

# Введение в физику гидросферы

2024 Лекция №2

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

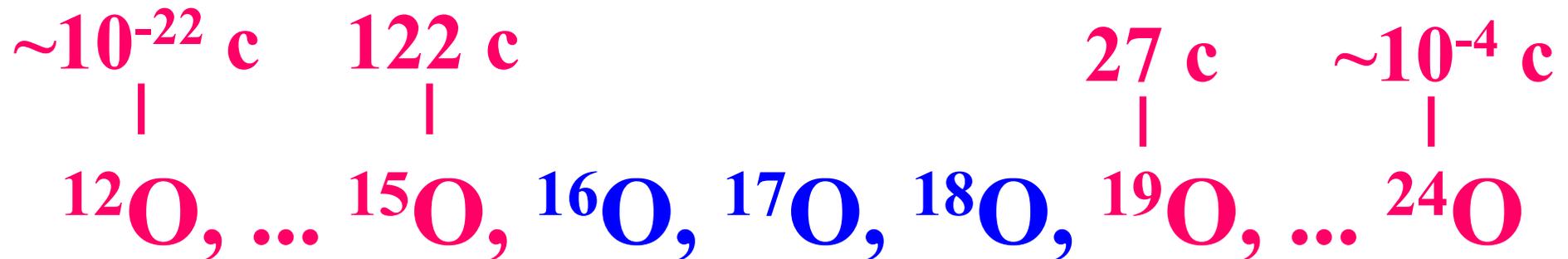
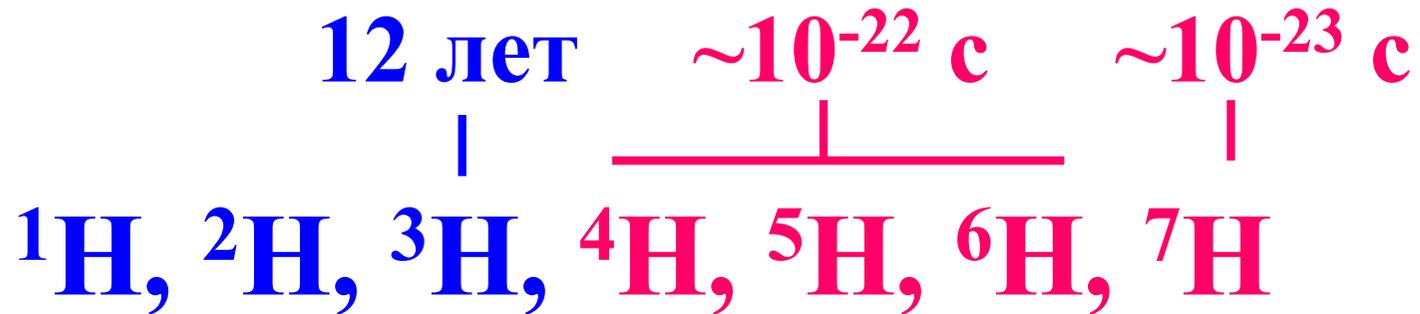
*отделение геофизики*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*



# **Вода как вещество**

# Известны следующие изотопы водорода и кислорода:



стабильны (существуют в природе)

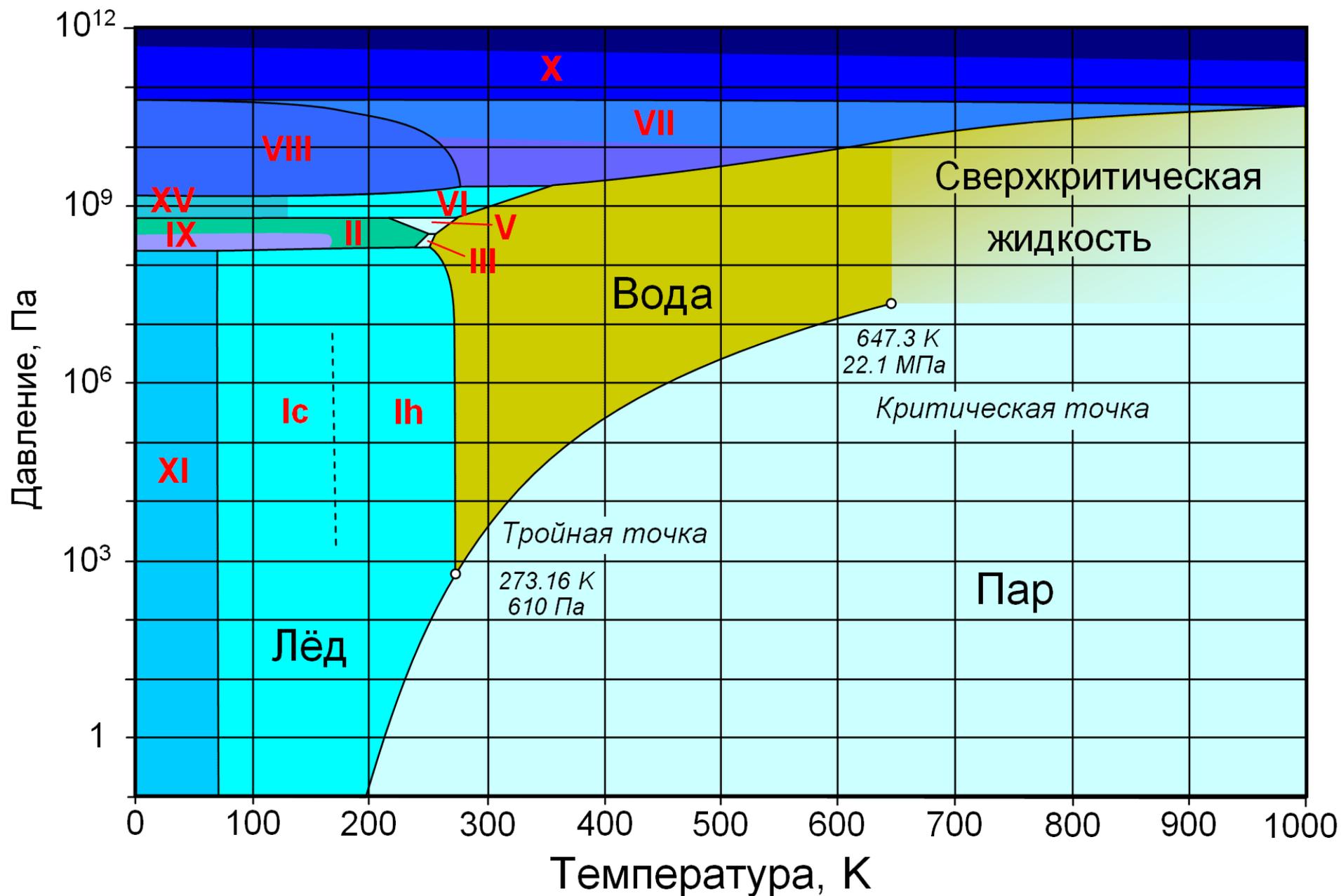
нестабильны (малый период полураспада)

## 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**

# Фазовая диаграмма воды



# **Физические свойства ВОДЫ**

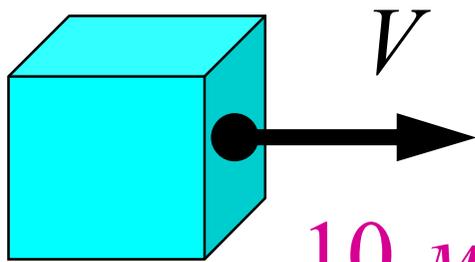
# Теплоемкость пресной воды (при $p=101325$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$C_p,$ Дж/(кг·град)	4219	4195	4184	4180

$W_p = mgh$        $W_p \Rightarrow Q$   
 $Q = mC_p\Delta t$   
 $9.8 \text{ м/с}^2$        $100 \text{ м}$   
 $\Delta t = \frac{gh}{C_p} \approx 0.23 \text{ град}$   
 $4195 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$

# Теплоемкость пресной воды (при $p=101325$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$C_p,$ Дж/(кг·град)	4219	4195	4184	4180



$10 \text{ м/с}$      $100 \text{ м/с}$

$$\Delta t = \frac{V^2}{2C_p} \approx 0.012 \text{ град}$$

$$\approx 1.2 \text{ град}$$

$4195 \text{ Дж/(кг·град)}$

$$W_k = \frac{mV^2}{2}$$

$$W_k \Rightarrow Q$$

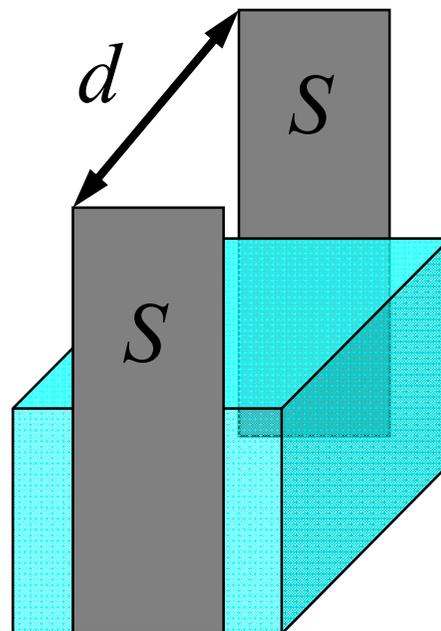
$$Q = mC_p\Delta t$$

## Диэлектрическая проницаемость воды (относительная)

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$\varepsilon$	<b>87.99</b>	<b>84.08</b>	<b>80.32</b>	<b>76.71</b>

формула  
конденсатора

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}$$



Емкостной  
датчик  
уровня

# Температуропроводность и теплопроводность пресной воды (при $p=101325$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$\chi \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	0.132	0.138	0.143	0.148
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м К})$	0.556	0.579	0.598	0.614

теплопроводность

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} T$$

поток тепла  
(в неподвижной  
жидкости)

уравнение  
теплопро-  
водности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \Delta T$$

$$\lambda = C_p \rho \chi$$

температуропроводность

# Температуропроводность и теплопроводность пресной воды (при $p=101325$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$\chi \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	0.132	0.138	0.143	0.148
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м К})$	0.556	0.579	0.598	0.614

