$\rho = \rho(p)$$

Phytoplankton blooms observed by the Aqua MODIS and Landsat 8 OLI satellites on July 23, 2018. (Image credit: NASA)



The Tasman Sea is painted in ocean tones by the phytoplankton in this Aqua-MODIS





Гаспар-Гюстав Кориолис
французский математик, механик
1792-1843

$$\mathbf{F}_{\text{Кор}} = 2m[\vec{v} \times \vec{\omega}]$$

**Геофизическая гидродинамика –
динамика бароклинной жидкости (газа)
в поле силы тяжести на неравномерно
прогретой, вращающейся сфере (геоиде)**

Большинство крупномасштабных течений атмосферы и гидросферы происходят в условиях баланса сил:

по вертикали:

гидростатический баланс

сила градиента давления = сила тяжести

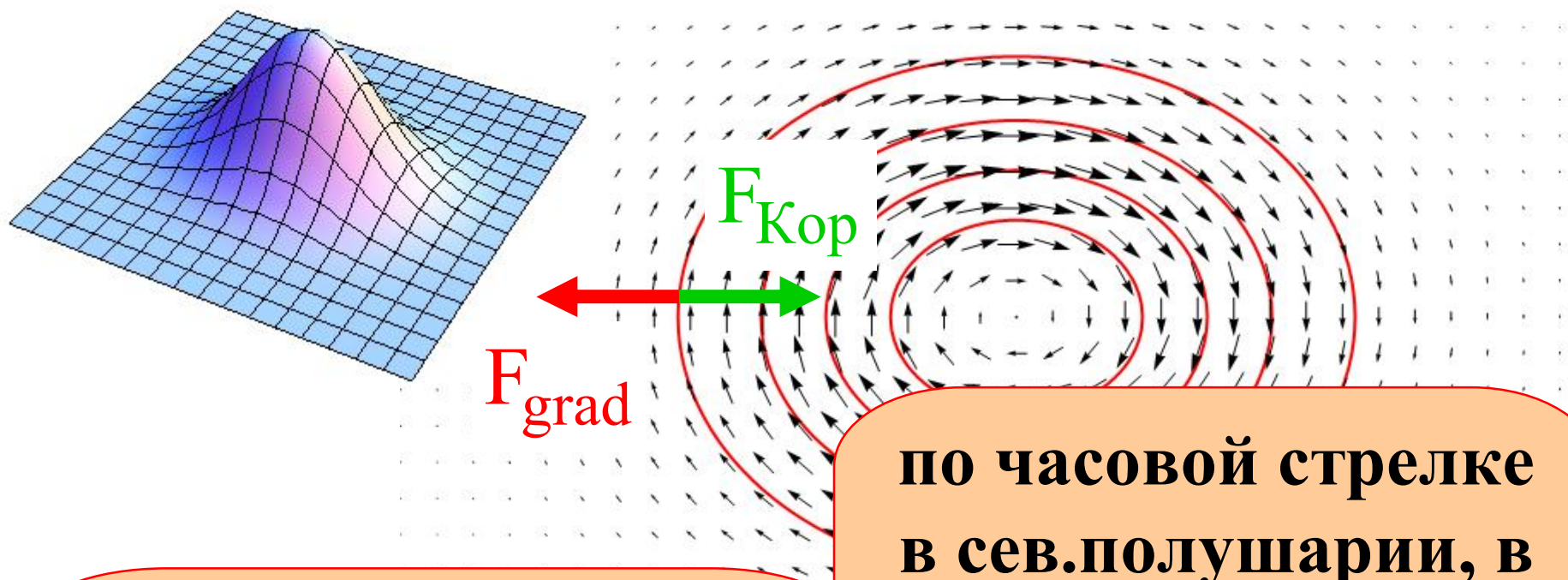
по горизонтали:

геострофический баланс

сила градиента давления = сила Кориолиса

strophe (греч.) – вращение, поворот

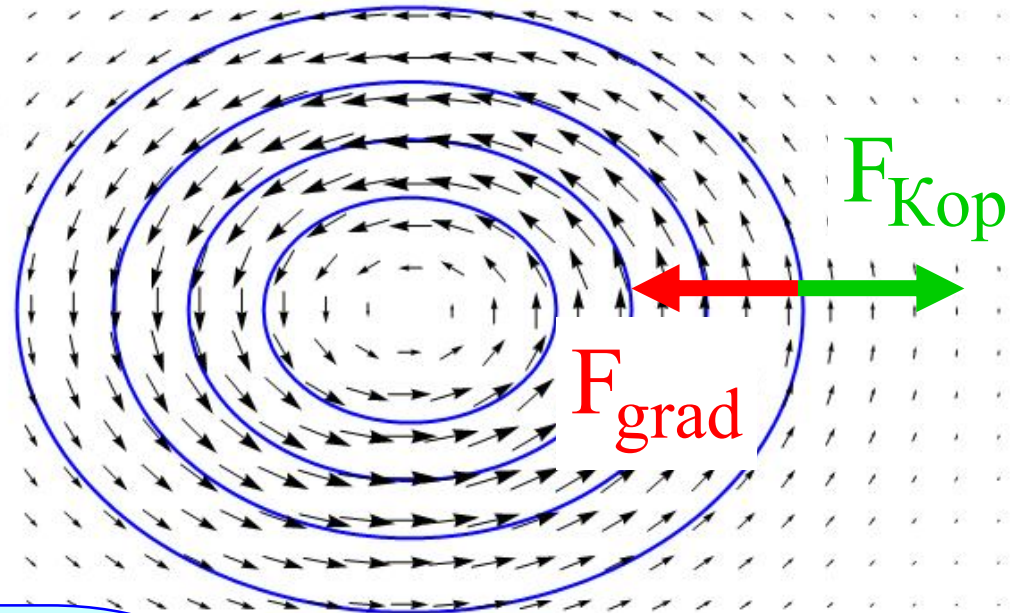
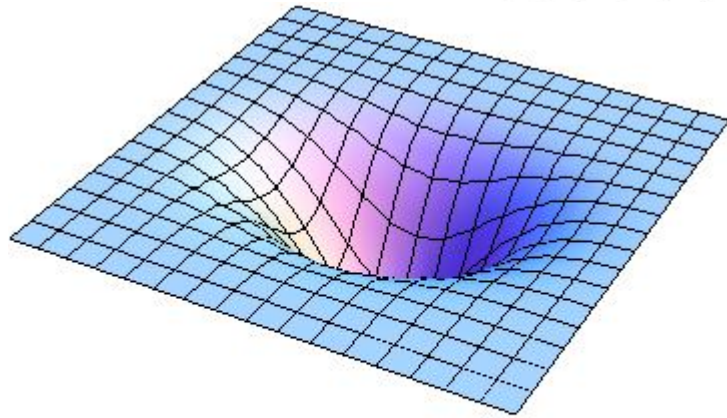
Геострофическое течение вблизи области **поднятия** уровня (Сев.полушарие)



**антициклонический
геострофический
вихрь**

**по часовой стрелке
в сев.полушарии, в
южном полушании
– в обратном
направлении**

Геострофическое течение вблизи области **понижения** уровня (Сев.полушарие)



