

Введение в физику гидросферы

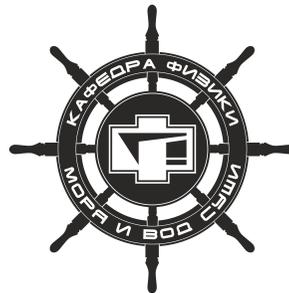
2026 Лекция №3

Носов Михаил Александрович

кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова



**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.

$$p = 101325 \text{ Па}$$

$$T = 273.16 \text{ К}$$

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

$$p_a = \rho_a R_a T$$

водяной
пар

$$e = \rho_w R_w T$$

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

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

Уравнение состояния влажного воздуха

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



- ❑ 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

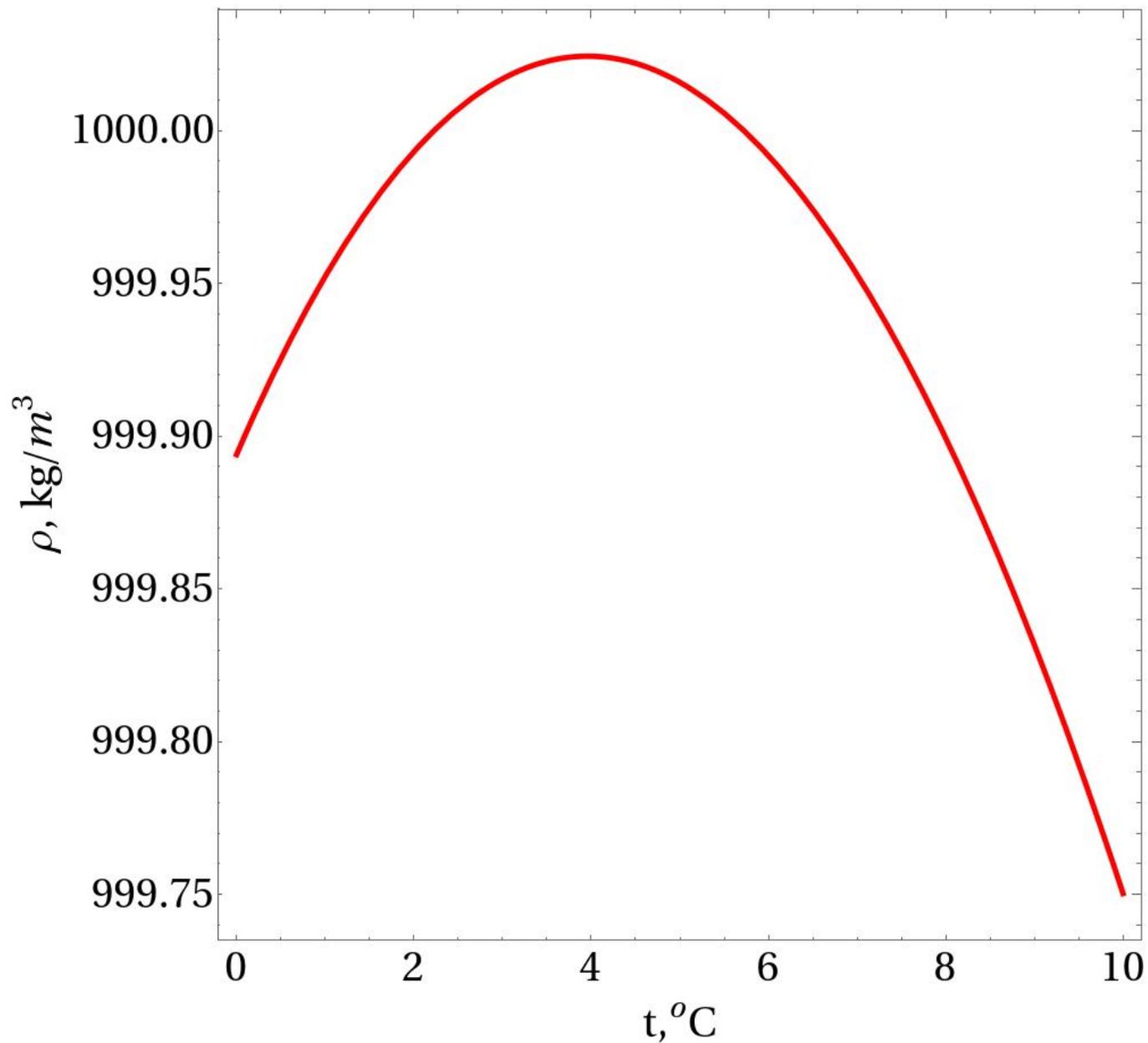
$$\rho = \rho(p, T, s)$$

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