теплопроводность

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} T$$

время  
тепловой  
релаксации  
шара

$$t \sim \frac{1 \text{ мм}^2}{\chi} \approx 7.2 \text{ с}$$

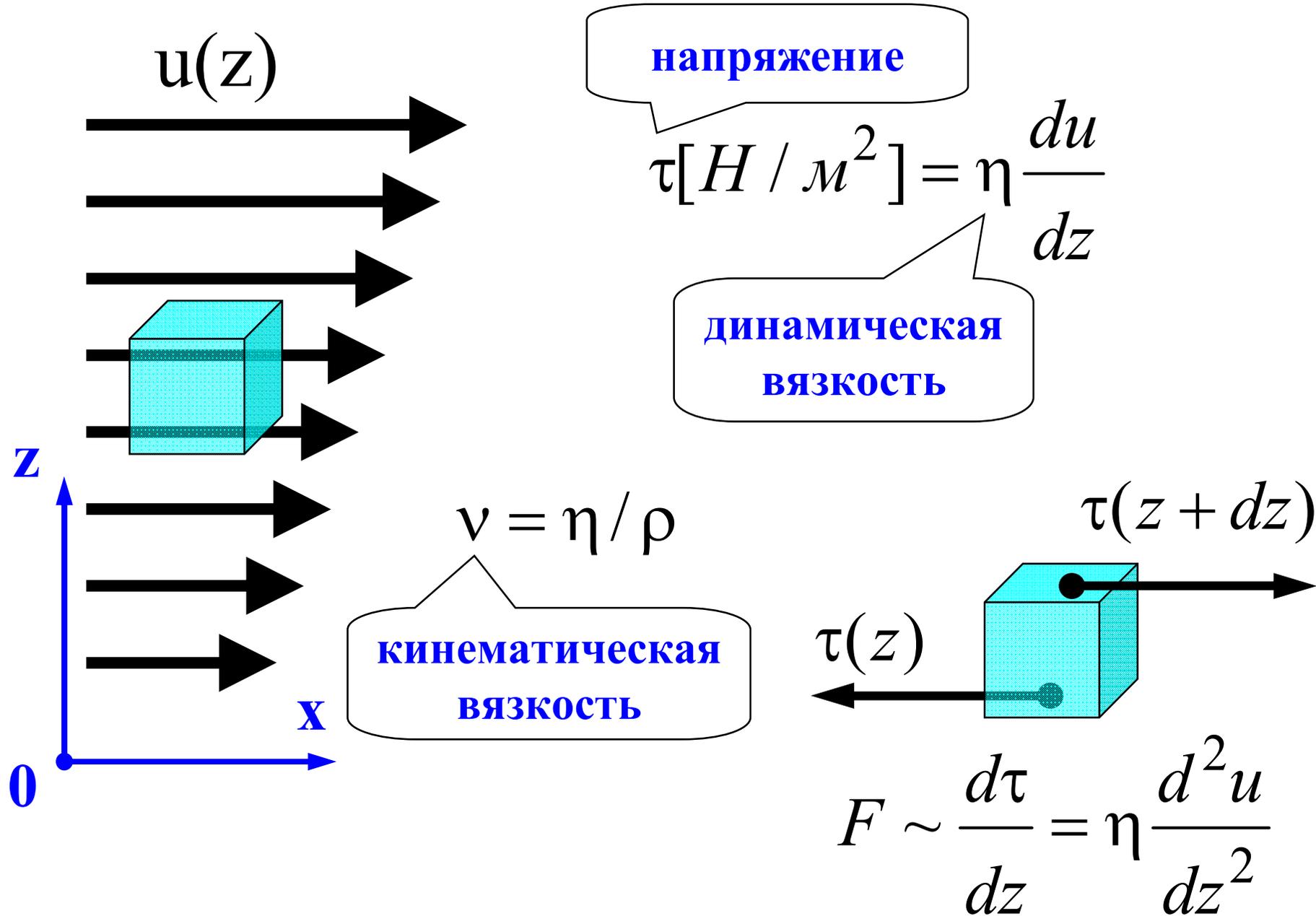
$$\lambda = C_p \rho \chi$$

поток тепла  
(в неподвижной  
жидкости)

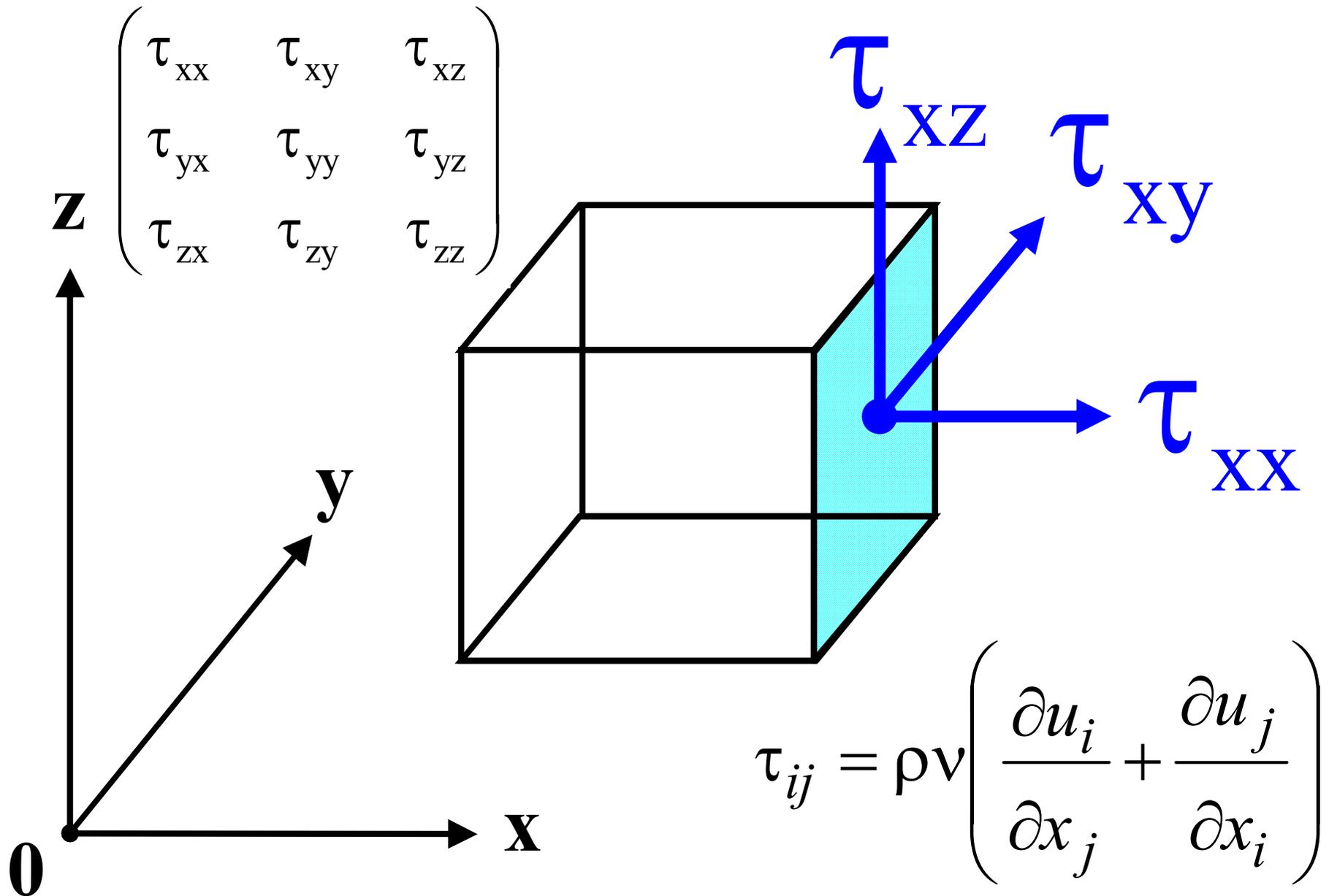
температуропроводность

$$1.38 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$$

# Вязкость воды



# Тензор вязких напряжений



## Вязкость пресной воды при $p=101325$ Па

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$\nu \cdot 10^6 [\text{м}^2 / \text{с}]$	<b>1.79</b>	<b>1.31</b>	<b>1.003</b>	<b>0.801</b>
$\eta \cdot 10^3 [\text{Па} \cdot \text{с}]$	<b>1.79</b>	<b>1.31</b>	<b>1.002</b>	<b>0.797</b>

**Кинематич. вязкость глицерина (20°C)  $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$**

**Динамическая вязкость глицерина (20°C)  $1.48 \text{ Па} \cdot \text{с}$**

**Кинематич. вязкость воздуха (20°C)  $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$**

**Динамическая вязкость воздуха (20°C)  $1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$**

## Поверхностное натяжение

$$p - p_{\text{atm}} = \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

**формула  
Лапласа**

$p$  – давление в жидкости

$p_{\text{atm}}$  – атмосферное давление

$R_1$  и  $R_2$  – главные радиусы кривизны поверхности

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$\alpha, \text{Н/м}$	0.07564	0.07423	0.07275	0.07120

## Сжимаемость воды

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \quad \boxed{\rho = \frac{m}{V}} \quad \beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p}$$

**изотермическая**

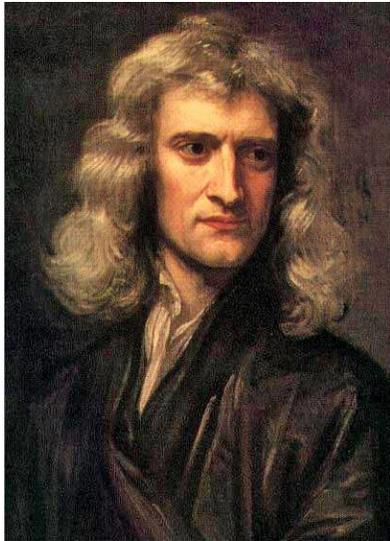
$$\beta_T = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$$

**адиабатическая**

$$\beta_S = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_S$$

## Сжимаемость воды

$$\Delta\rho = \left( \frac{\partial\rho}{\partial p} \right) \Delta p$$
$$\left( \frac{\partial\rho}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{c_N^2} \qquad \left( \frac{\partial\rho}{\partial p} \right)_S = \frac{1}{c^2}$$



Sir Isaac Newton

$$\beta_S = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial\rho}{\partial p} \right)_S$$

$$c = \sqrt{1/\rho\beta_S}$$



Pierre-Simon Laplace

## Сжимаемость воды

$$c = c(T, S, p)$$

скорость звука в воде  
зависит от температуры,  
солёности и давления -  
эмпирическая  
зависимость