**циклонический
геострофический
вихрь**

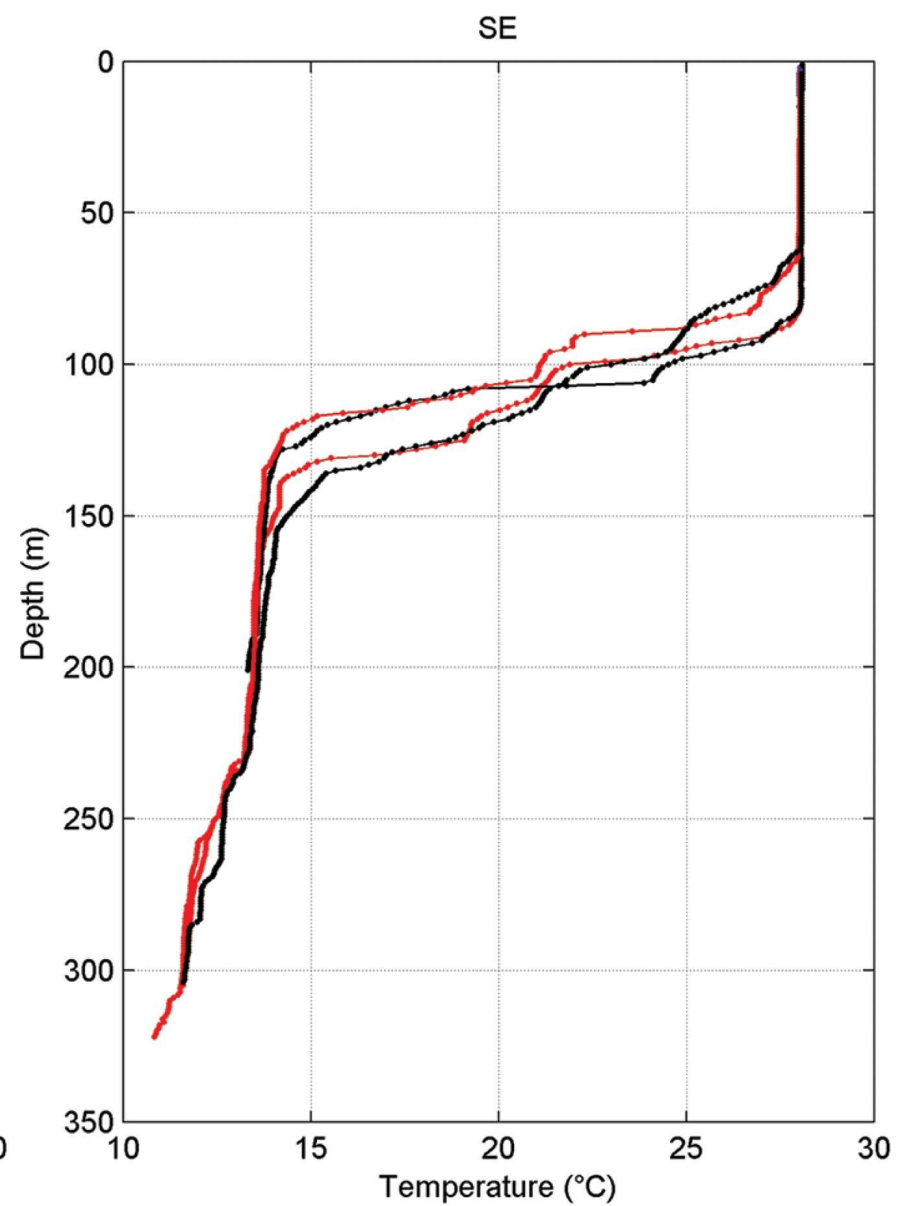
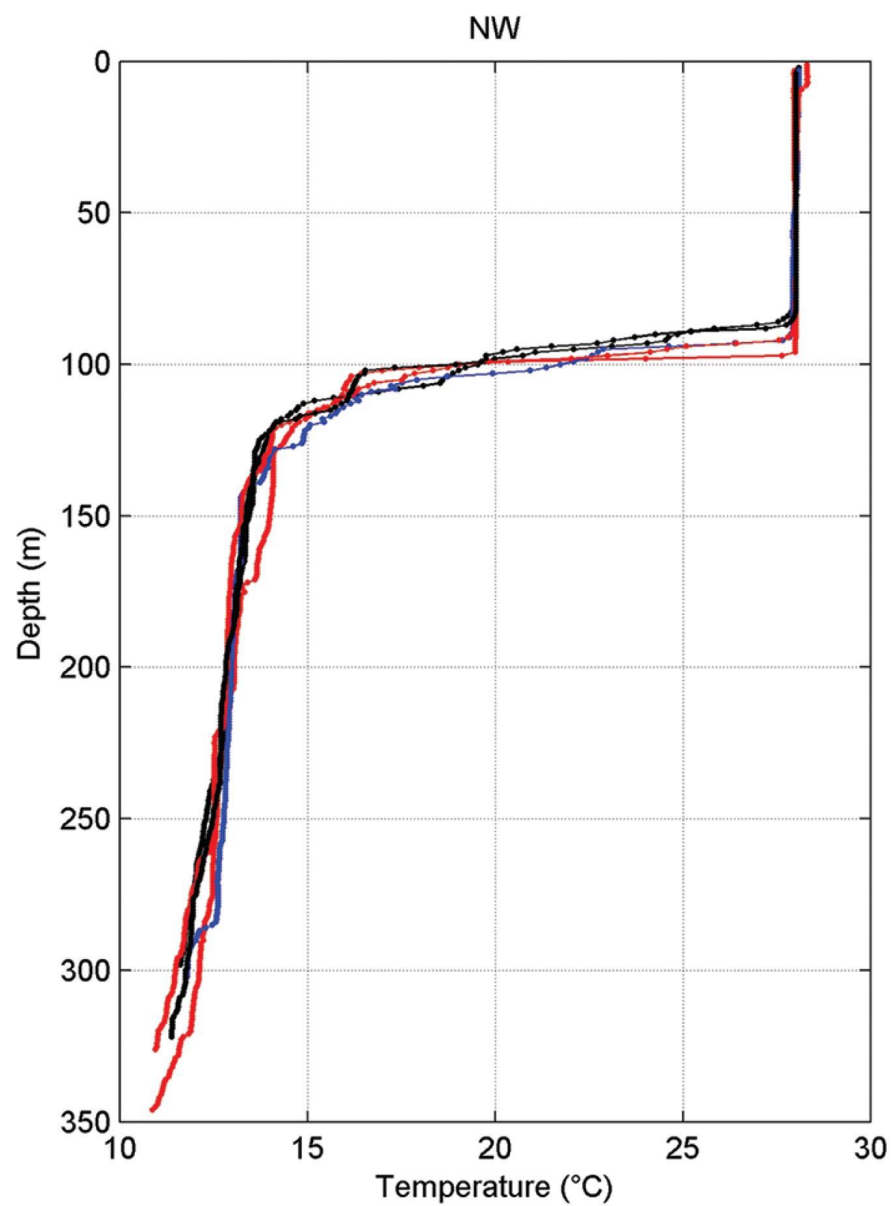
Устойчивость стратификации* и адиабатический градиент