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

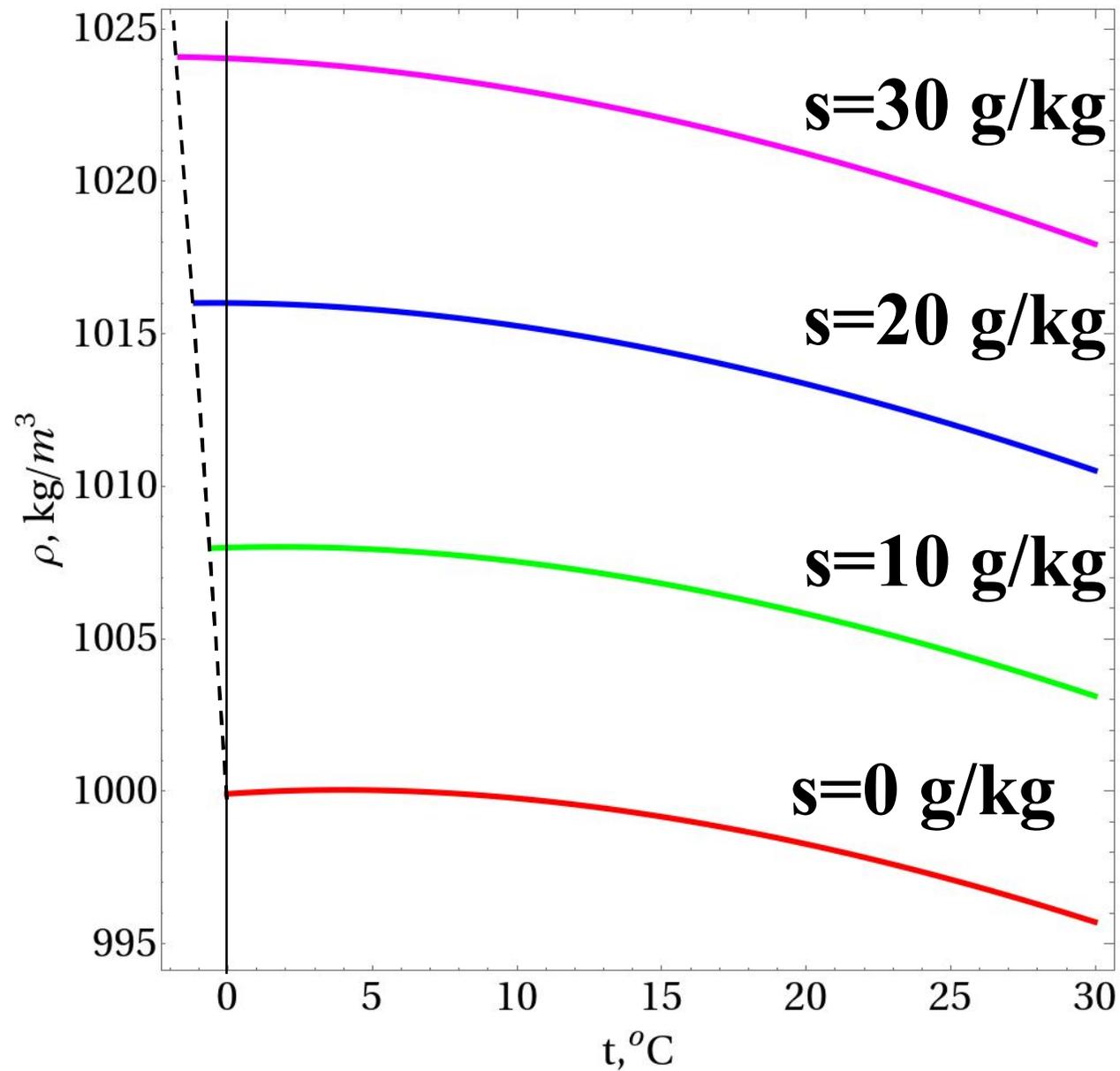
www.teos-10.org

TEOS-10 – уравнение для потенциала Гиббса

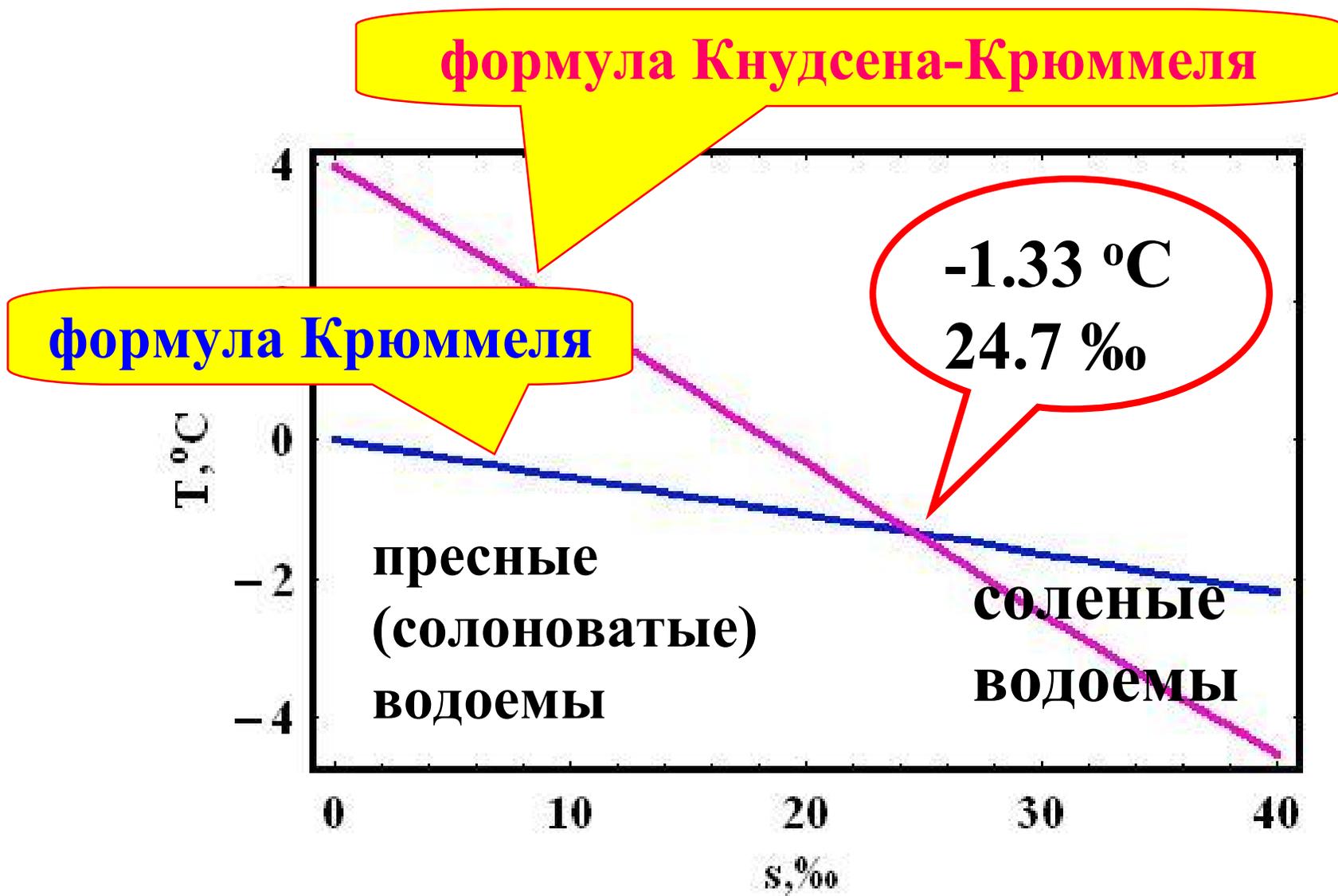


**у пресных (солонватых) вод существует
«температура максимальной плотности»**

Плотность морской воды как функция температуры и солености



Температура замерзания и максимальной плотности как функция солености



Уникальные свойства воды

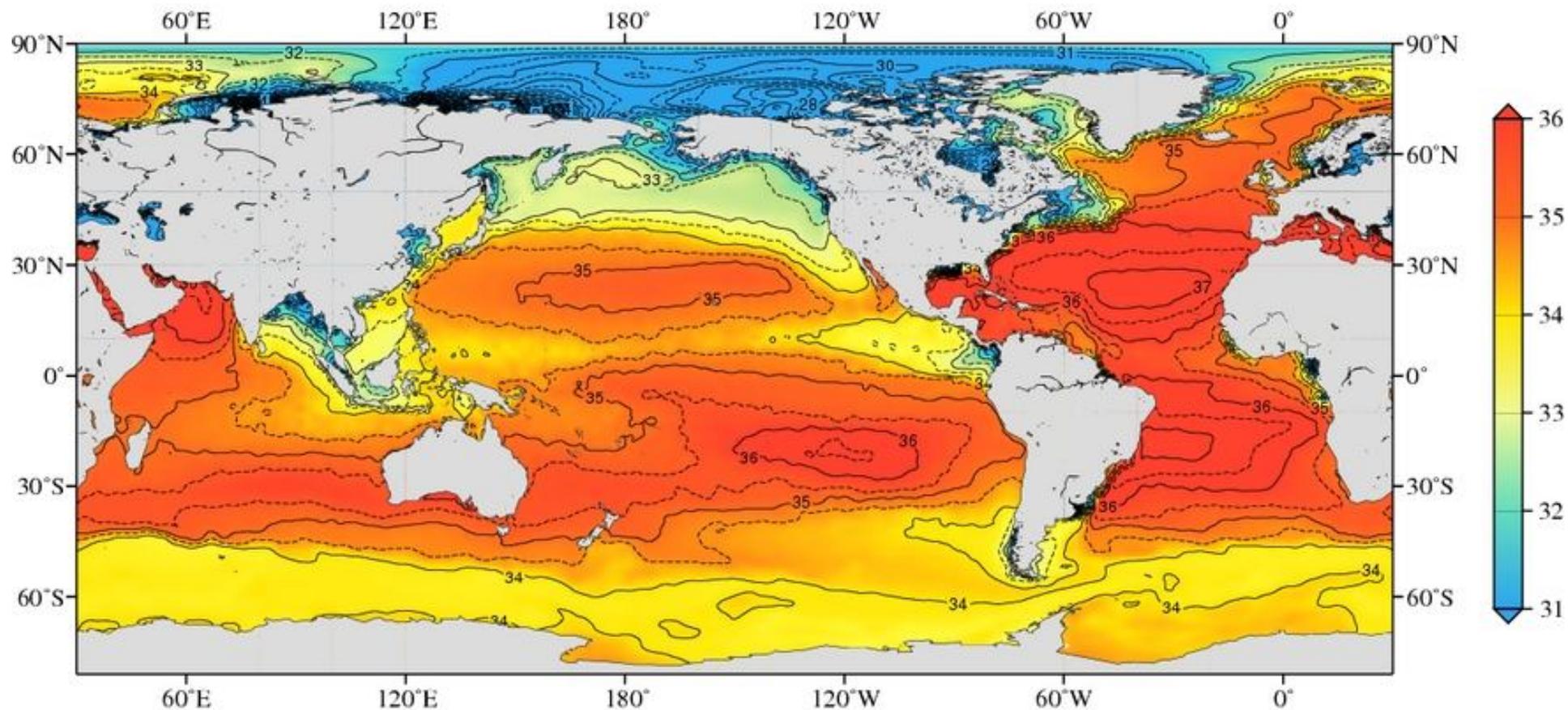
- 1. существование температуры максимальной плотности у пресных (солончатых) вод**
- 2. плотность льда < плотности воды**
917 кг/м³ 999.8 кг/м³
- 3. высокая теплоемкость воды и широкий диапазон существования жидкой фазы**
- 4. вода – эффективный растворитель**