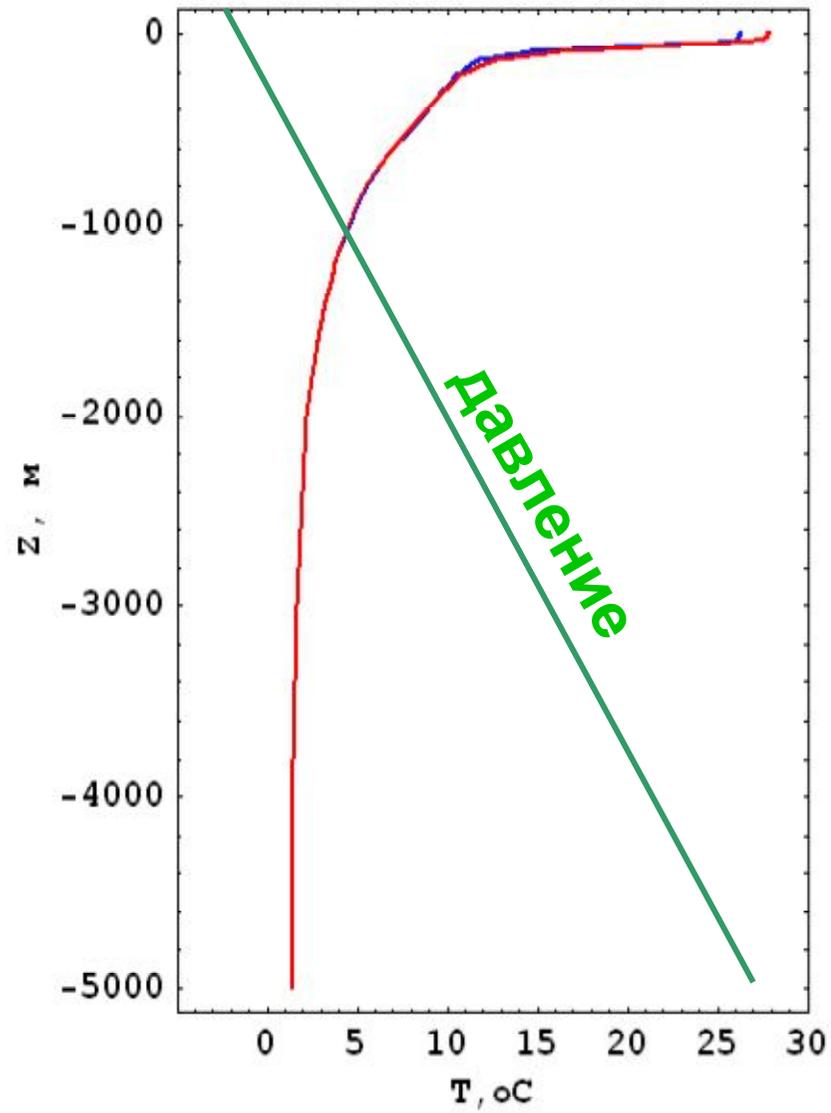
$$1480 < c < 1545 \text{ м/с}$$

$$\frac{\partial c}{\partial T} > 0$$

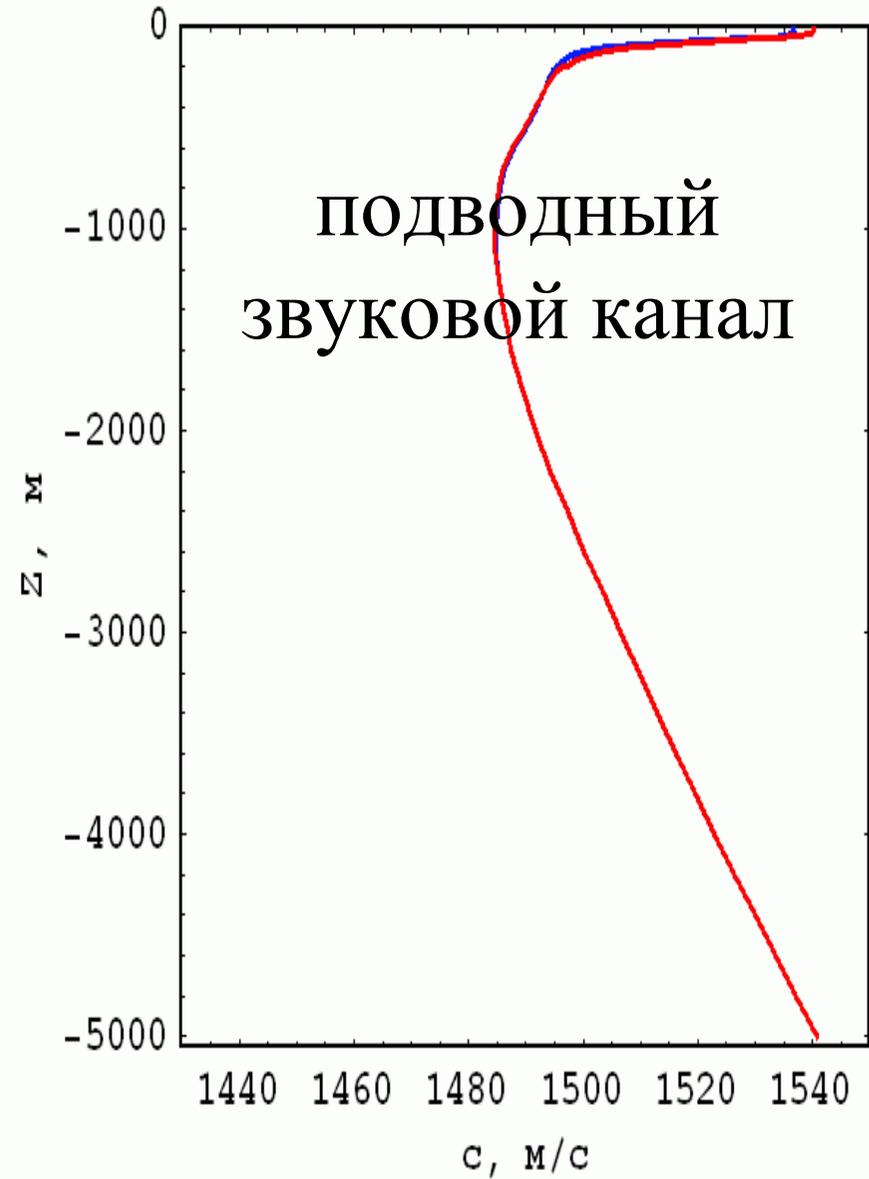
$$\frac{\partial c}{\partial p} > 0$$

Lat=10 Lon=-150

## Температура



## Скорость звука



# Соленость морской воды

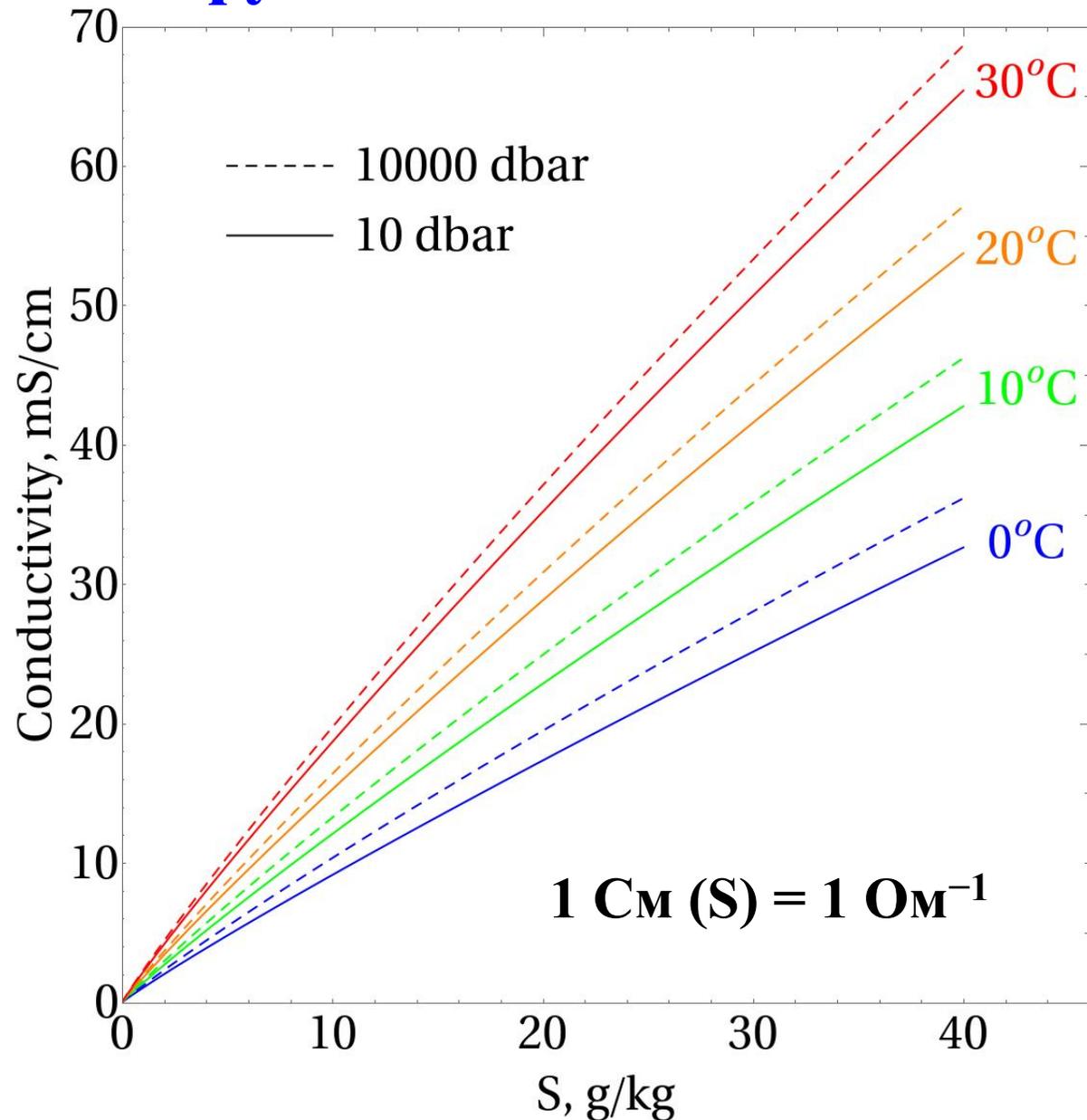
$$S = \frac{m_{\text{примеси}}}{m_{\text{примеси}} + m_{\text{чистой воды}}} \left[ \text{‰ промилле} \right]$$

PSU (Practical Salinity Unit)

**Соленость** – масса в граммах твердых веществ, растворенных в 1 кг воды, при условии, что карбонаты ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) 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



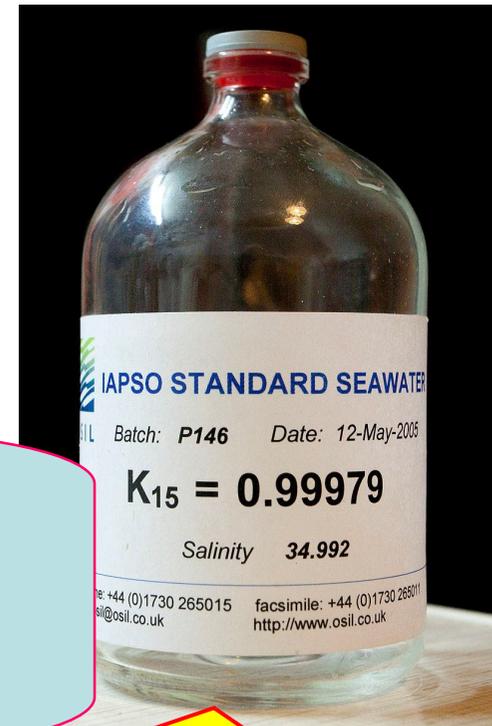
## Электропроводность некоторых веществ (См/м) при 20°C

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.*

PSS-78 (Practical Salinity Scale) – сравнение электропроводности пробы морской воды и раствора KCl при определенных условиях