***Стратификация –**

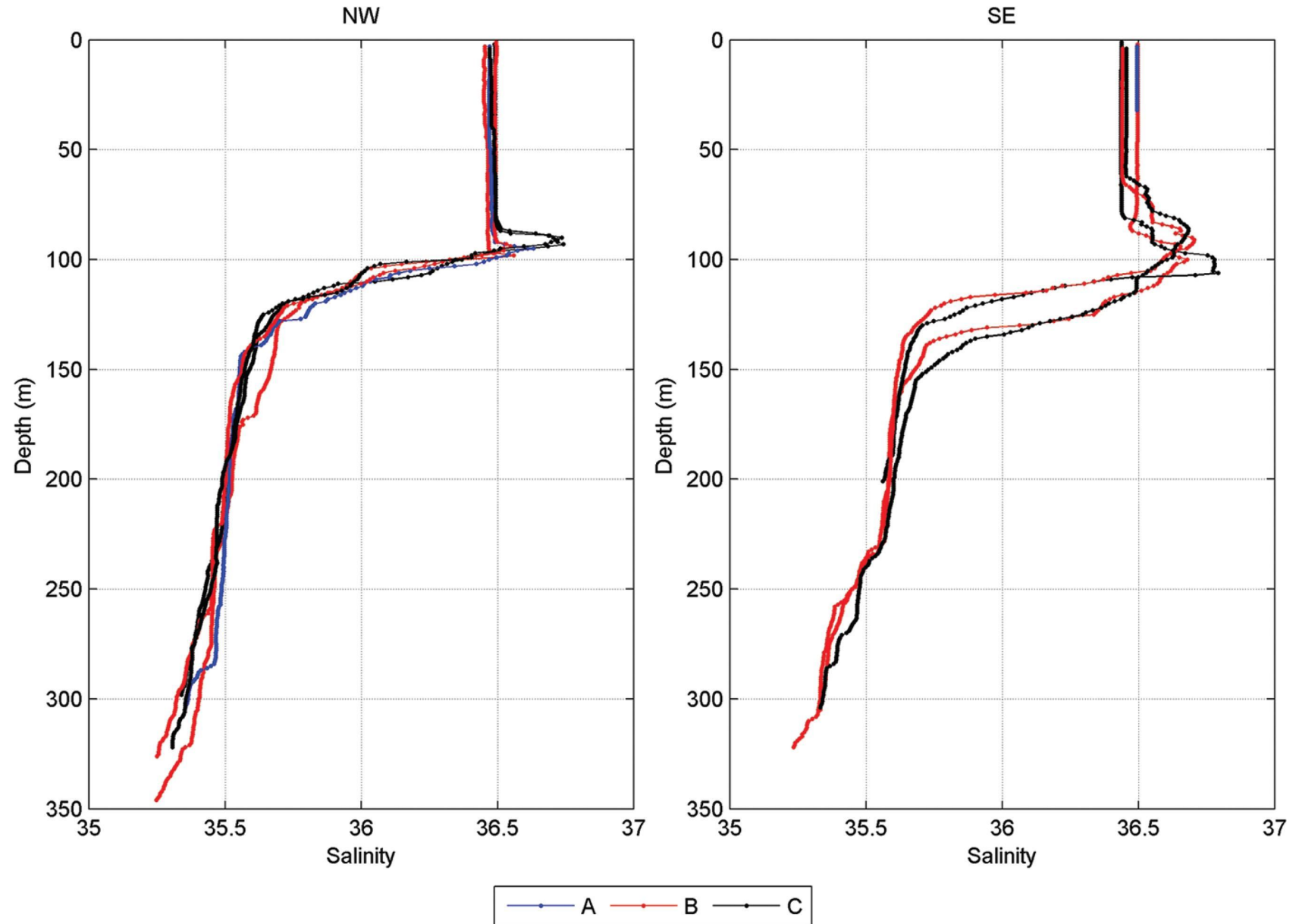
(лат. *stratum* настил слой+ *facere* делать)

распределение по вертикали слоев воды или воздуха с различной плотностью, температурой, соленостью, etc.

Вертикальный профиль температуры в океане (примеры регистрации)

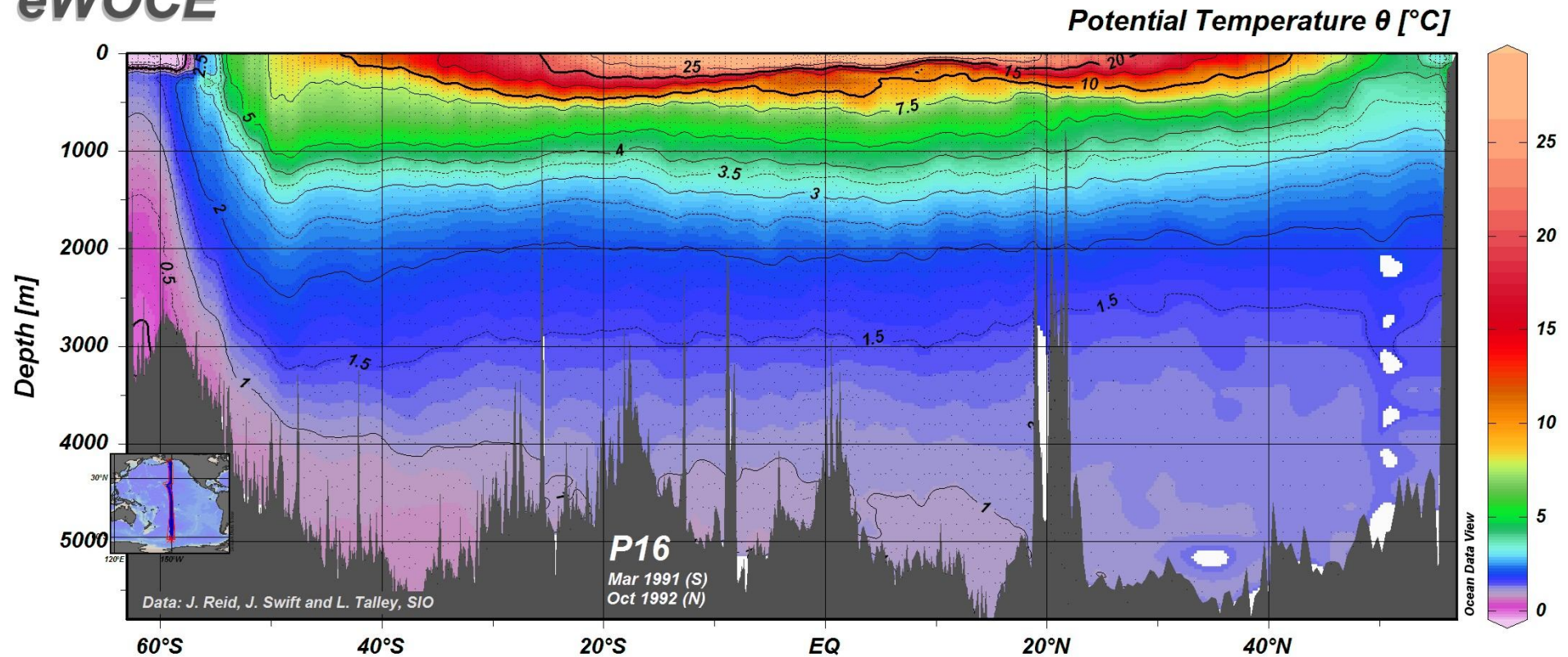


Вертикальный профиль солёности (примеры регистрации)



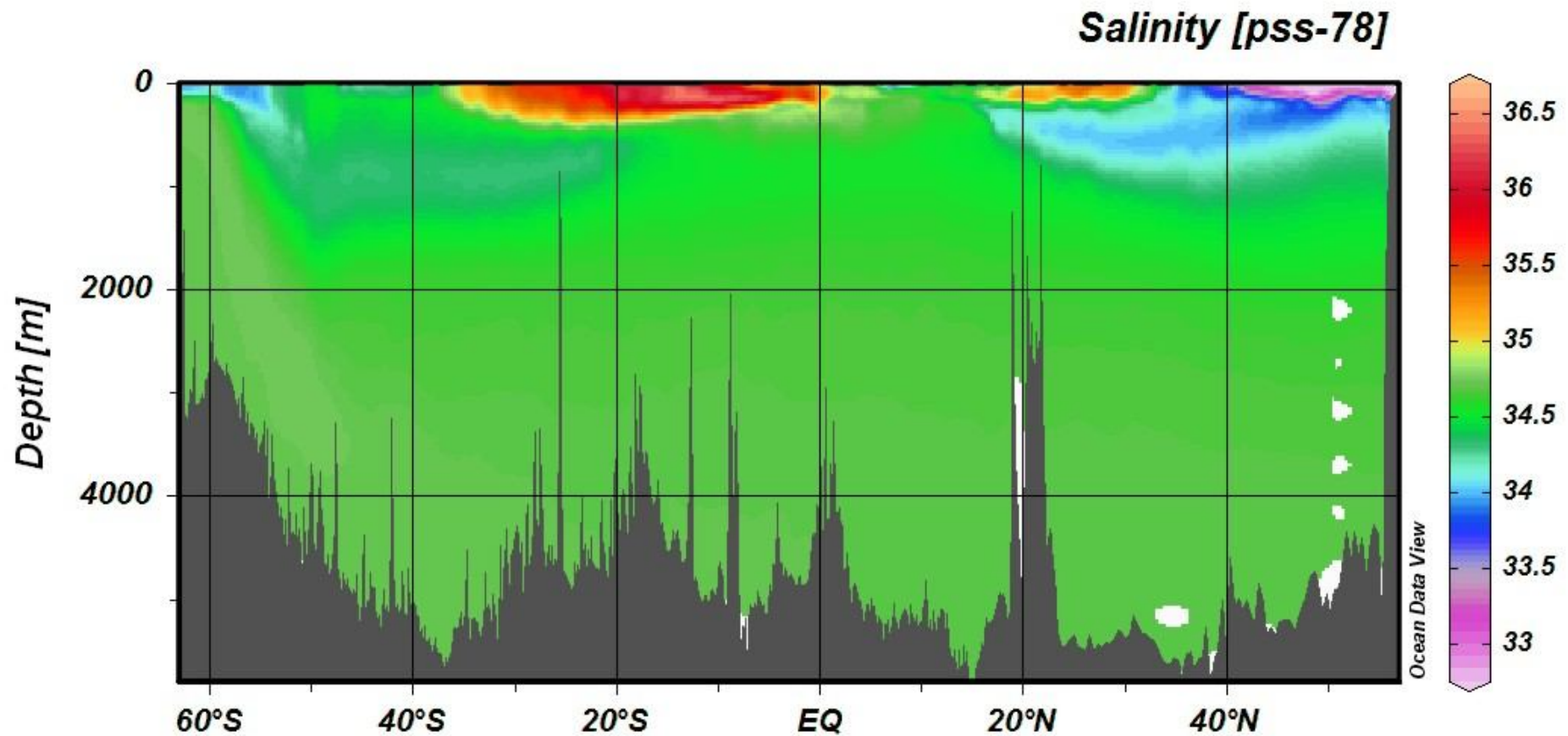
Вертикальный разрез (температура)