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)

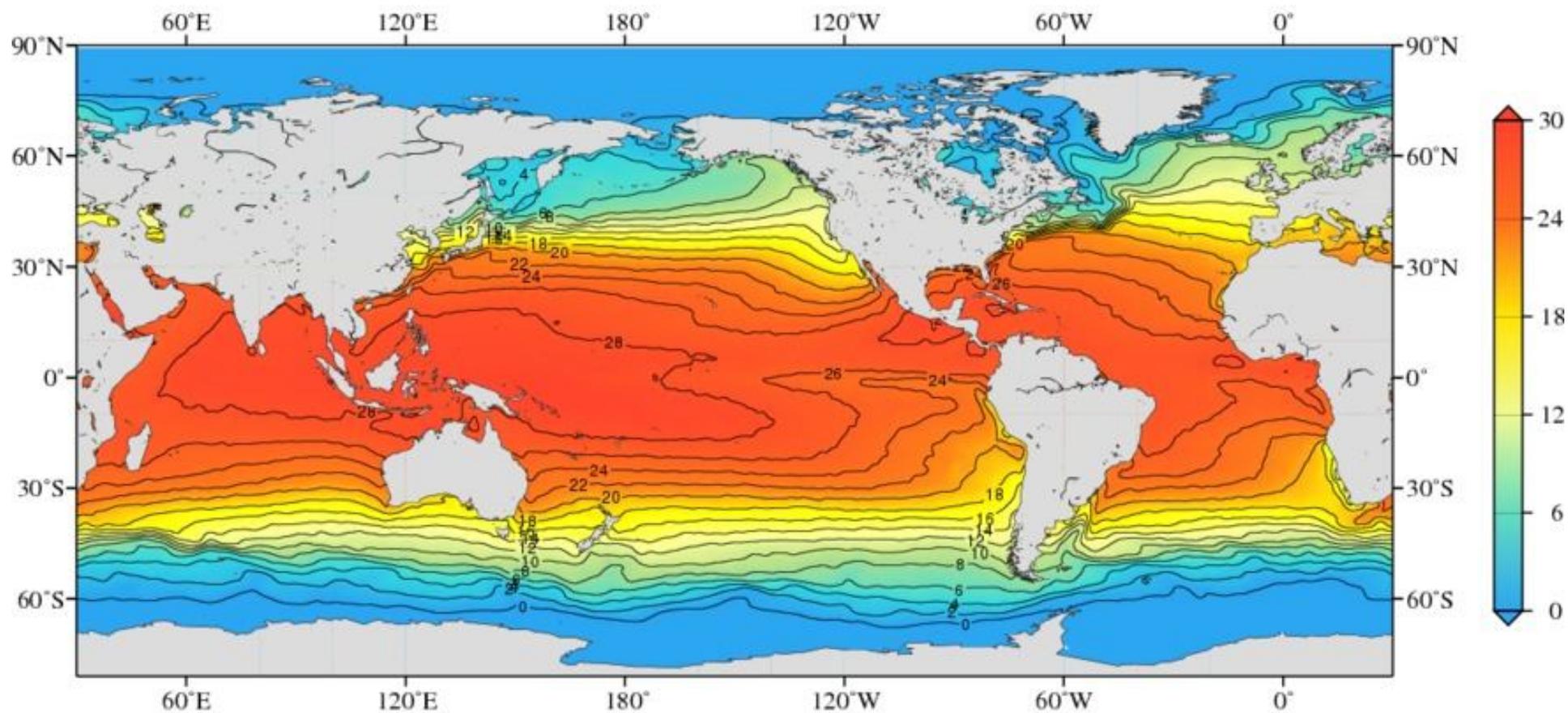
WORLD OCEAN ATLAS 2013 <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>

Среднегодовая температура поверхности Мирового океана

World Ocean Atlas Climatology

Decadal Average: 1955 - 2012

Contour Interval=2

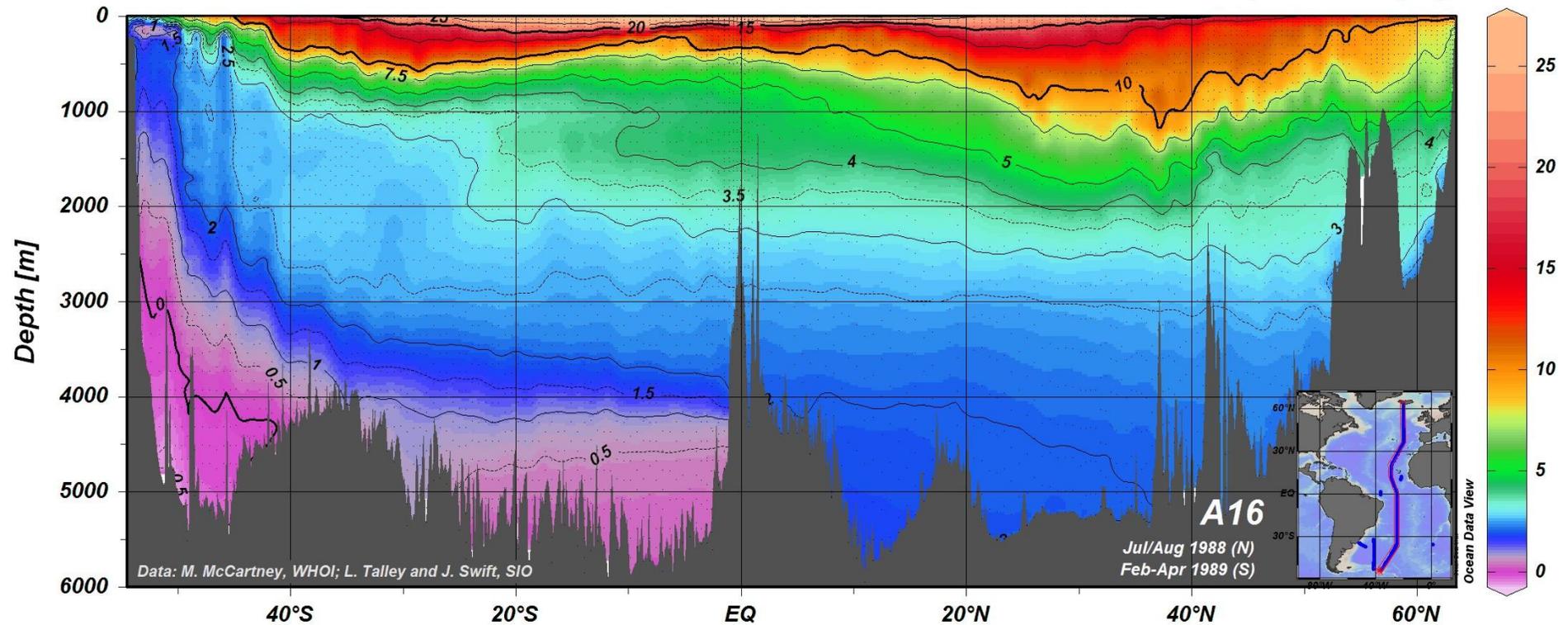


Annual temperature [°C] at the surface (quarter-degree grid)

Вертикальный разрез (температура)