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

## **Типичная соленость:**

<b>в океане</b>	<b>35 ‰</b>
<b>в реках</b>	<b>до 0.5‰</b>

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‰**

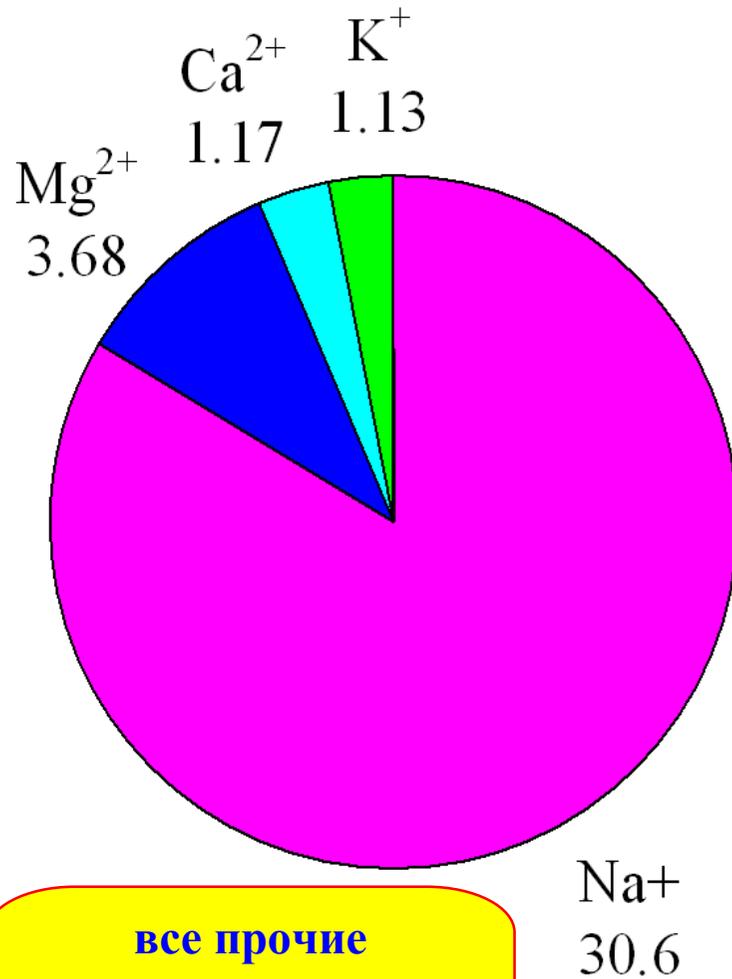
**Мертвое море  
250-300 ‰**

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

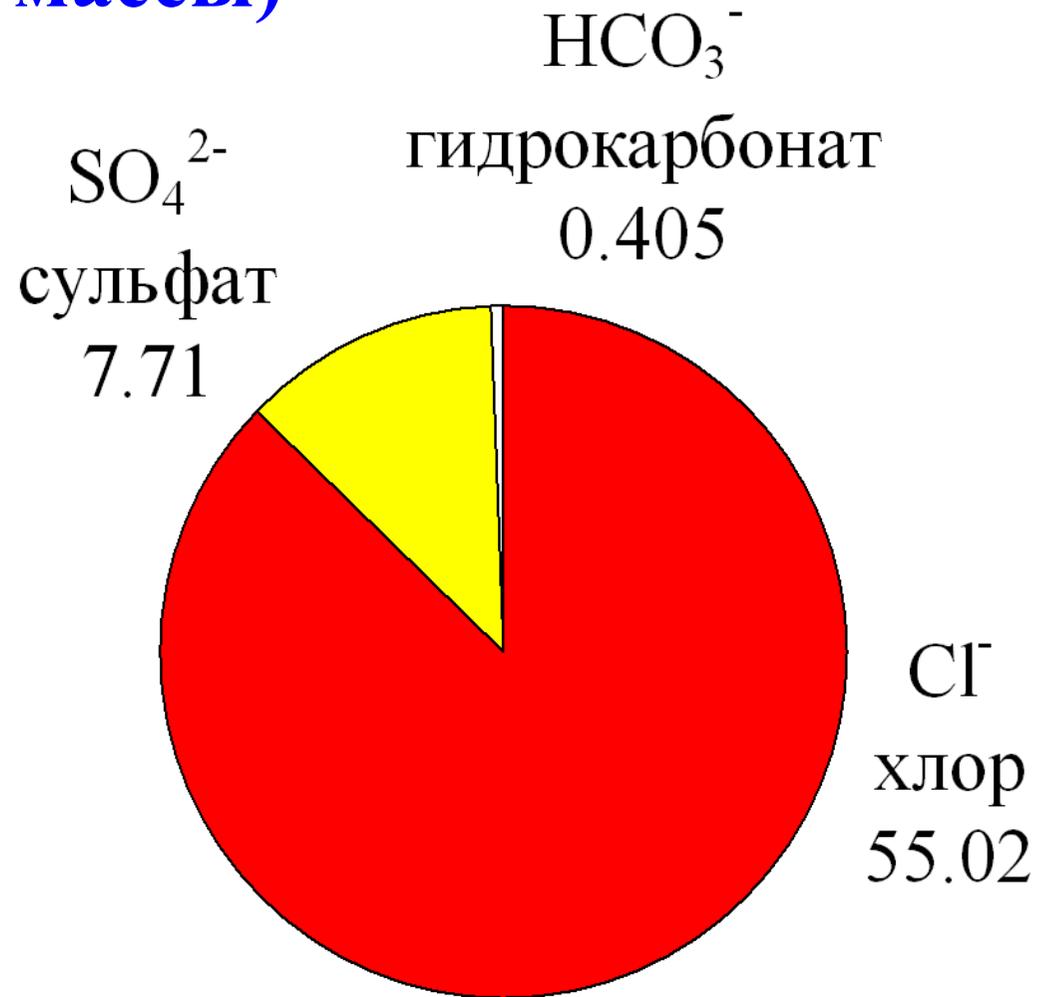
**На порядок больше  
массы атмосферы!!!**

**Соль Мирового океана способна  
покрыть поверхность суши  
слоем  $\sim 150$  м**

# Главные компоненты примеси в морской воде (% массы)



все прочие  
компоненты  
(микроэлементы)  
≈ 0.3% массы



в 1 кг морской воды  
содержится ≈ 3·10<sup>-10</sup>  
кг золота

**Уравнения состояния  
влажного воздуха и  
морской воды**

# 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

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

$$R_a \equiv \frac{R}{\mu} = \frac{8.31 \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{МОЛЬ}} \right]}{0.029 \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} \right]} \approx 287 \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{КГ}} \right]$$

$$p = \rho R_a T \Rightarrow \rho = \frac{p}{R_a T}$$

**Уравнение состояния  
СУХОГО воздуха**

при Н.У.

$$p = 101325 \text{ Па}$$

$$T = 273.16 \text{ К}$$

$$\left. \begin{array}{l} p = 101325 \text{ Па} \\ T = 273.16 \text{ К} \end{array} \right\} \Rightarrow \rho \approx 1.29 \text{ кг / м}^3$$

$$p_a = \rho_a R_a T$$

парциальное  
давление  
водяного пара

$$e = \rho_w R_w T$$

$$\rho = \rho_a + \rho_w = \frac{p_a}{R_a T} + \frac{e}{R_w T} = \frac{p - e}{R_a T} + \frac{e}{R_w T}$$

Уравнение состояния влажного воздуха

$$\rho = \frac{p}{R_a T} \left( 1 - \frac{e}{p} \left[ 1 - \frac{R_a}{R_w} \right] \right) \approx \frac{p}{R_a T} \left( 1 - 0.38 \frac{e}{p} \right)$$

$$e \sim 10^3 \text{ Па} \Rightarrow \frac{e}{p} \ll 1$$



- ❑ Концентрация пара резко падает с высотой
- ❑ В высоких широтах воздух менее влажный чем в тропиках
- ❑ Осадки – концентрация пара, поднятого на высоту конвекцией
- ❑ Содержание пара в атмосфере Земли варьировалось в прошлом в соответствии с ходом температуры

# Уравнение состояния морской воды

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

$$\rho = 1 + 10^{-3} (\varepsilon_1 s + \varepsilon_2 T - \varepsilon_3 s T - \varepsilon_4 T^2 + \varepsilon_5 p) \quad [\text{г/см}^3]$$

$$\varepsilon_1 = 0.82$$

$$\varepsilon_2 = 0.0689 \quad s \quad [^{\circ}/_{\infty}]$$

$$\varepsilon_3 = 0.0039 \quad T \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\varepsilon_4 = 0.00918 \quad p \quad [\text{дбар}]$$

$$\varepsilon_5 = 4.5 \cdot 10^{-3}$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$$

# Уравнение состояния морской воды

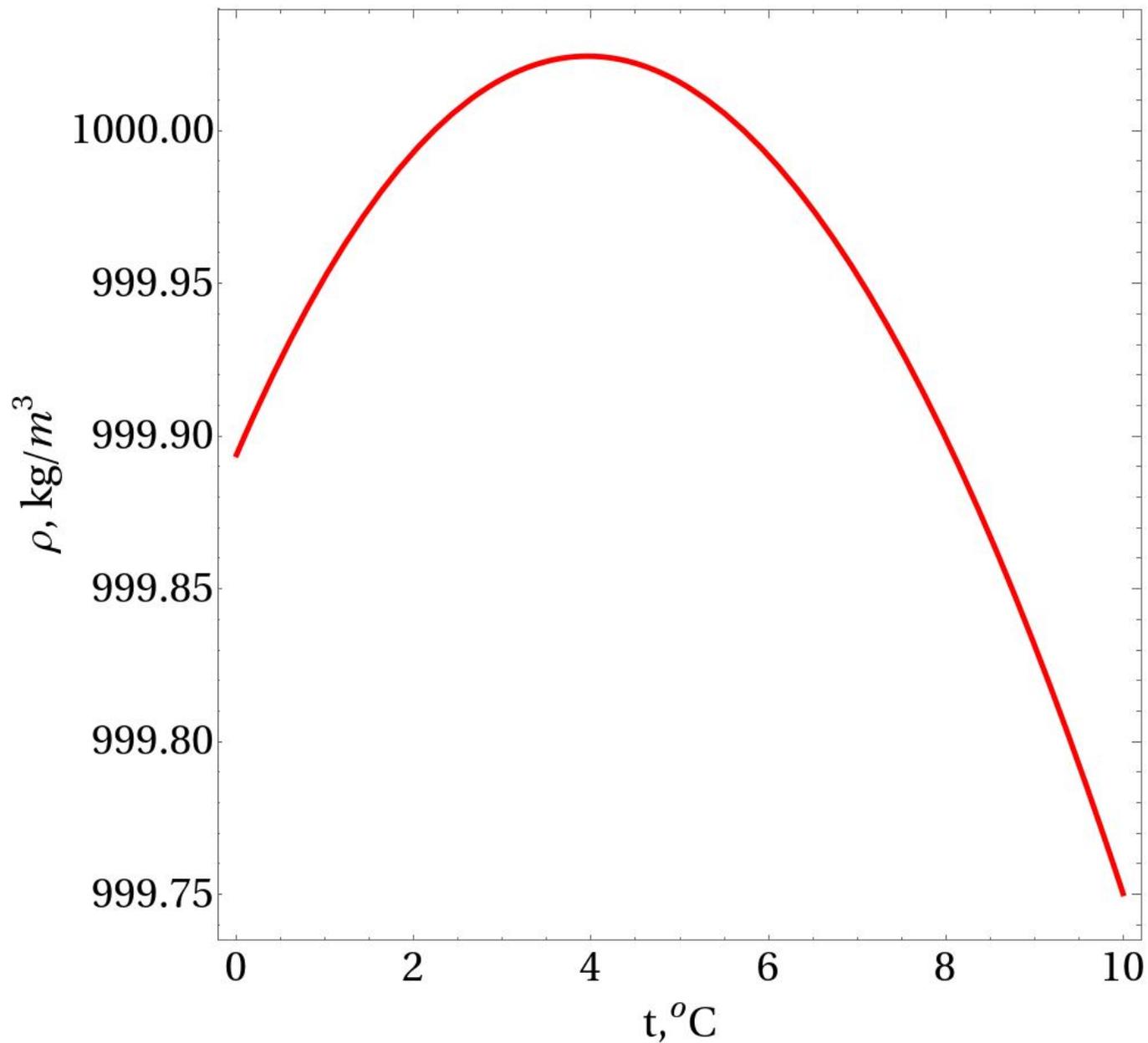
$$\rho = \rho(p, T, s)$$

Уравнение Чена-Миллеро содержит **48 (!!!)**  
эмпирических констант

**The International Thermodynamic  
Equation of Seawater – 2010 (TEOS-10)**

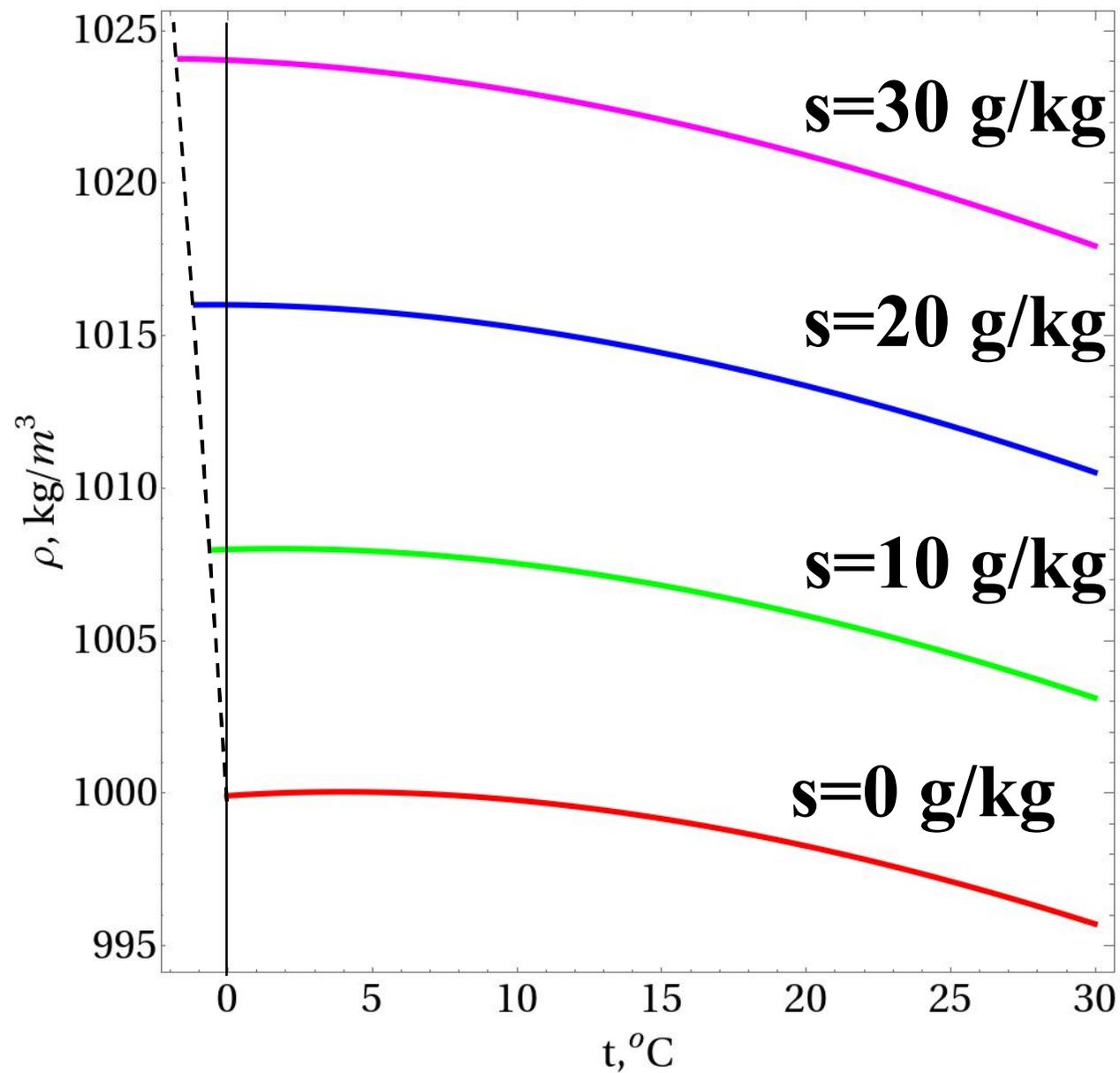
**[www.teos-10.org](http://www.teos-10.org)**