eWOCE



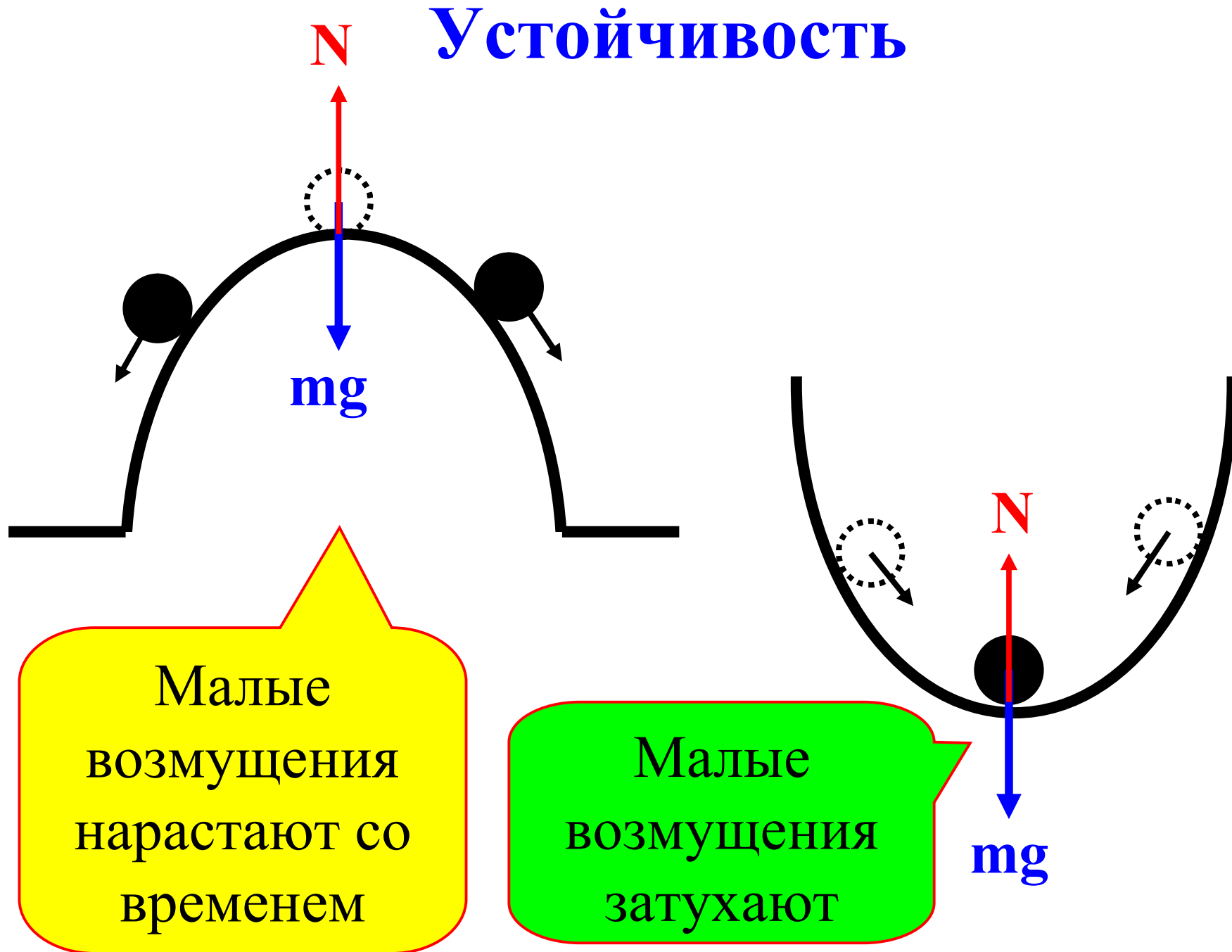
<http://www.ewoce.org>

Вертикальный разрез (соленость)