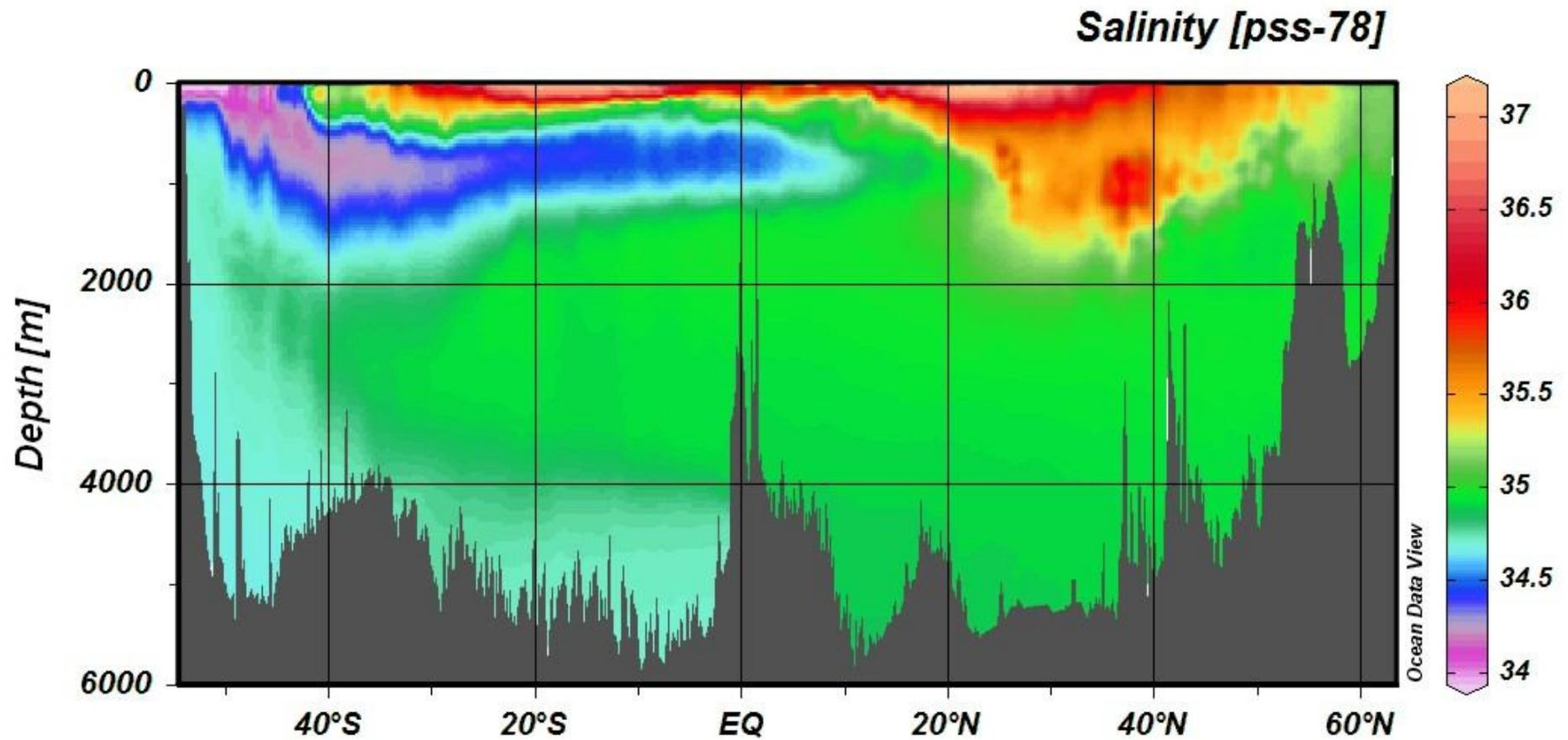
eWOCE

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



<http://www.ewoce.org>

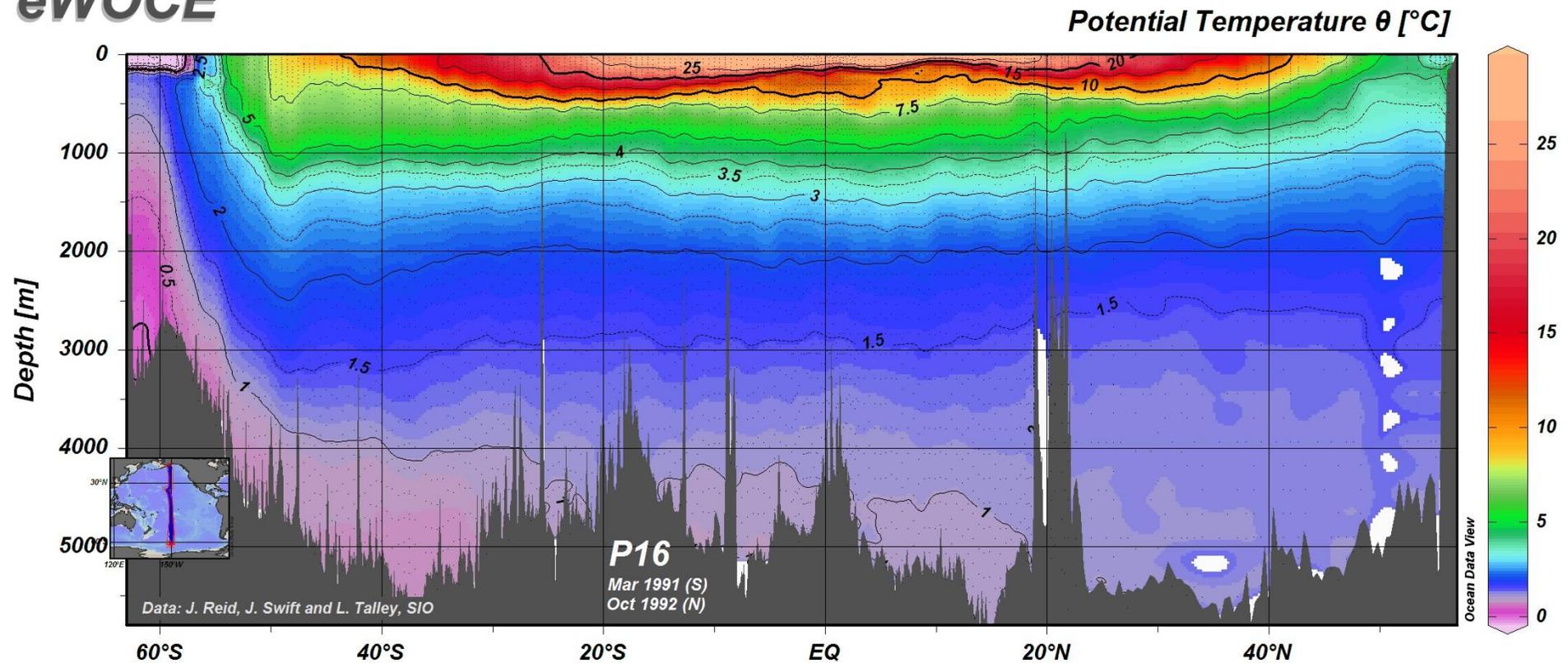
Вертикальный разрез (соленость)