**TEOS-10 – уравнение для потенциала Гиббса**

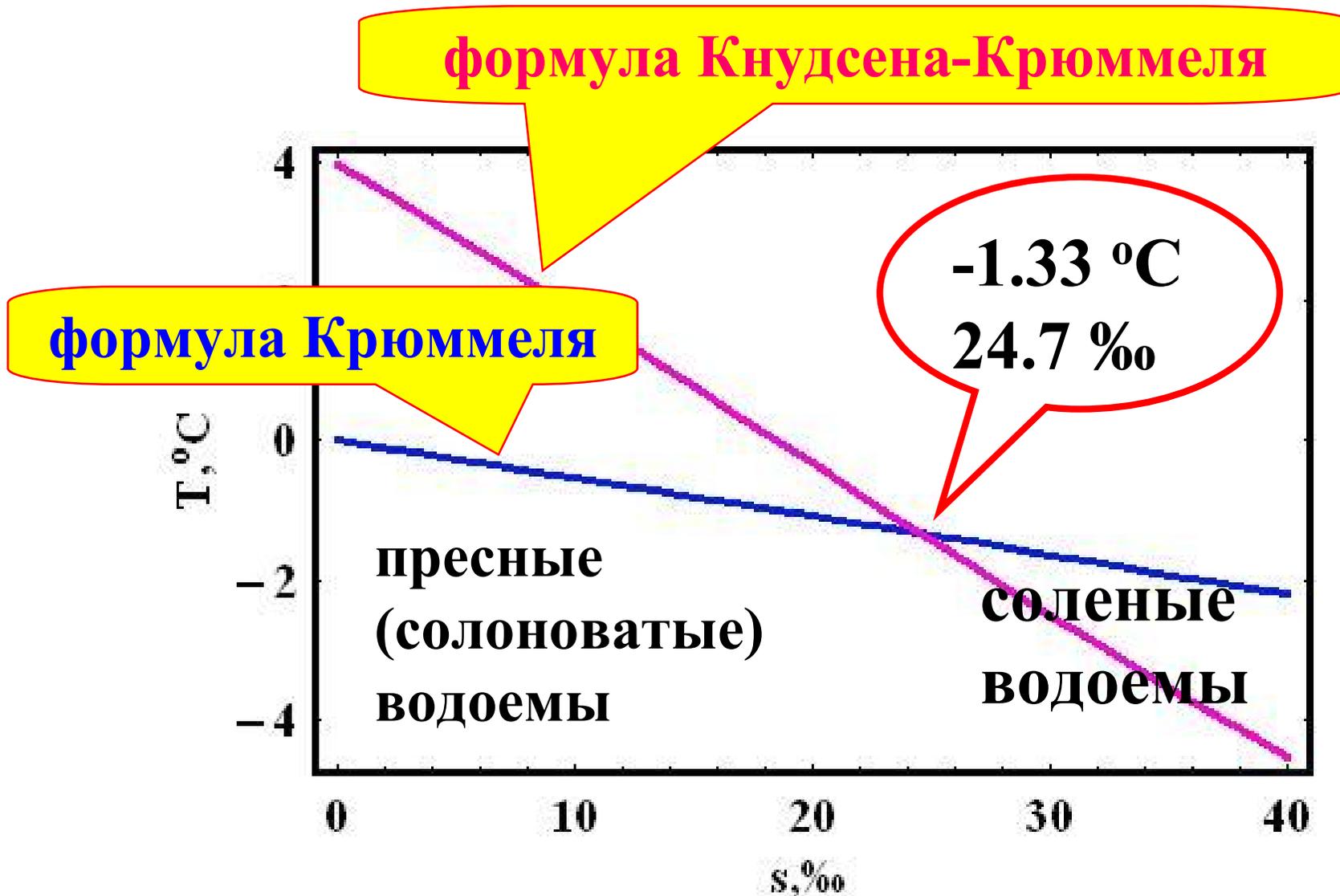


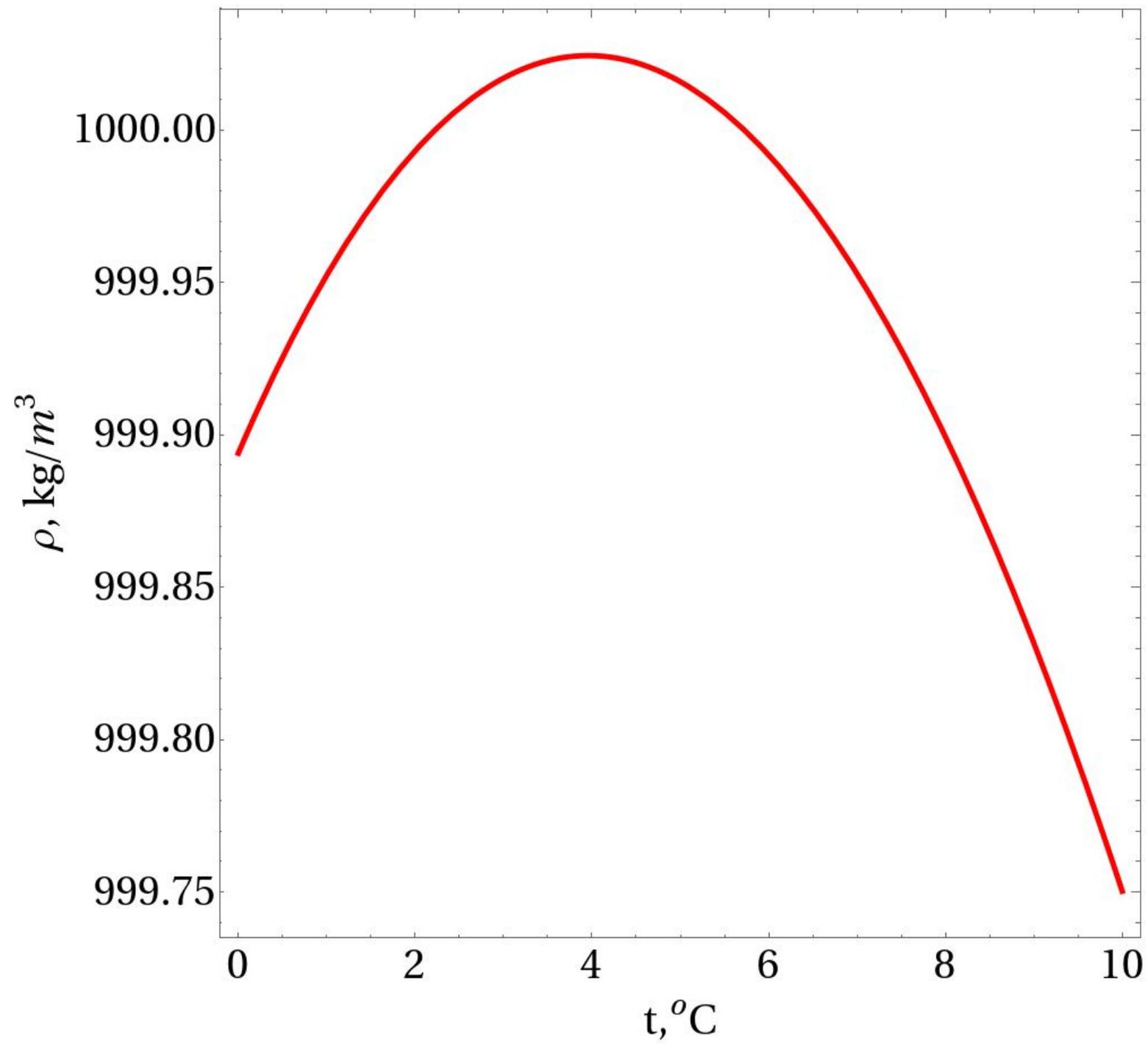
**у пресных (солонватых) вод существует  
«температура максимальной плотности»**

# Плотность морской воды как функция температуры и солёности



# Температура замерзания и максимальной плотности как функция солености





# **Уникальные свойства воды**

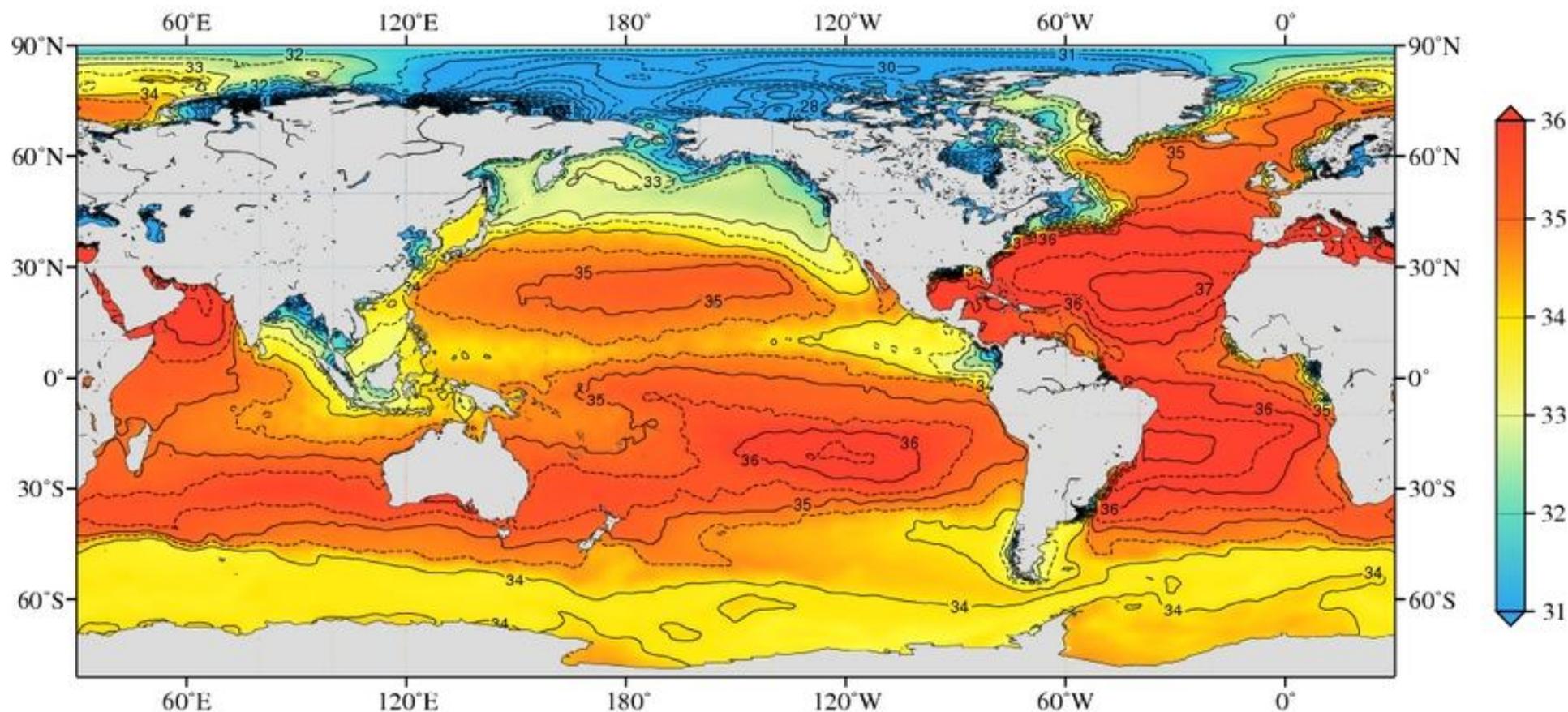
- 1. существование температуры максимальной плотности у пресных (солончатых) вод**
- 2. плотность льда < плотности воды**  
**917 кг/м<sup>3</sup>                      999.8 кг/м<sup>3</sup>**
- 3. высокая теплоемкость воды и широкий диапазон существования жидкой фазы**
- 4. вода – эффективный растворитель**