<http://www.ewoce.org>

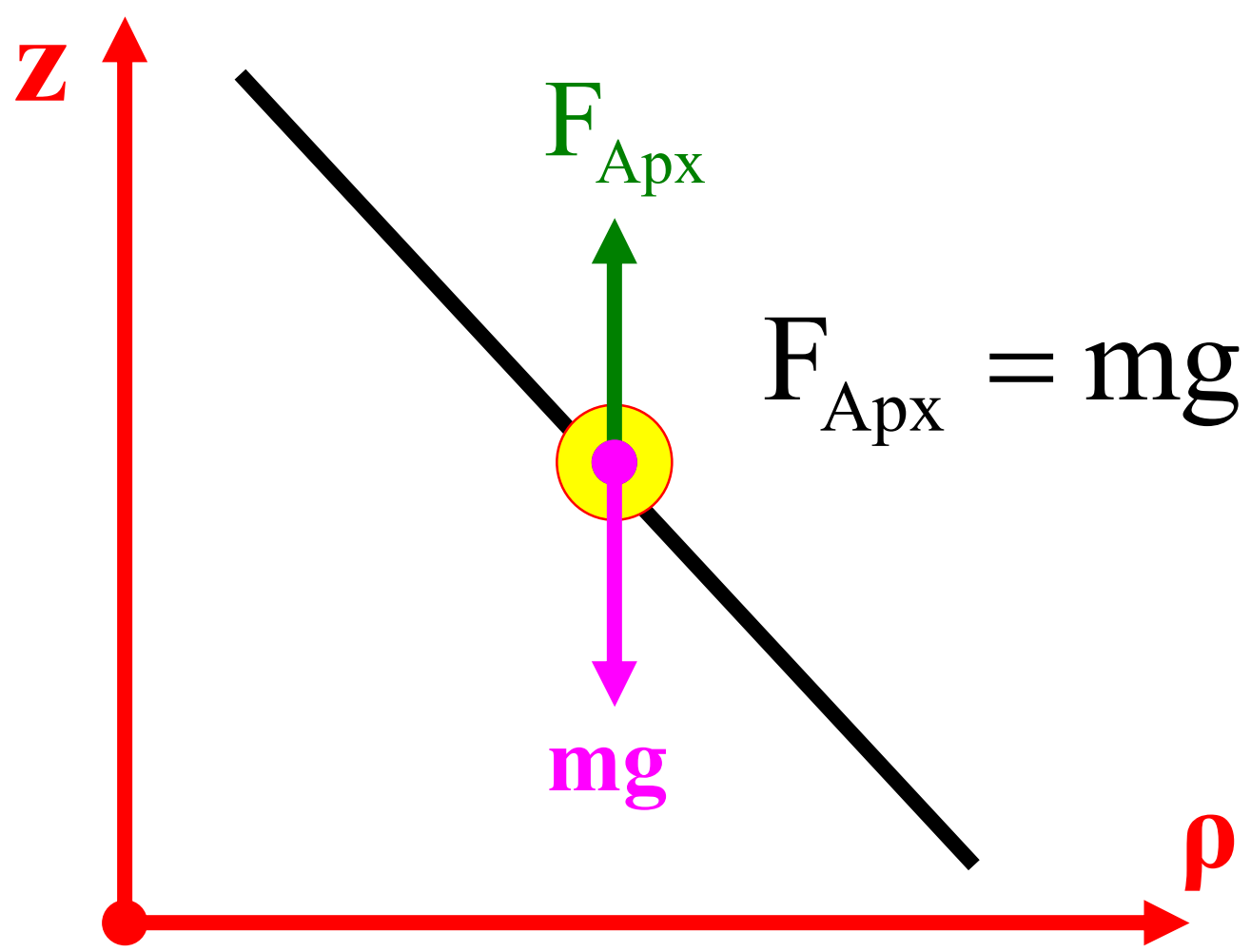
Устойчивость

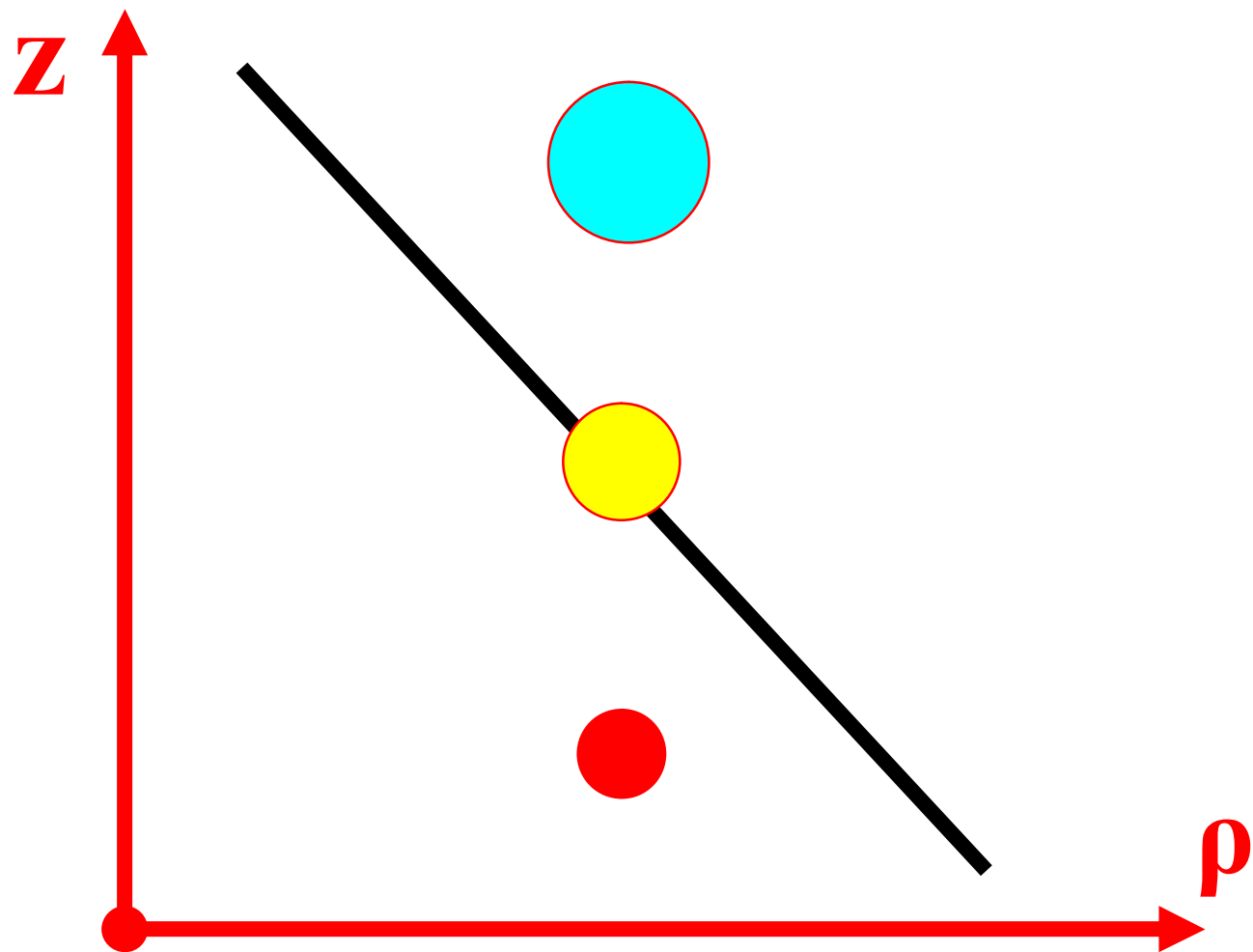


Малые
возмущения
нарастают со
временем

Малые
возмущения
затухают

ω





Уравнение движения частицы по вертикали в стратифицированной среде

$$F_{\Sigma} = F_{\text{Арх}} - mg = Vg(\rho_{\text{среды}} - \rho_{\text{частицы}})$$

$$\rho_{\text{среды}} = \rho_0 + \frac{d\rho}{dz} z$$

$$\rho_{\text{частицы}} = \rho_0 + \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s z$$

фактический градиент

адиабатический градиент

$$m \ddot{z} = Vg \left(\frac{d\rho}{dz} - \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s \right) z$$

$\rho V =$

$$\ddot{z} - \frac{g}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} - \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s \right) z = 0$$

уравнение колебаний

$$\ddot{z} - \frac{g}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} - \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s \right) z = 0 \quad \Rightarrow \quad \ddot{z} + N^2 z = 0$$

частота Вейселя-Брента

в океане / атмосфере

$$N \sim 10^{-4} - 10^{-1} \text{ Гц}$$

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} - \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s \right)}$$

адиабатический градиент

$$\left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s = \left(\frac{d\rho(p(z))}{dz} \right)_s = \left(\frac{d\rho}{dp} \right)_s \frac{dp}{dz} = -\frac{\rho g}{c^2}$$

$$\left(\frac{d\rho}{dp} \right)_s = \frac{1}{c^2}$$

**скорость
звука**

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

**закон
гидро-
статики**

$$\ddot{z} + N^2 z = 0 \quad N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} - \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s \right)}$$

N – действительная величина

$$z(t) = A \cdot \sin(N \cdot t) + B \cdot \cos(N \cdot t)$$

$$\frac{d\rho}{dz} - \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s < 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\rho}{dz} < \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

**Устойчивая
стратификация**

N – мнимая величина

$$z(t) = A \cdot \exp(|N| \cdot t) + B \cdot \exp(-|N| \cdot t)$$

$$\frac{d\rho}{dz} > \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

**Неустойчивая
стратификация**

Критерий устойчивости стратификации:

**соотношение фактического и
адиабатического градиентов плотности**

$$\frac{d\rho}{dz} < \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

**Устойчивая
стратификация**

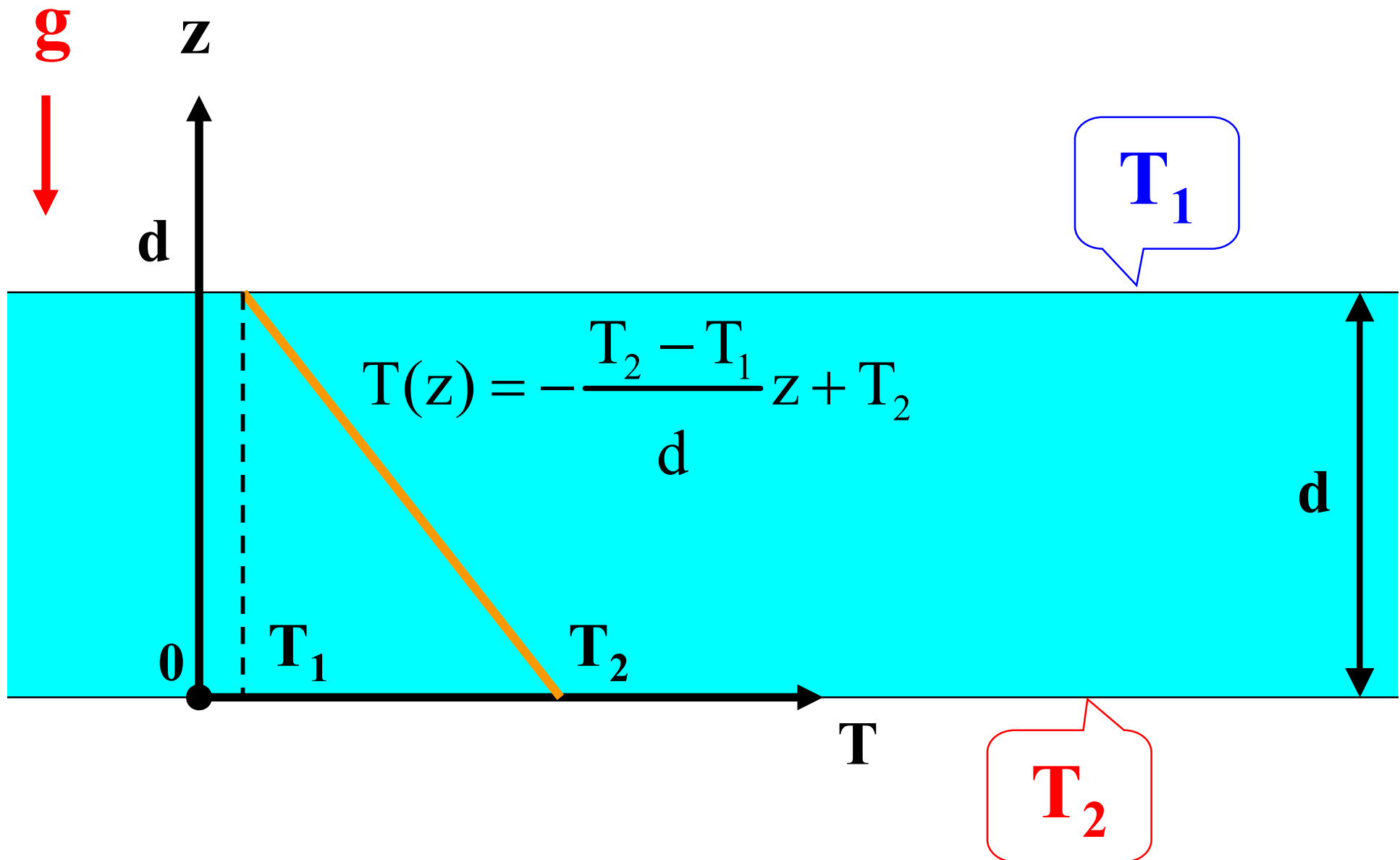
$$\frac{d\rho}{dz} > \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

**Неустойчивая
стратификация**

Термогравитационная конвекция

Конвективной неустойчивостью
называется неустойчивость в
газовой или жидкой среде,
находящейся в поле силы тяжести,
которая пронизывается потоком
тепла в направлении
противоположном вектору g

т.е. жидкость или газ подогреваются снизу



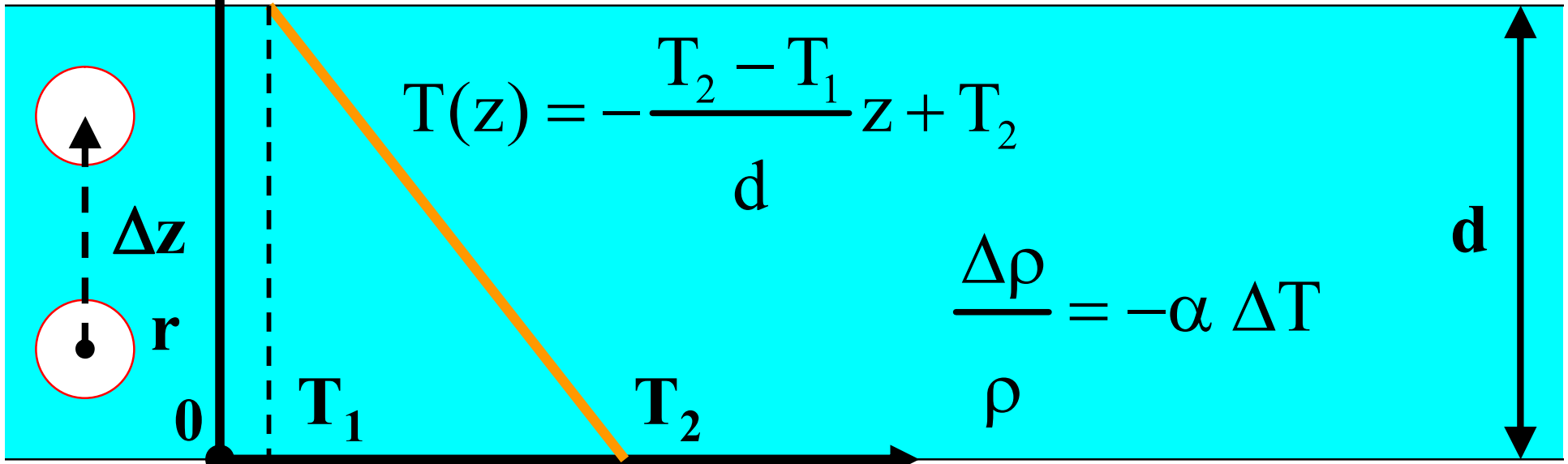
ρ - плотность; ν - вязкость; χ - температуропроводность;
 α - коэффициент объемного температурного расширения



z

d

$$\frac{|\Delta\rho|}{\rho} = \alpha \Delta T = \alpha \frac{T_2 - T_1}{d} \Delta z$$

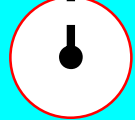


$$T(z) = -\frac{T_2 - T_1}{d} z + T_2$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -\alpha \Delta T$$



Δz



r

0

T₁

T₂

d

T

$$F_{\text{Аpx}} - mg = F_{\text{Стокса}}$$

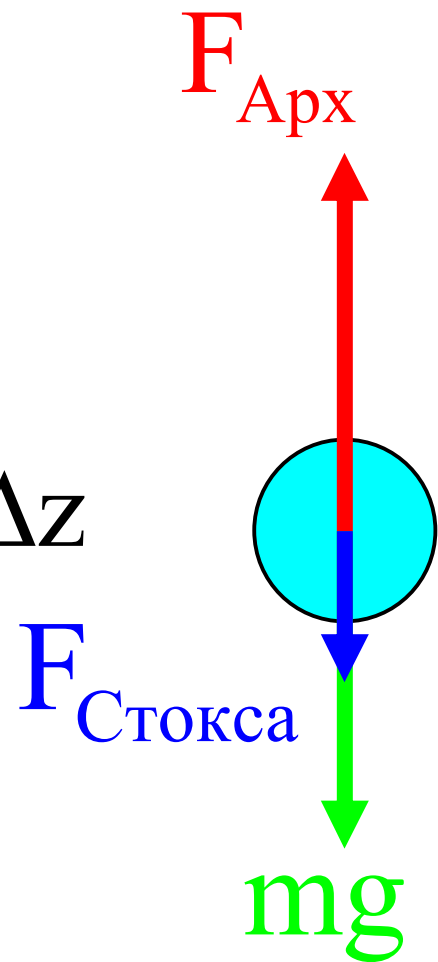
$$F_{\text{Аpx}} - mg = gV \Delta\rho \sim g r^3 \Delta\rho$$

$$F_{\text{Стокса}} = 6\pi\rho\nu r U \sim \rho\nu r U$$

$$U \sim \frac{\Delta\rho g r^2}{\rho \nu} = \frac{\alpha g r^2 (T_2 - T_1)}{\nu d} \Delta z$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \alpha \frac{T_2 - T_1}{d} \Delta z$$

$$\tau_{\Delta z} \sim \frac{\Delta z}{U} = \frac{\nu d}{g \alpha (T_2 - T_1) r^2}$$



$$\tau_{\Delta z} \sim \frac{\nu d}{g \alpha (T_2 - T_1) r^2}$$

?