<http://www.ewoce.org>

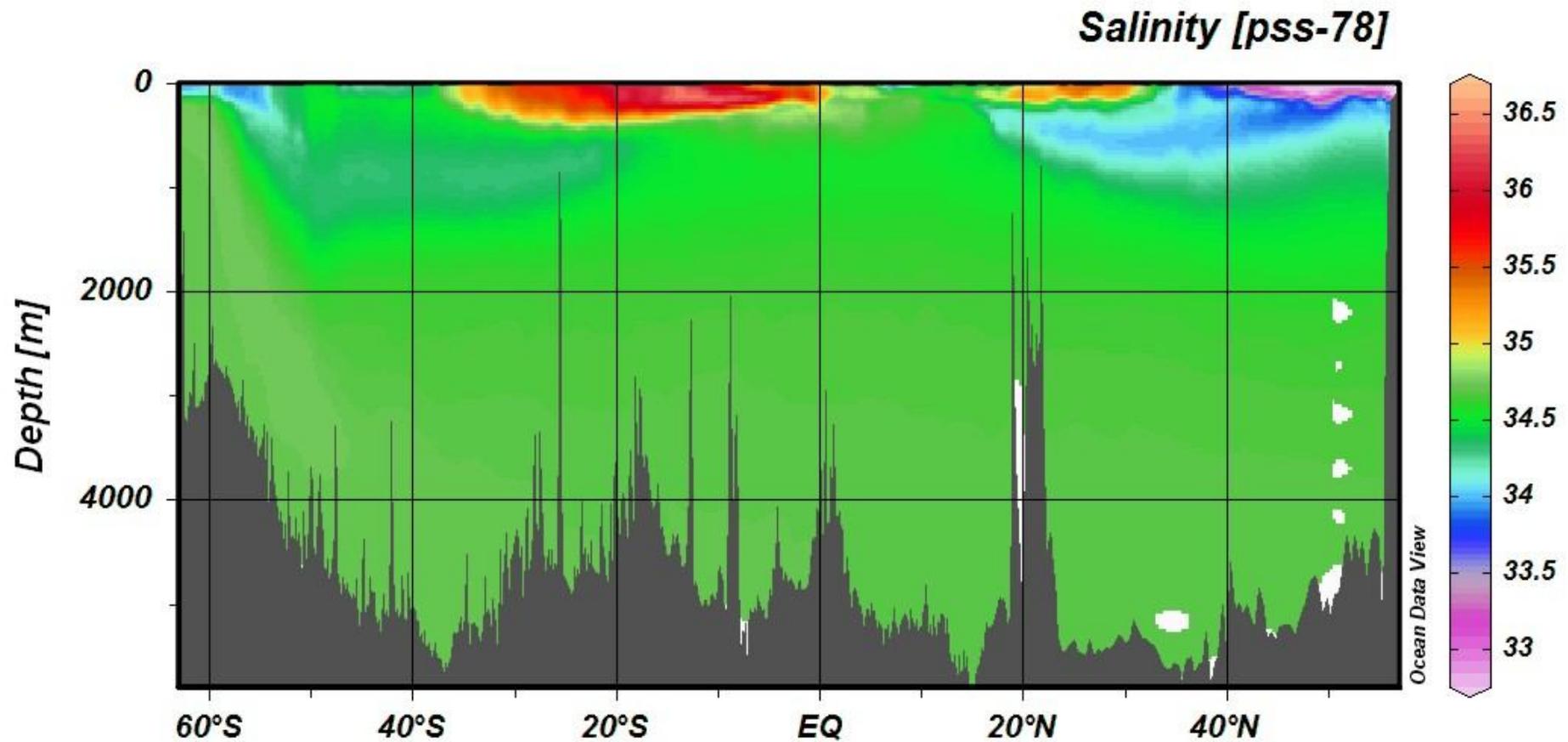
Вертикальный разрез (температура)

eWOCE



<http://www.ewoce.org>

Вертикальный разрез (соленость)

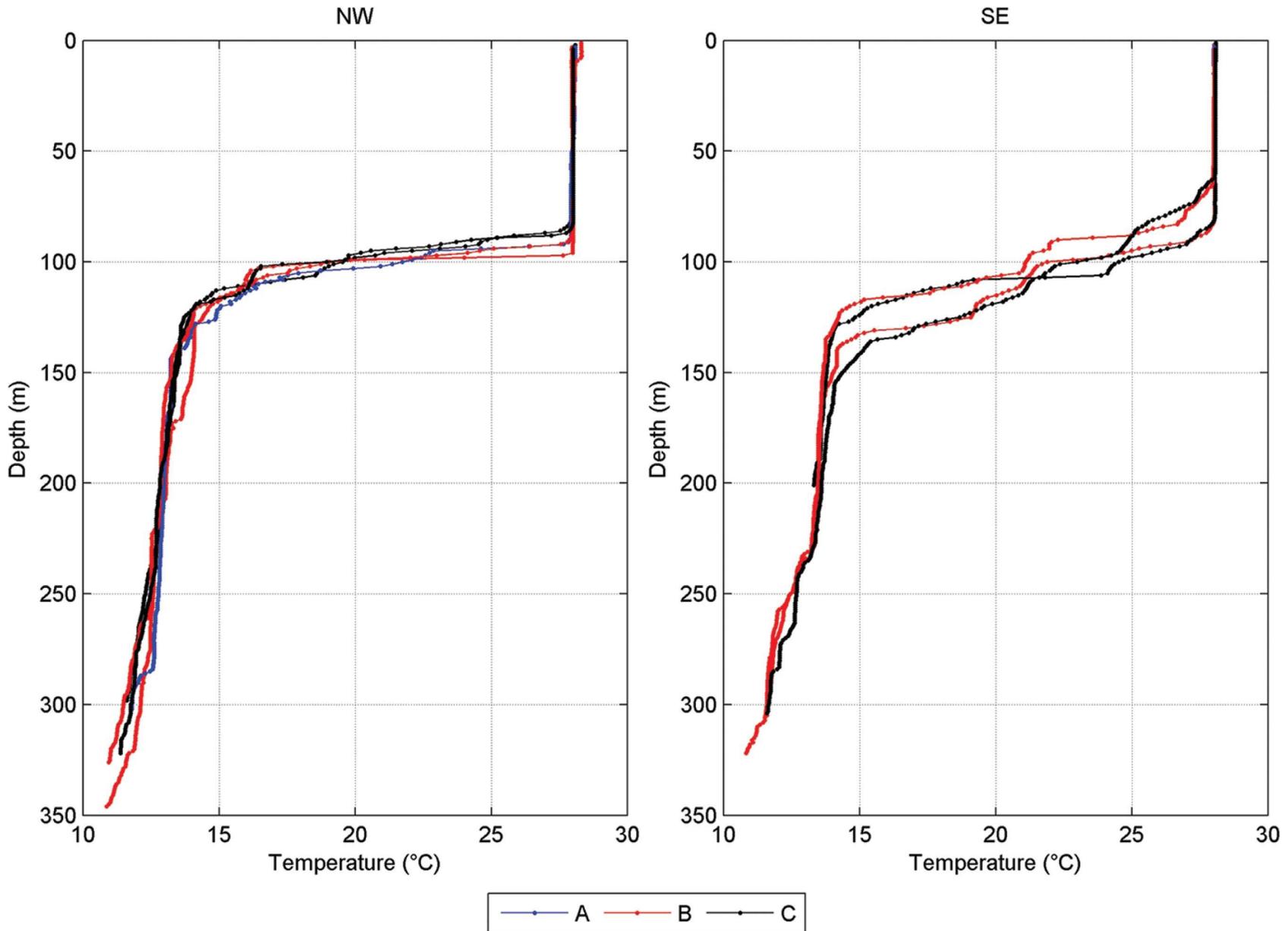


<http://www.ewoce.org>

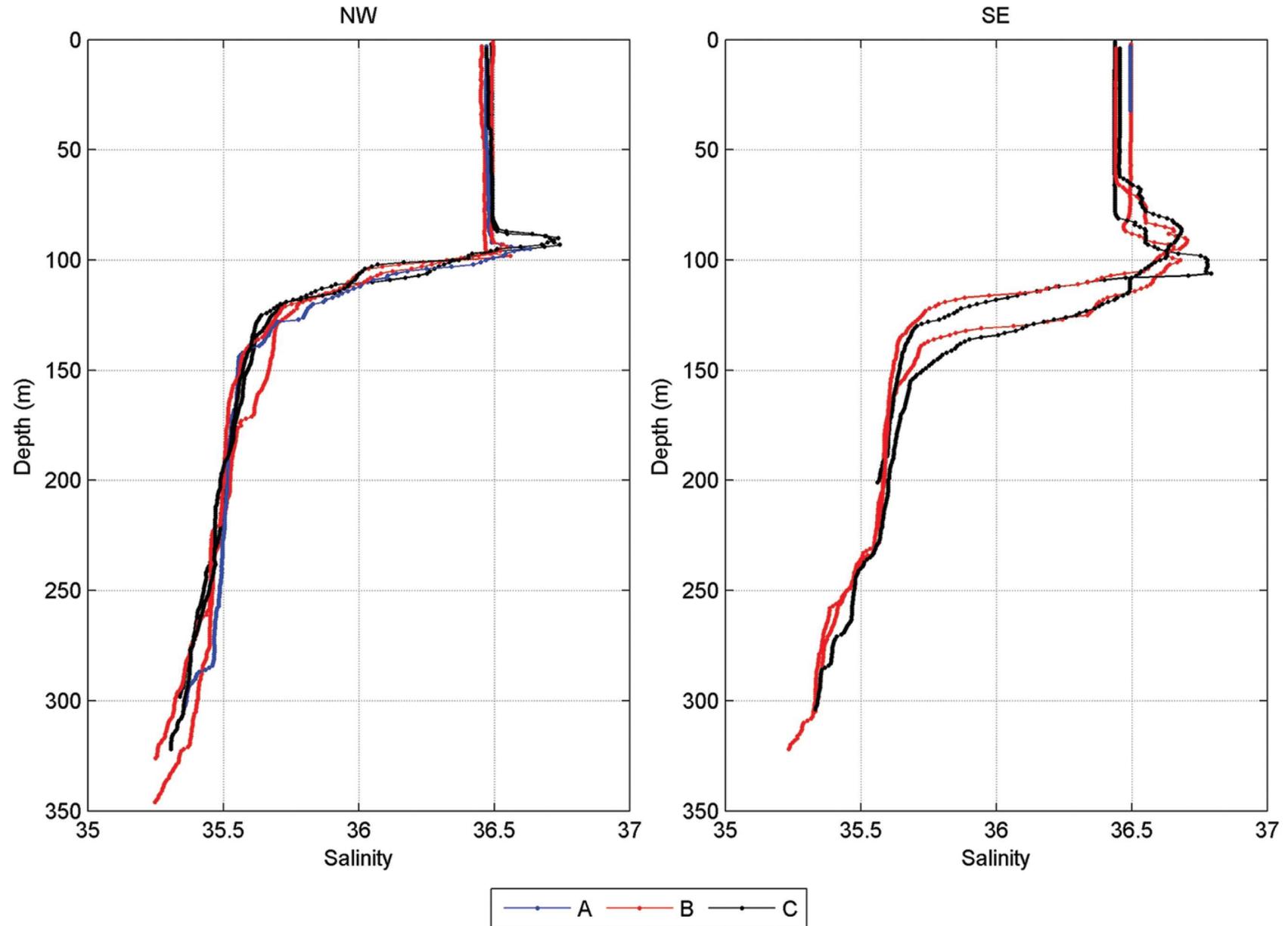
СТД- зонд (CTD -conductivity, temperature, depth)