# 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)

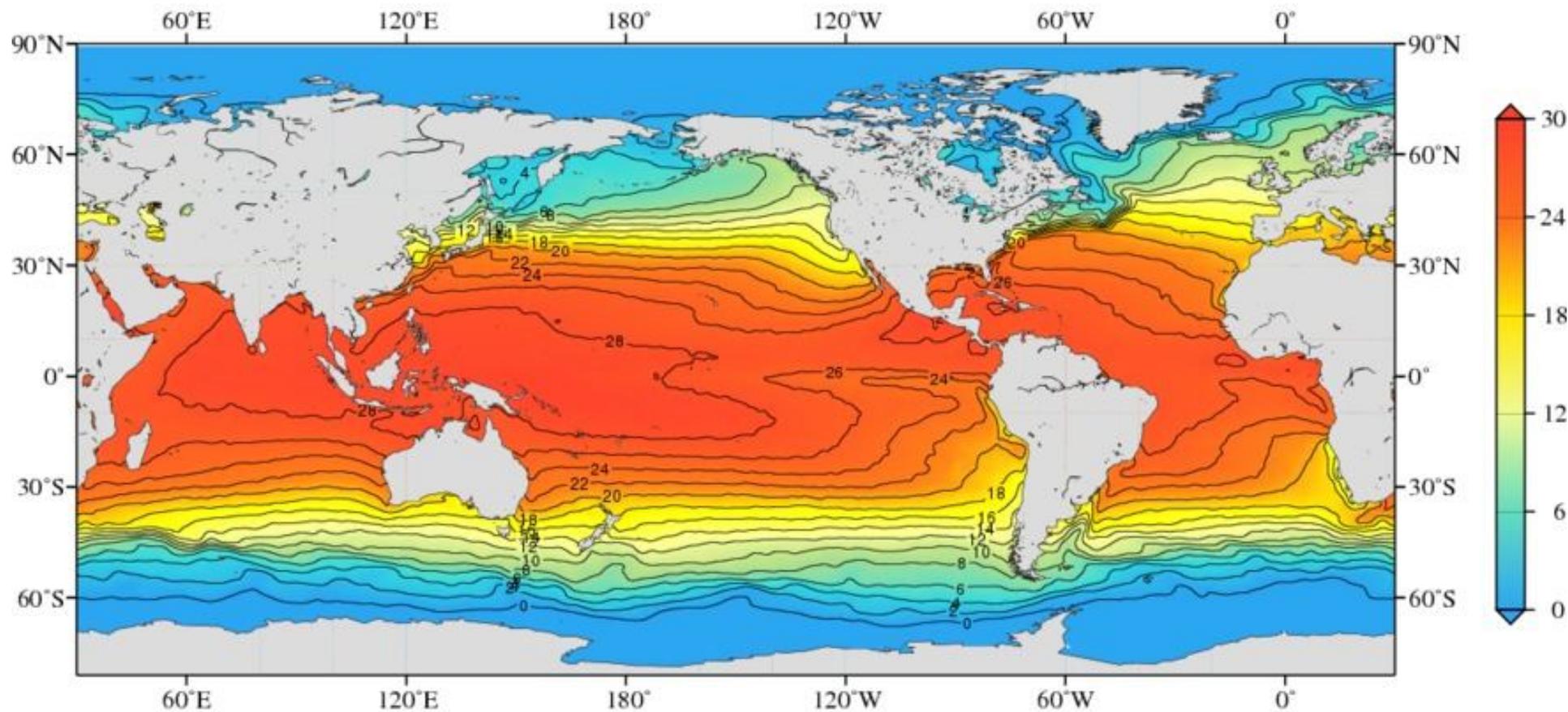
WORLD OCEAN ATLAS 2013 <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>

# Среднегодовая температура поверхности Мирового океана

World Ocean Atlas Climatology

Decadal Average: 1955 - 2012

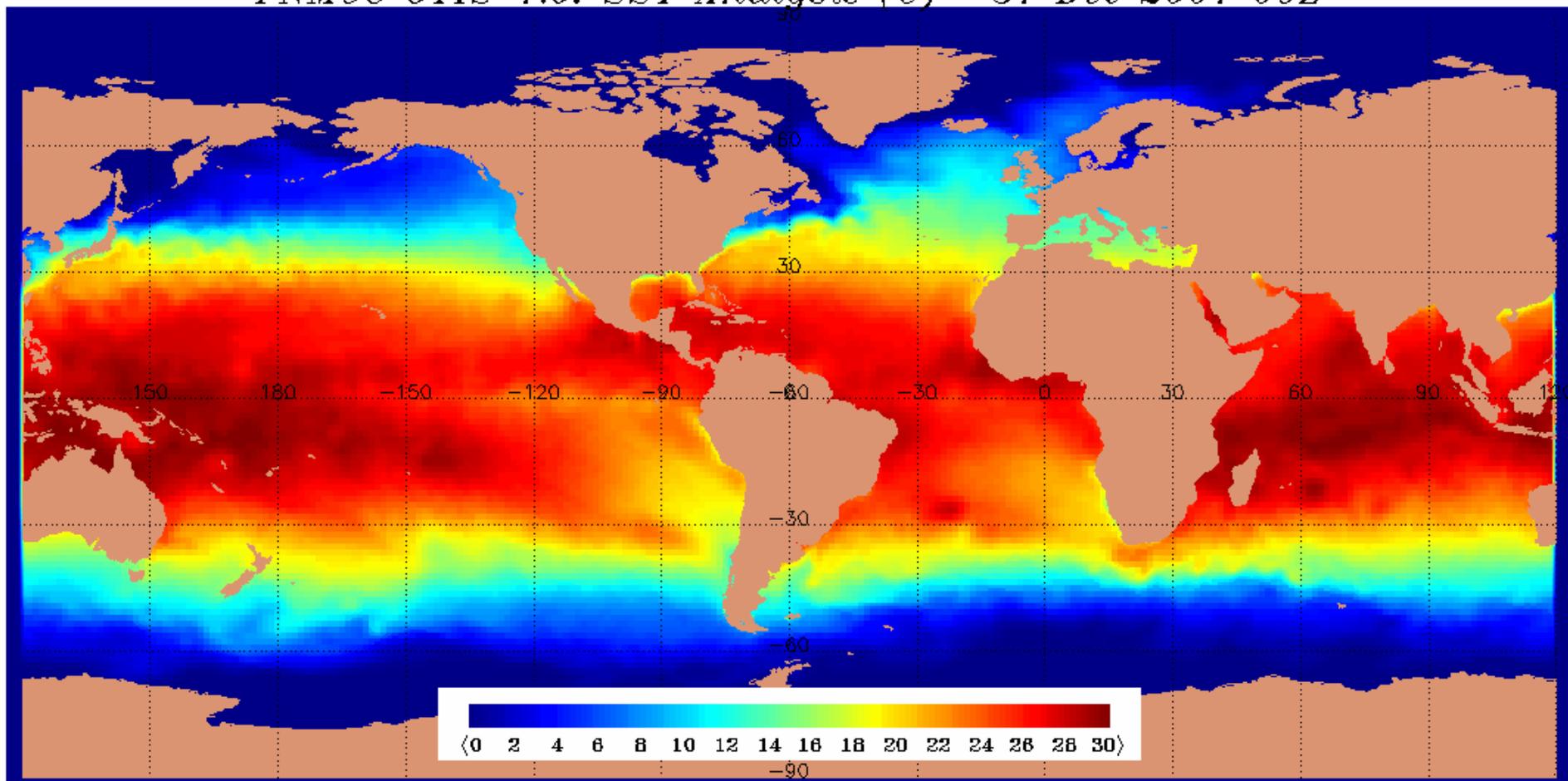
Contour Interval=2



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

# Температура поверхности океана (ТПО)

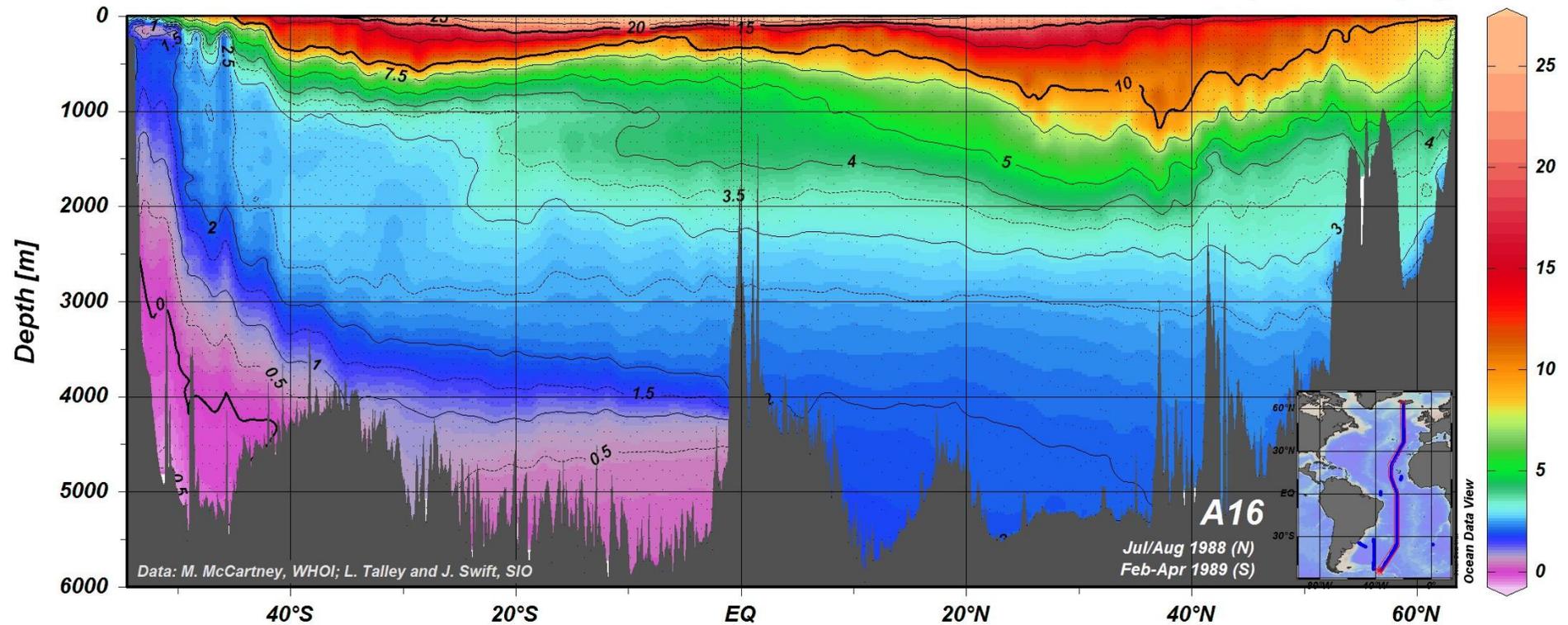
*FNMOC OTIS 4.0: SST Analysis (C) 31 Dec 2001 00Z*