$$\tau_T \sim \frac{r^2}{\chi}$$

Температуро-
проводность

χ [м² / с]

$$\frac{\tau_T}{\tau_{\Delta z}} \sim \frac{g \alpha (T_2 - T_1) r^4}{\chi \nu d}$$

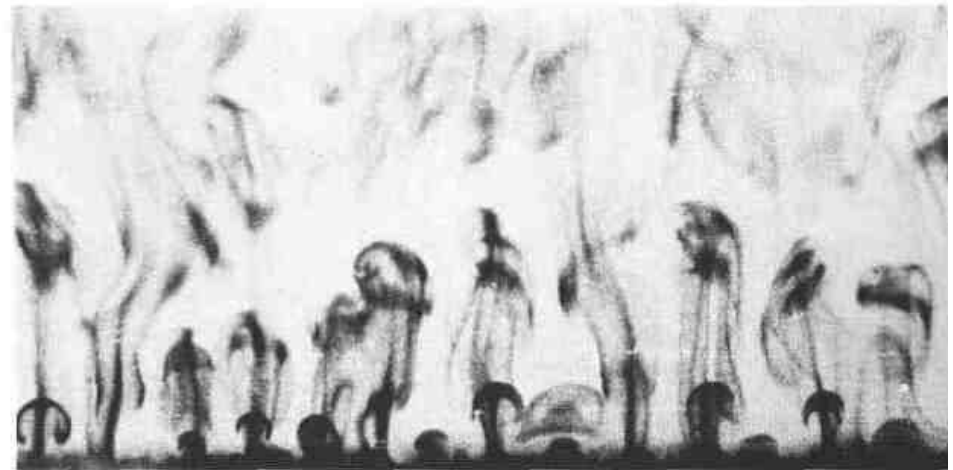
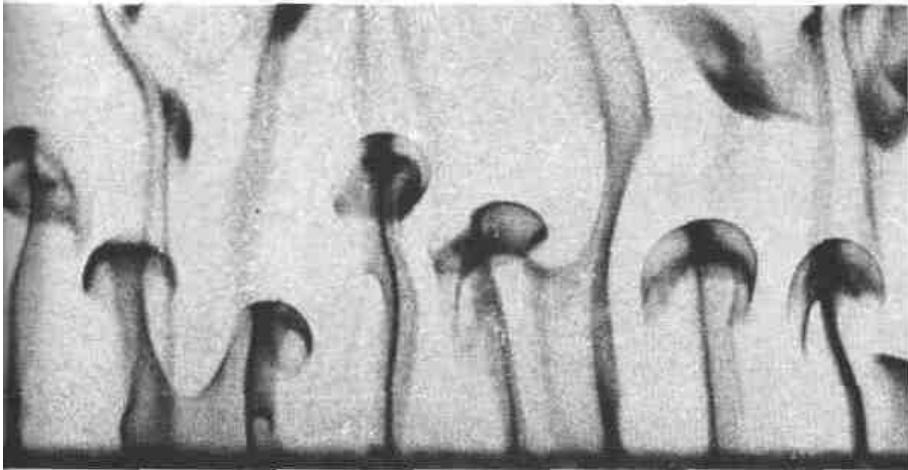
$r \sim d$

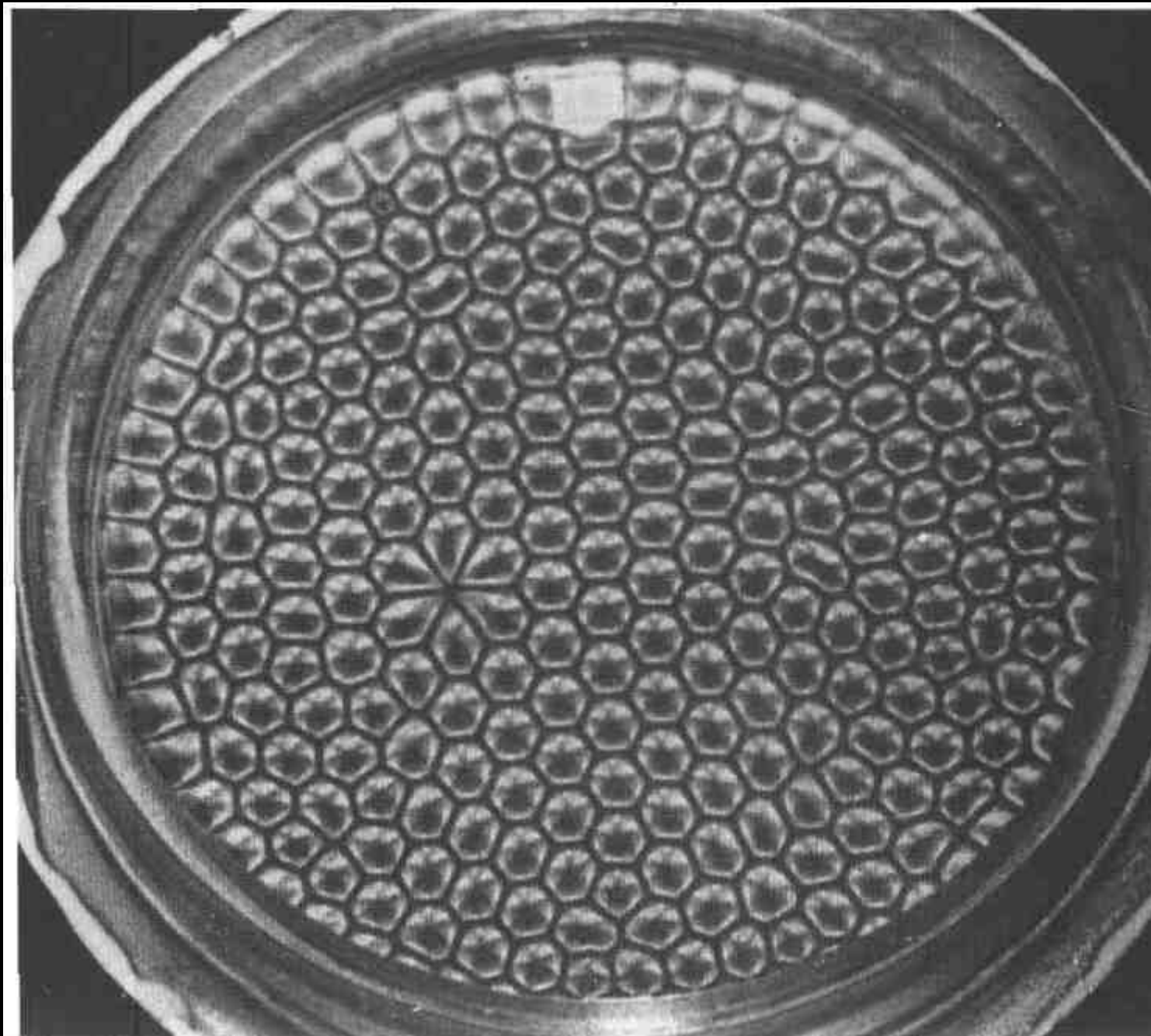
$$Ra = \frac{g \alpha (T_2 - T_1) d^3}{\chi \nu}$$

Число
Рэля

конвекция развивается при $Ra > Ra_{кр} \sim 10^3$

Конвективная неустойчивость (Рэля-Бенара)





$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}]$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\nabla}) T = \dots$$