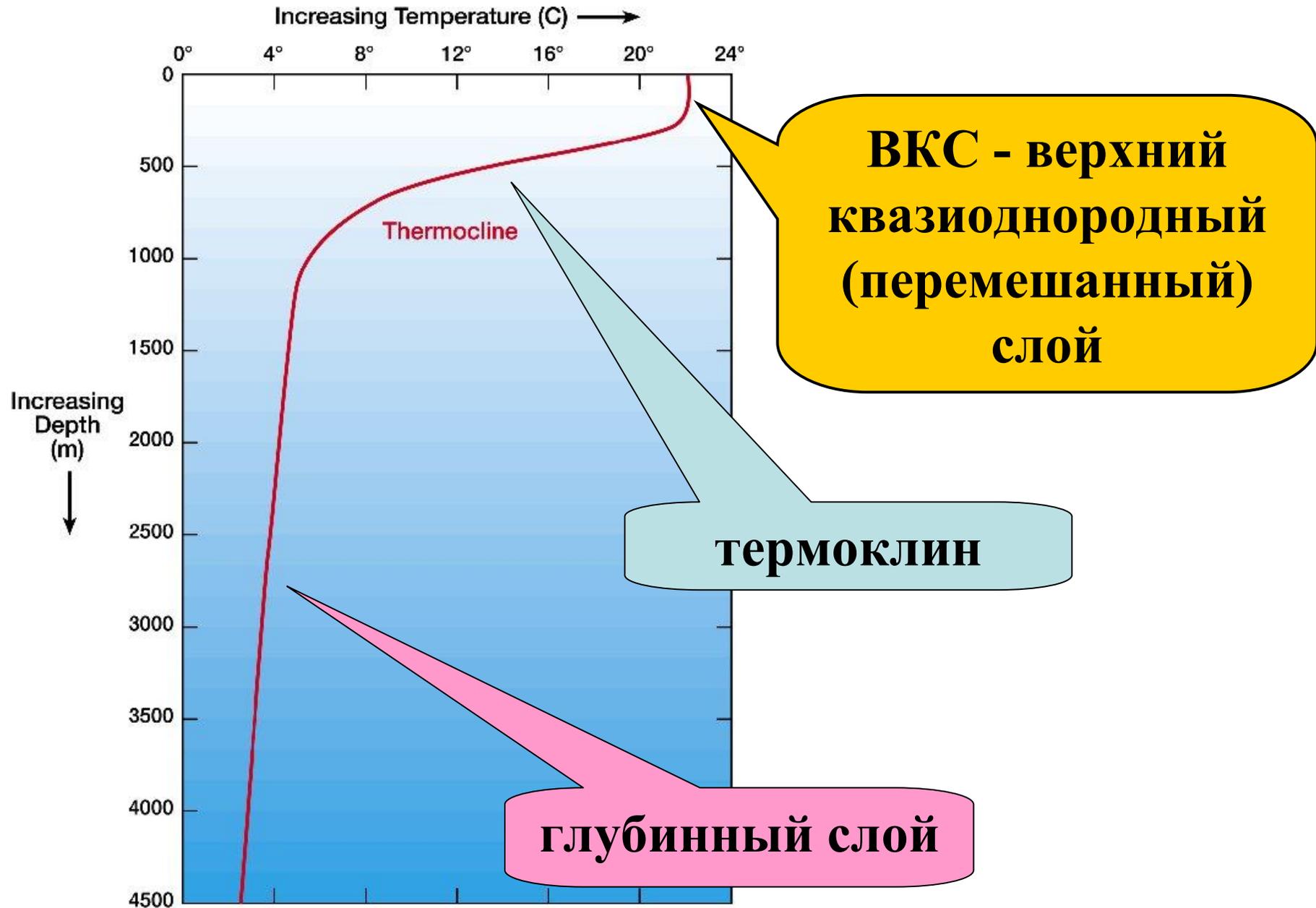
Вертикальный профиль температуры (примеры регистрации)



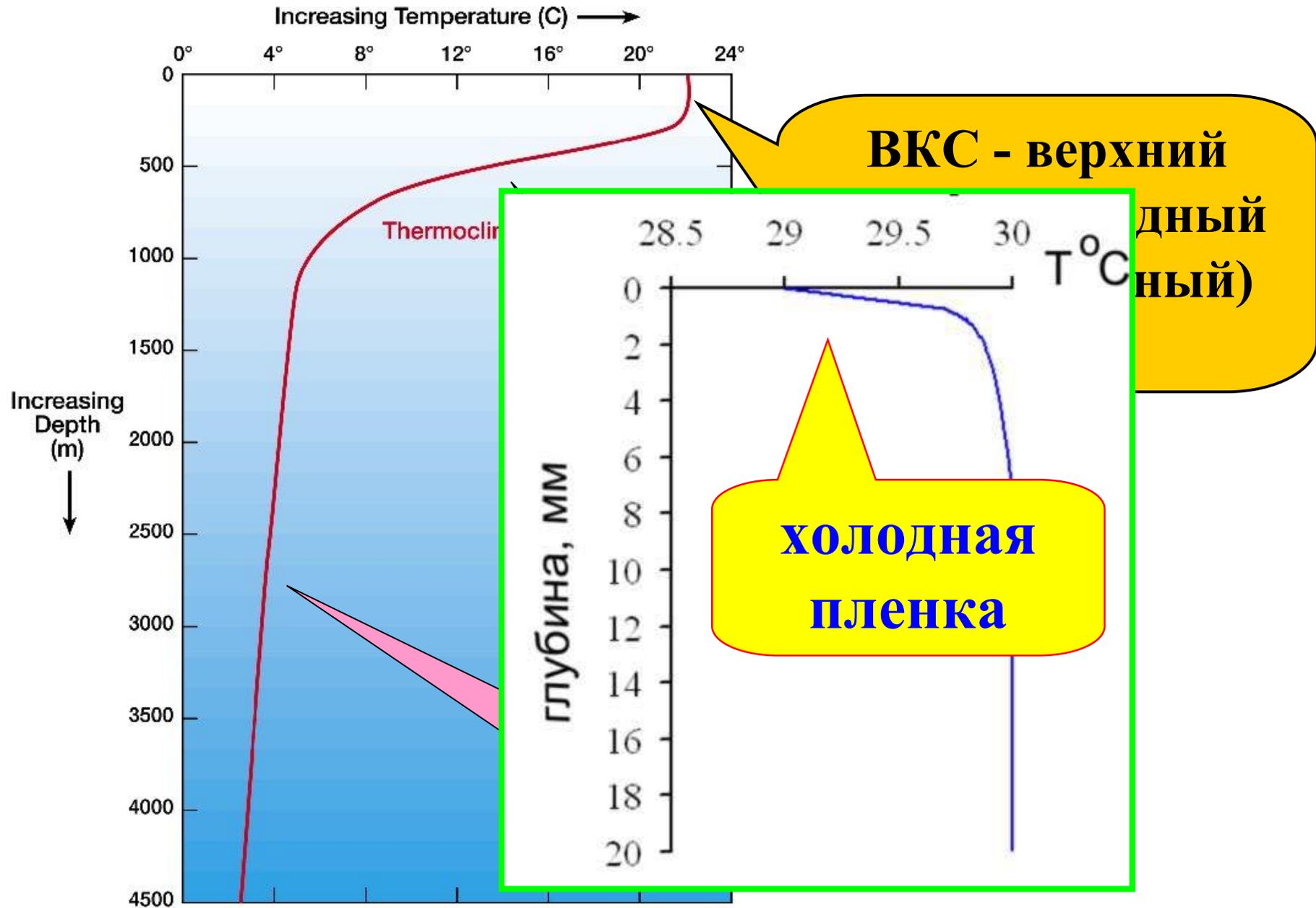
Вертикальный профиль солёности (примеры регистрации)