# Вертикальный разрез (температура)

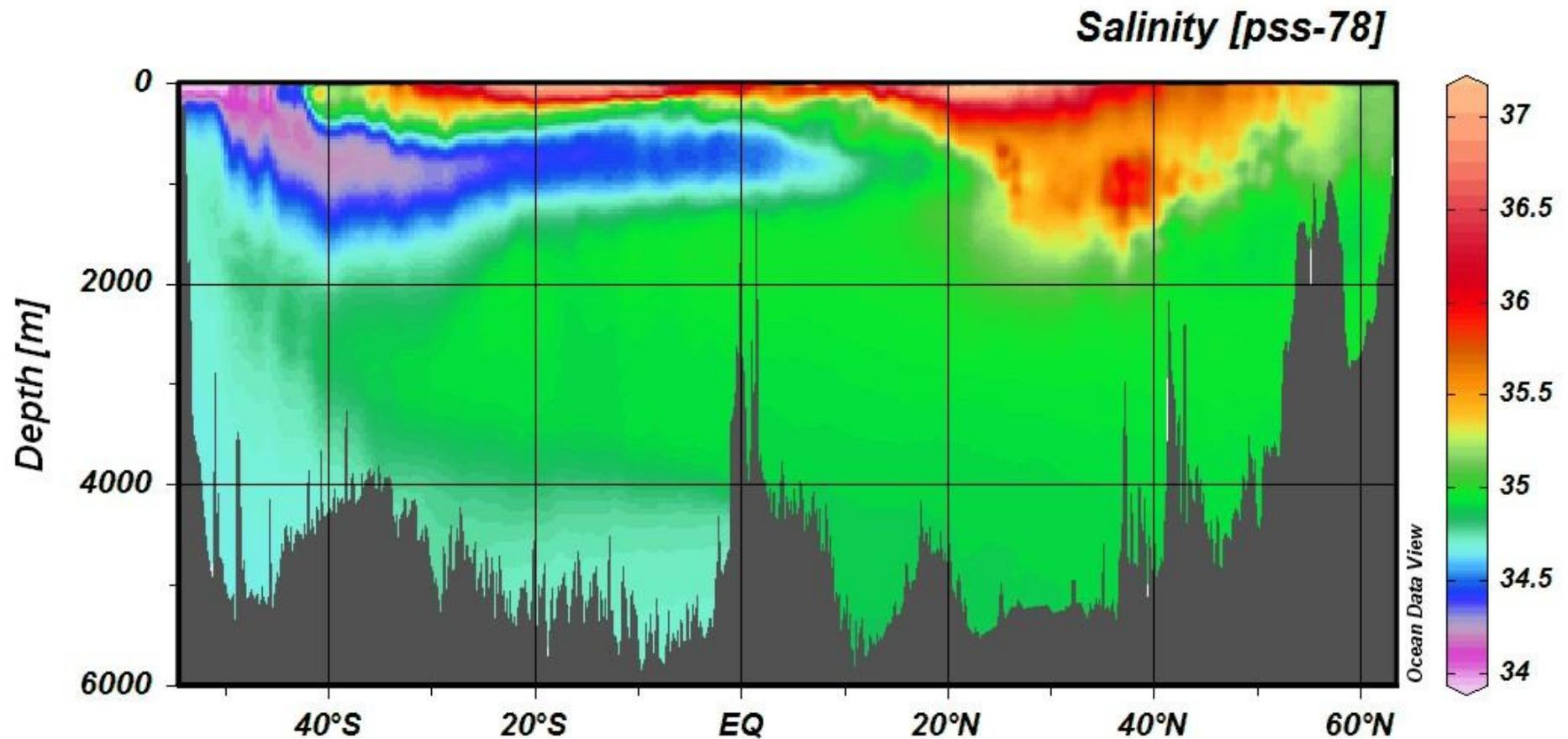
eWOCE

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



<http://www.ewoce.org>

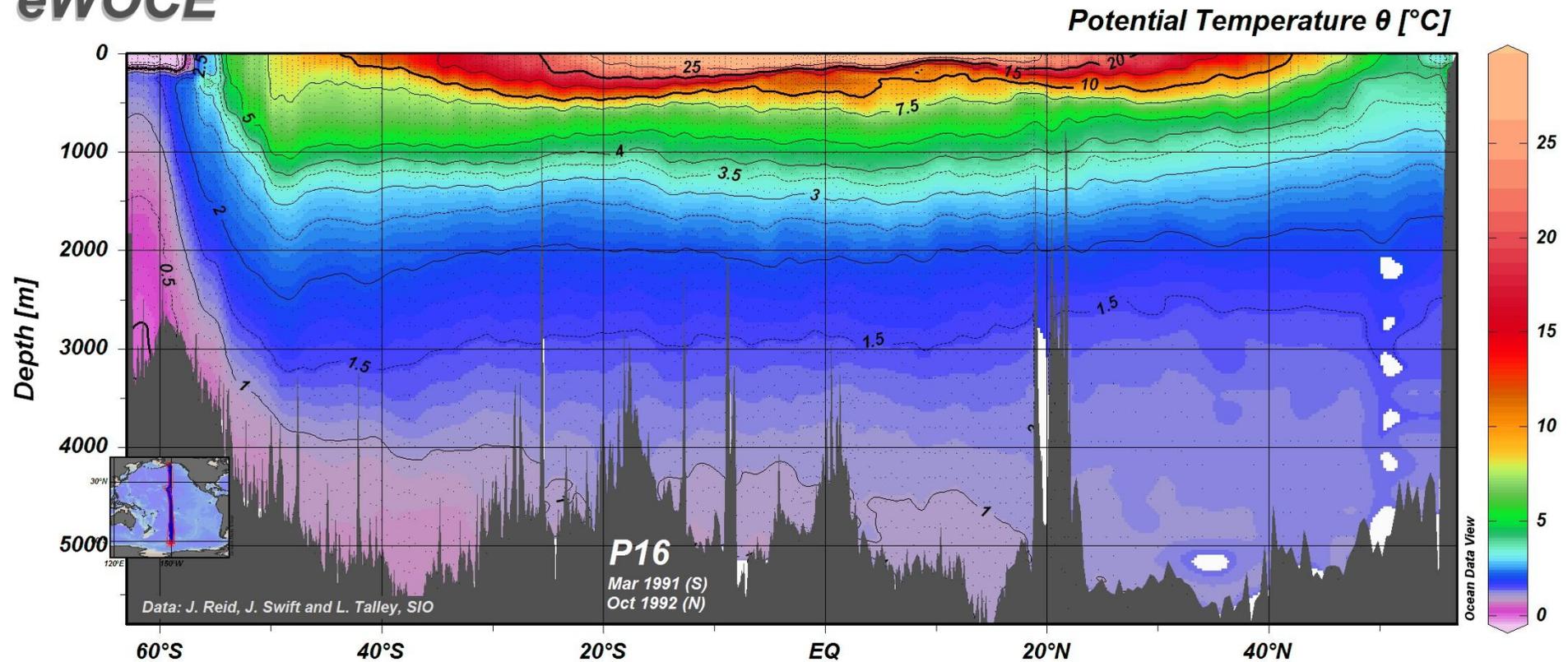
# Вертикальный разрез (соленость)



<http://www.ewoce.org>

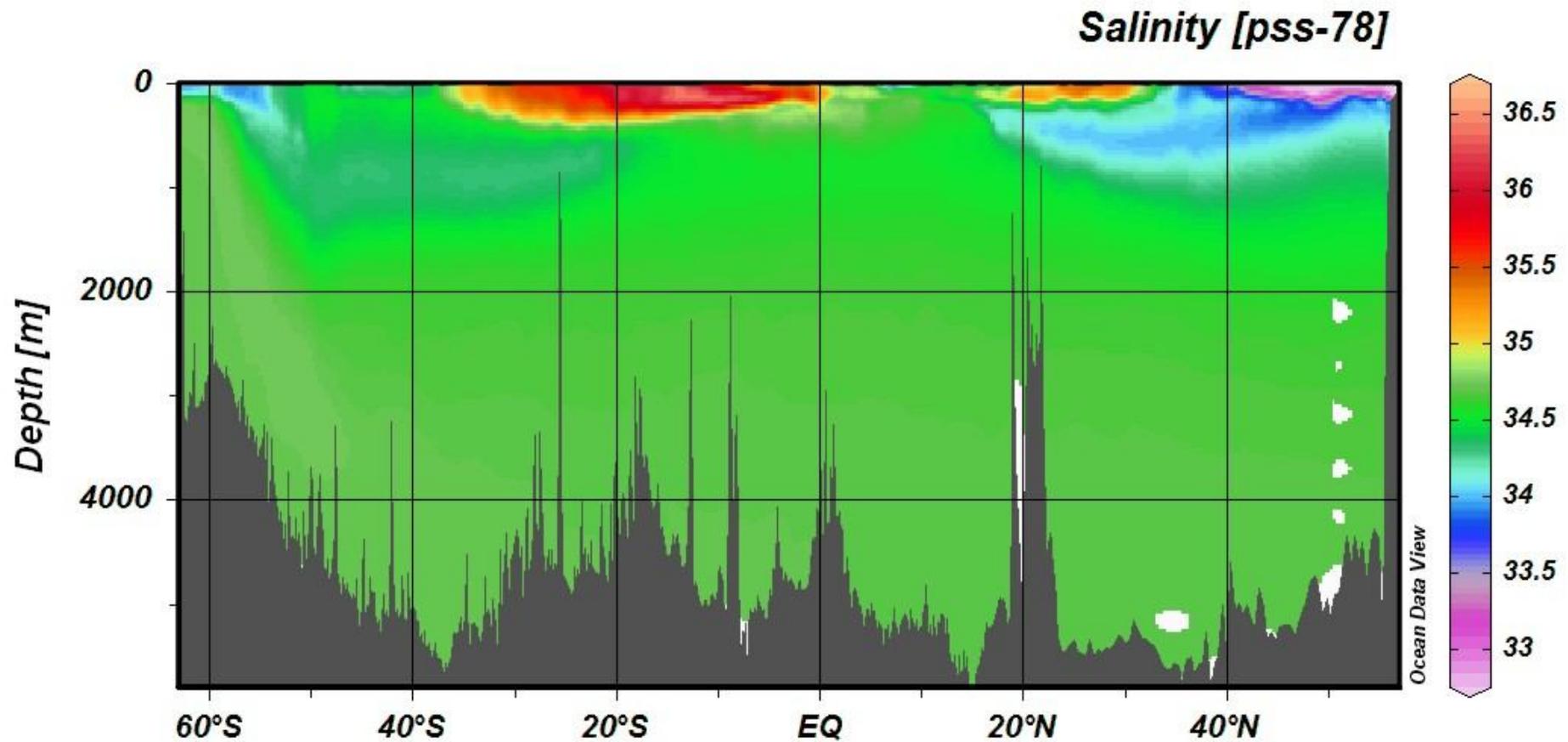
# Вертикальный разрез (температура)