Уравнения гидродинамики

Уравнение состояния

$$\rho = \rho(p, T, \dots)$$

парциальное давление
водяного пара

воздух

$$\rho = \rho(p, T, e)$$

соленость

вода

$$\rho = \rho(p, T, s)$$

Уравнение состояния воздуха (сухого)

$$p = \frac{m}{V} \frac{R}{\mu} T$$

$$\rho = \rho(p, T)$$

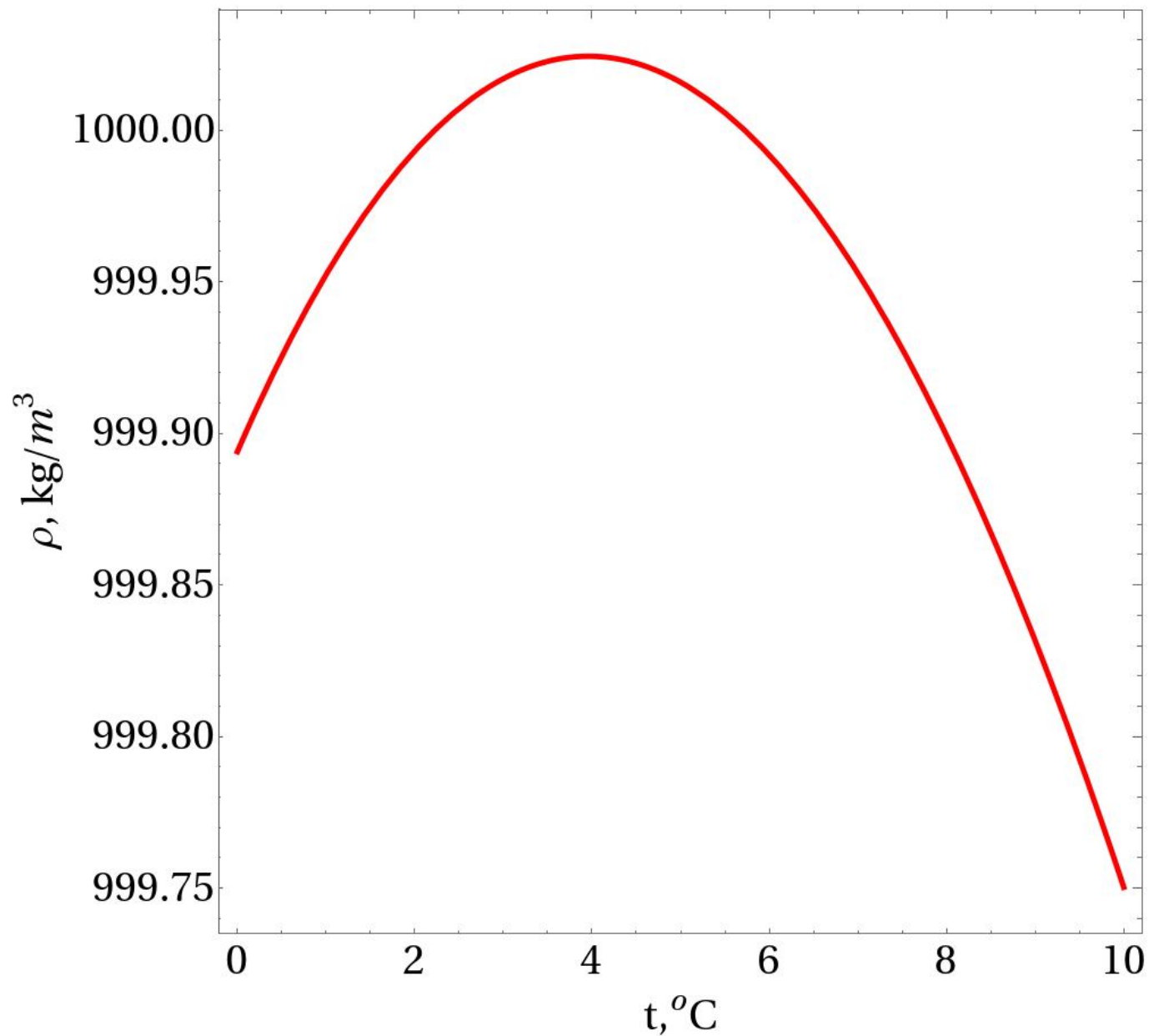
$$\rho = \frac{p\mu}{RT}$$

Уравнение состояния морской воды

$$\rho = \rho(p, T, s)$$

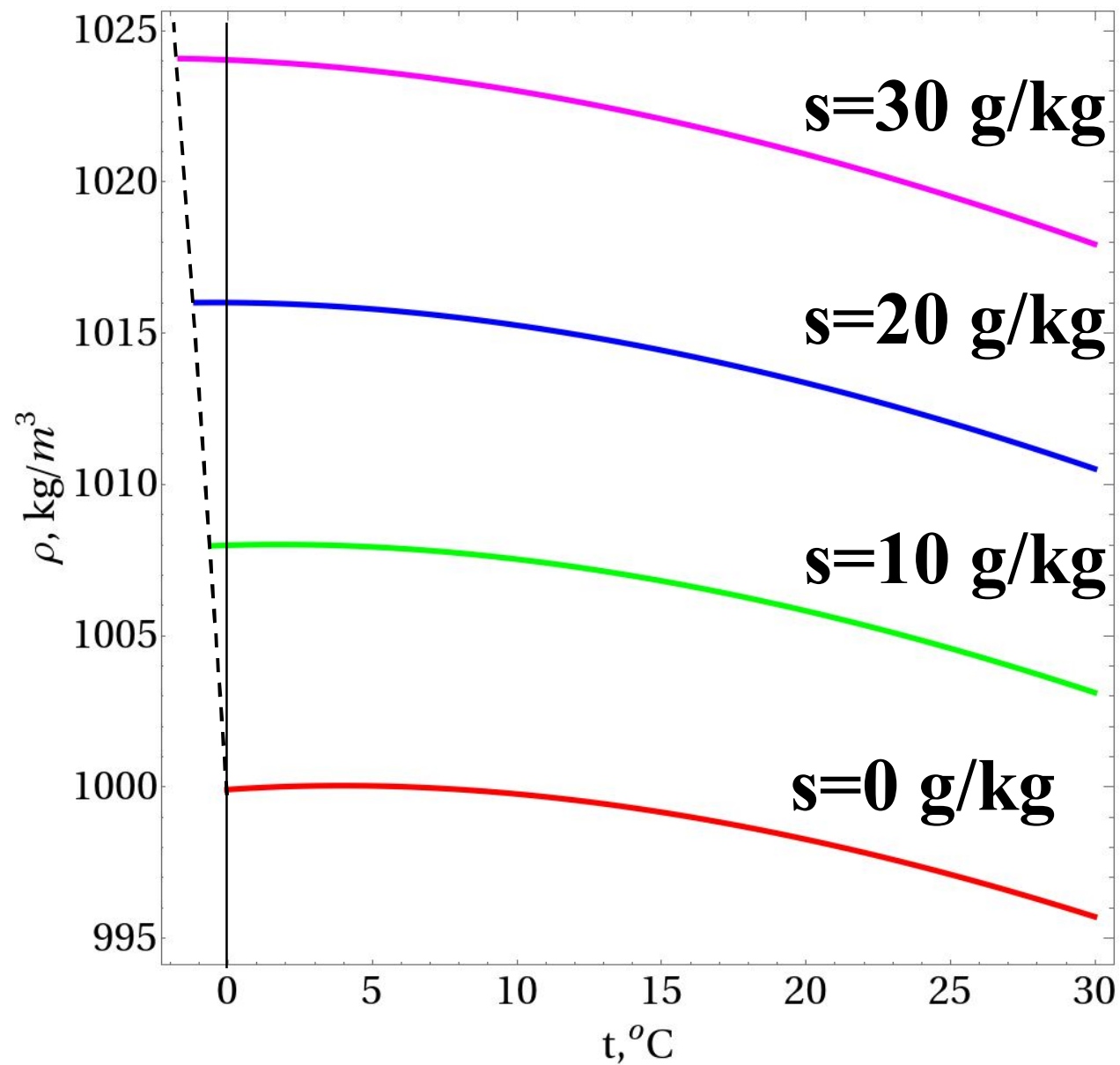
**аналитического выражения не существует,
есть только эмпирические формулы!**

- **Формула Линейкина (5 эмпирических констант)**
- **Уравнение Чена-Миллеро (48 эмпирических констант)**
- **The International Thermodynamic Equation of Seawater – 2010 (www.teos-10.org) - уравнение для потенциала Гиббса**



**у пресных (солонватых) вод существует
«температура максимальной плотности»**

Плотность морской воды как функция температуры и солености



Температура заморзання и максимальной плотности как функция солёности