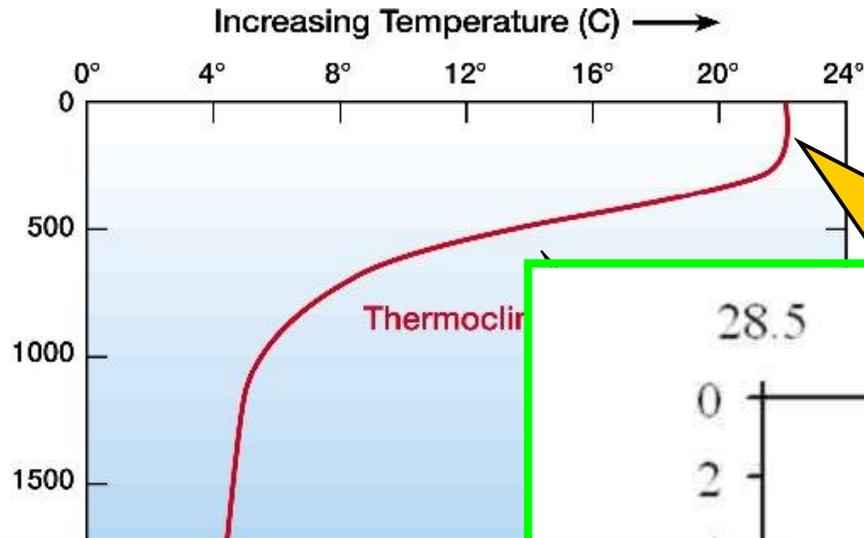
Типичный вертикальный профиль температуры в океане