eWOCE



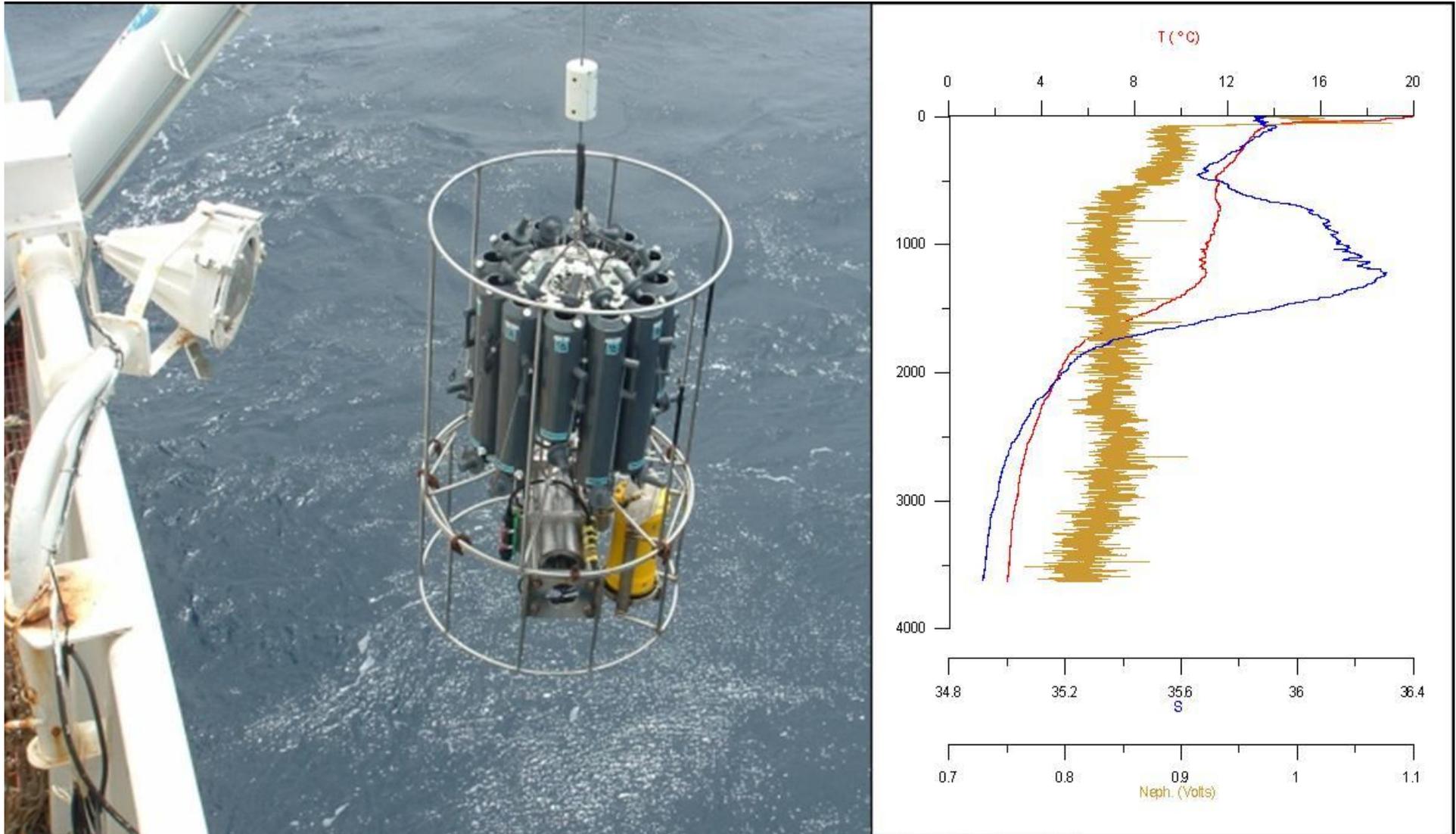
<http://www.ewoce.org>

# Вертикальный разрез (соленость)

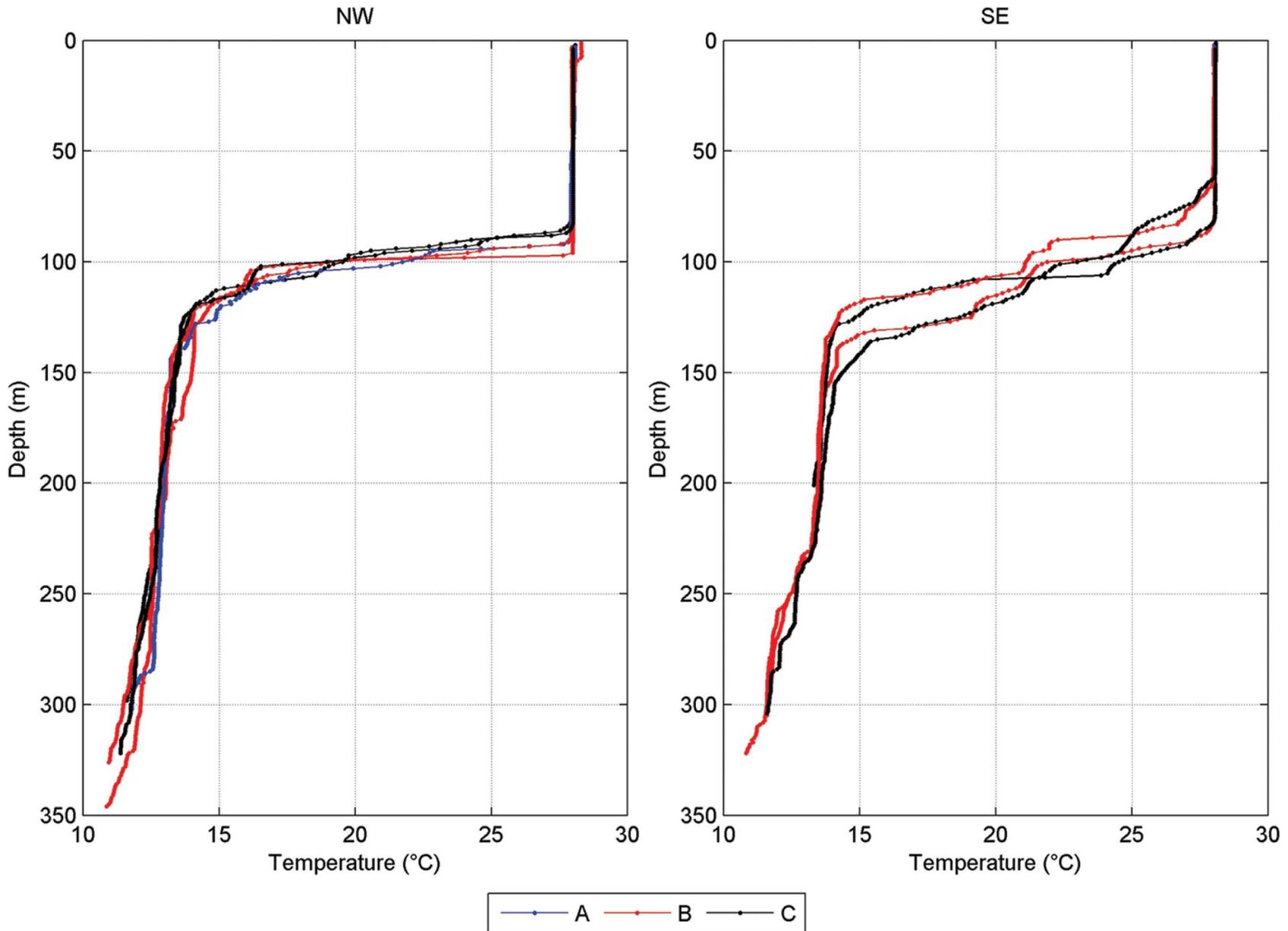


<http://www.ewoce.org>

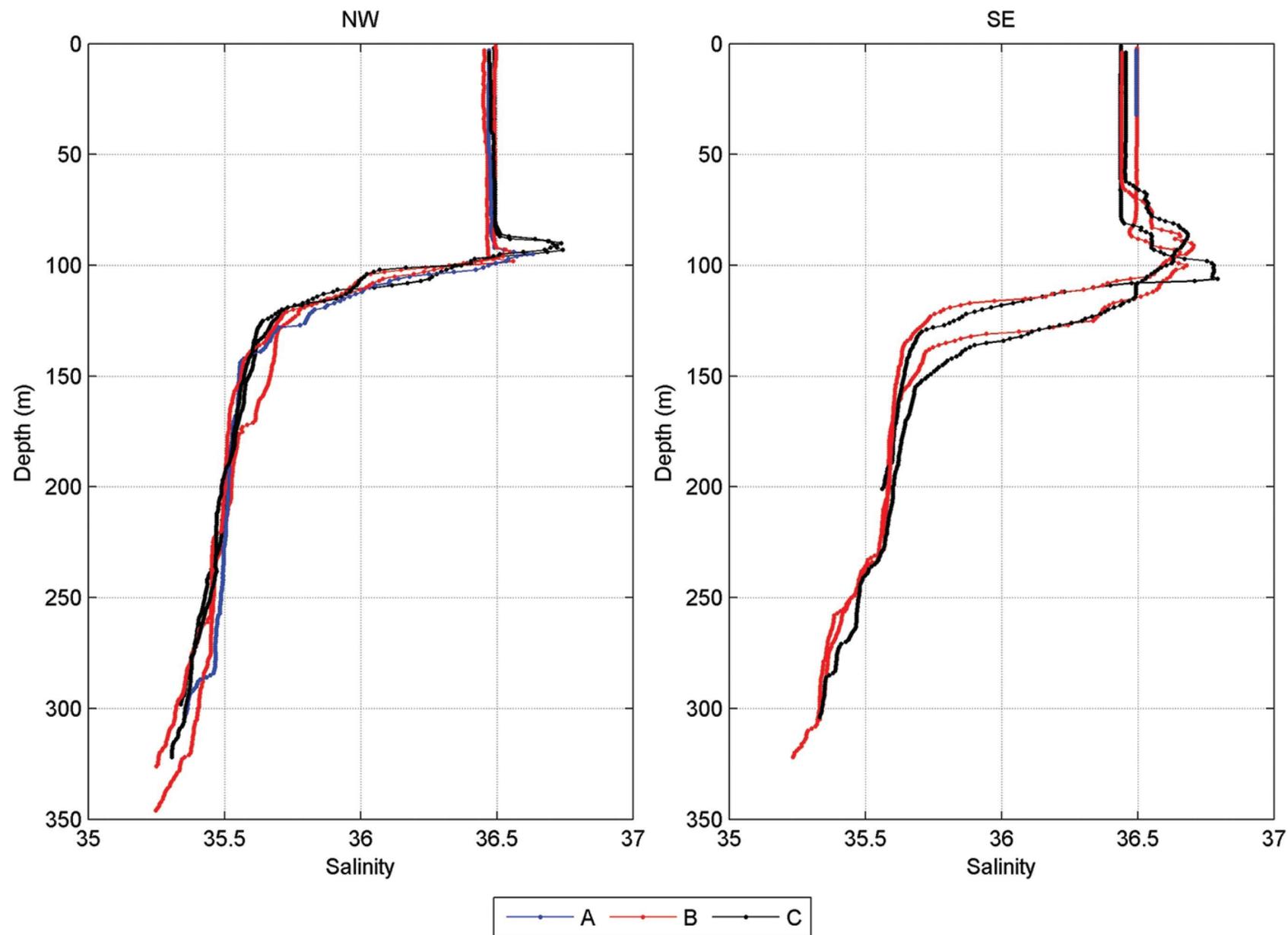
# СТД- зонд (CTD -conductivity, temperature, depth)



# Вертикальный профиль температуры (примеры регистрации)



# Вертикальный профиль солёности (примеры регистрации)



# Типичный вертикальный профиль температуры в океане