Типичный вертикальный профиль температуры в океане

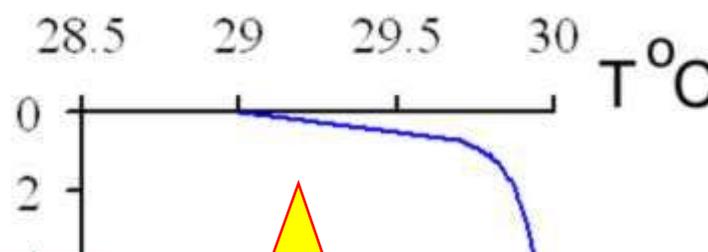


Типичный вертикальный профиль температуры в океане



ВКС - верхний

**ДНЫЙ
ный)**



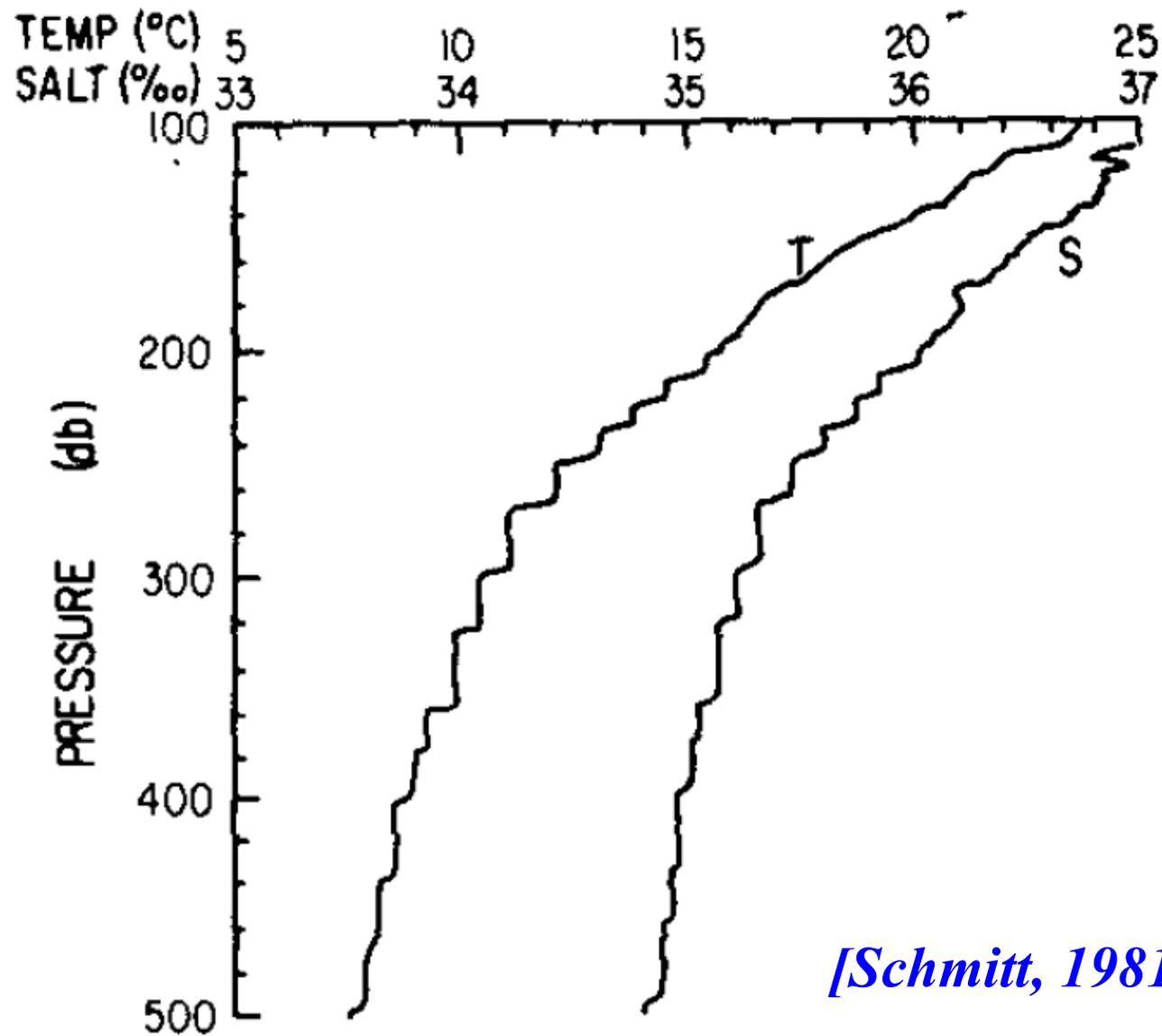
**ХОЛОДНАЯ
ПЛЕНКА**

$$\vec{q} = -\kappa \cdot \vec{\nabla} T = -\kappa \cdot \frac{dT}{dz}$$

$$\kappa \approx 0.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

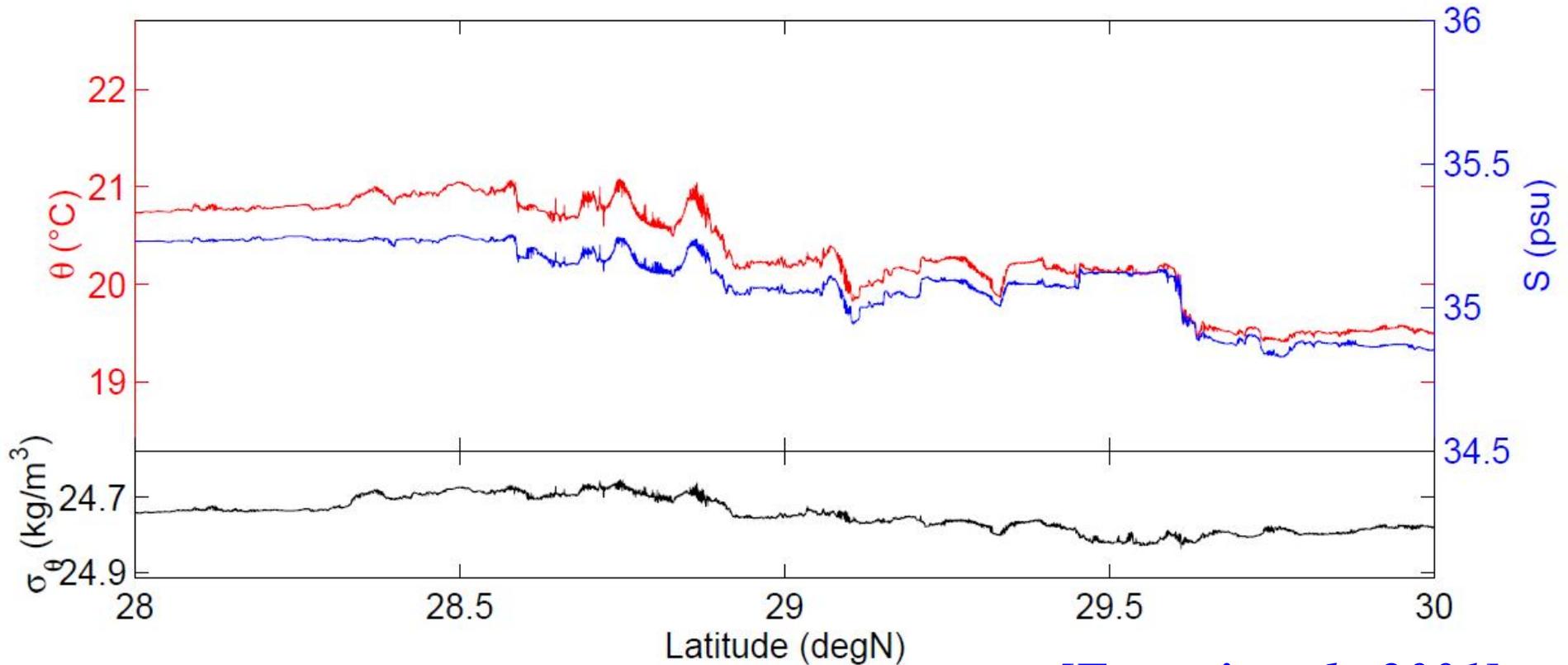
$$|\vec{q}| = 500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \Rightarrow \frac{dT}{dz} \approx 830 \frac{\text{К}}{\text{м}}$$

Тонкая структура в океане



[Schmitt, 1981]

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



[Ferrari et al., 2001]

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

Элементы теории климата

- ❑ **Климатом** называется статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой «Океан-Суша-Атмосфера» за период в несколько десятилетий (~30 лет)
- ❑ **Погода** – мгновенное состояние атмосферы

Блоки климатической системы (проявление сезонных колебаний)

Атмосфера в целом

Малоинерционный блок, приспособляющийся к состоянию океана и суши

Масса=1

Теплоемкость = 1

+ ледяные щиты
⇒
высокая тепловая инерция

**Верхний «деятельный»
слой океана ~250 м**

Самое инерционное звено

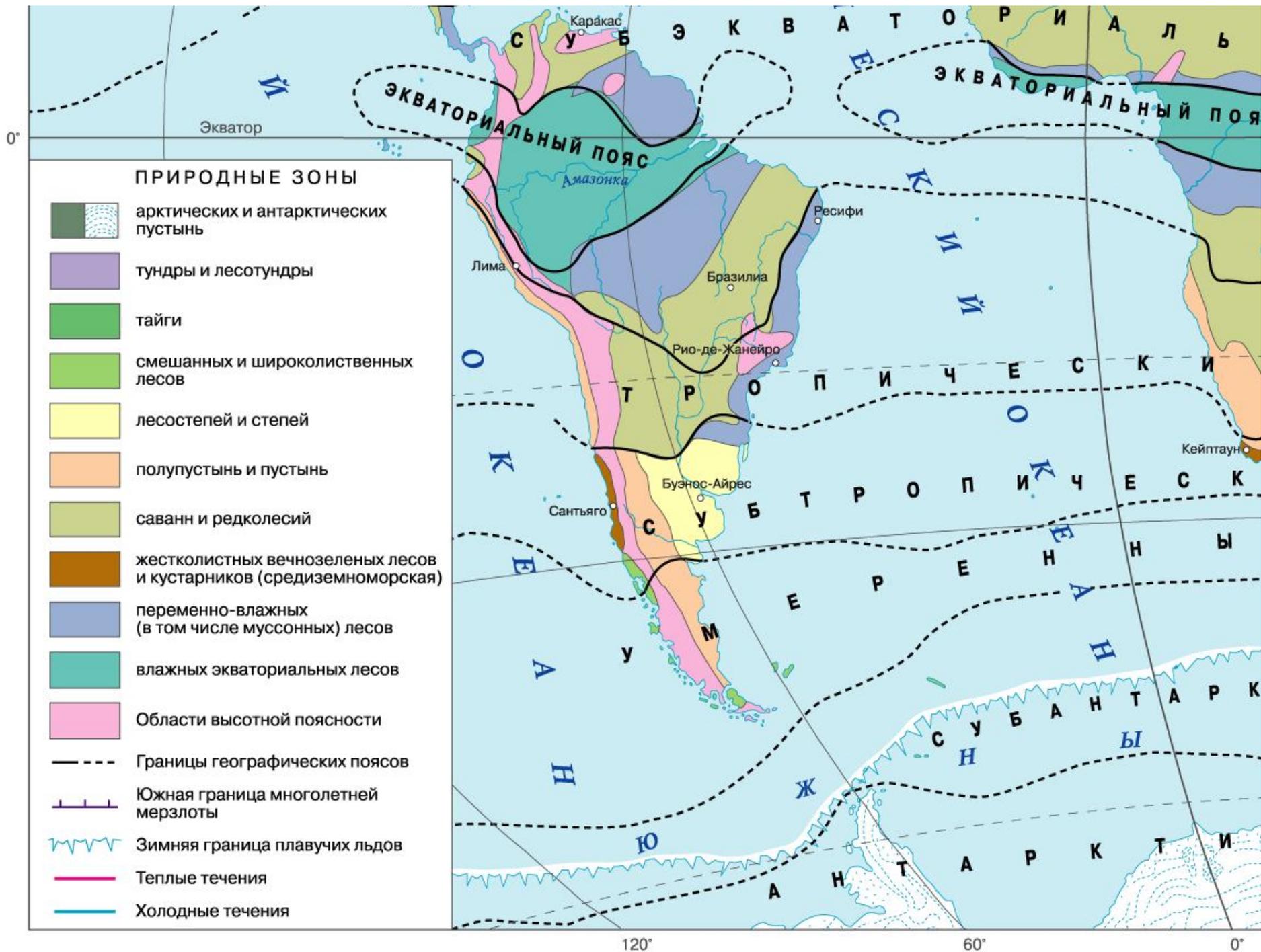
Масса = 16.4

Теплоемкость = 70

**Верхний «деятельный»
слой суши ~10 м**

Масса=0.55

Теплоемкость = 0.46



- ❑ **Климатом** называется статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой «Океан-Суша-Атмосфера» за период в несколько десятилетий (~30 лет)
- ❑ **Погода** – мгновенное состояние атмосферы
- ❑ Климат **НЕ ЯВЛЯЕТСЯ** некоторым устойчивым средним состоянием, флуктуации которого - второстепенные характеристики
- ❑ Климат подвержен хаотичной изменчивости