

Введение в физику гидросферы

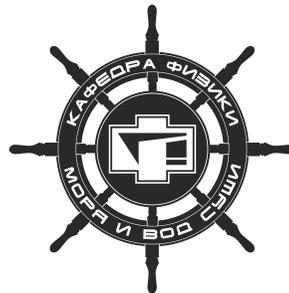
2025 Лекция №2

Носов Михаил Александрович

кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

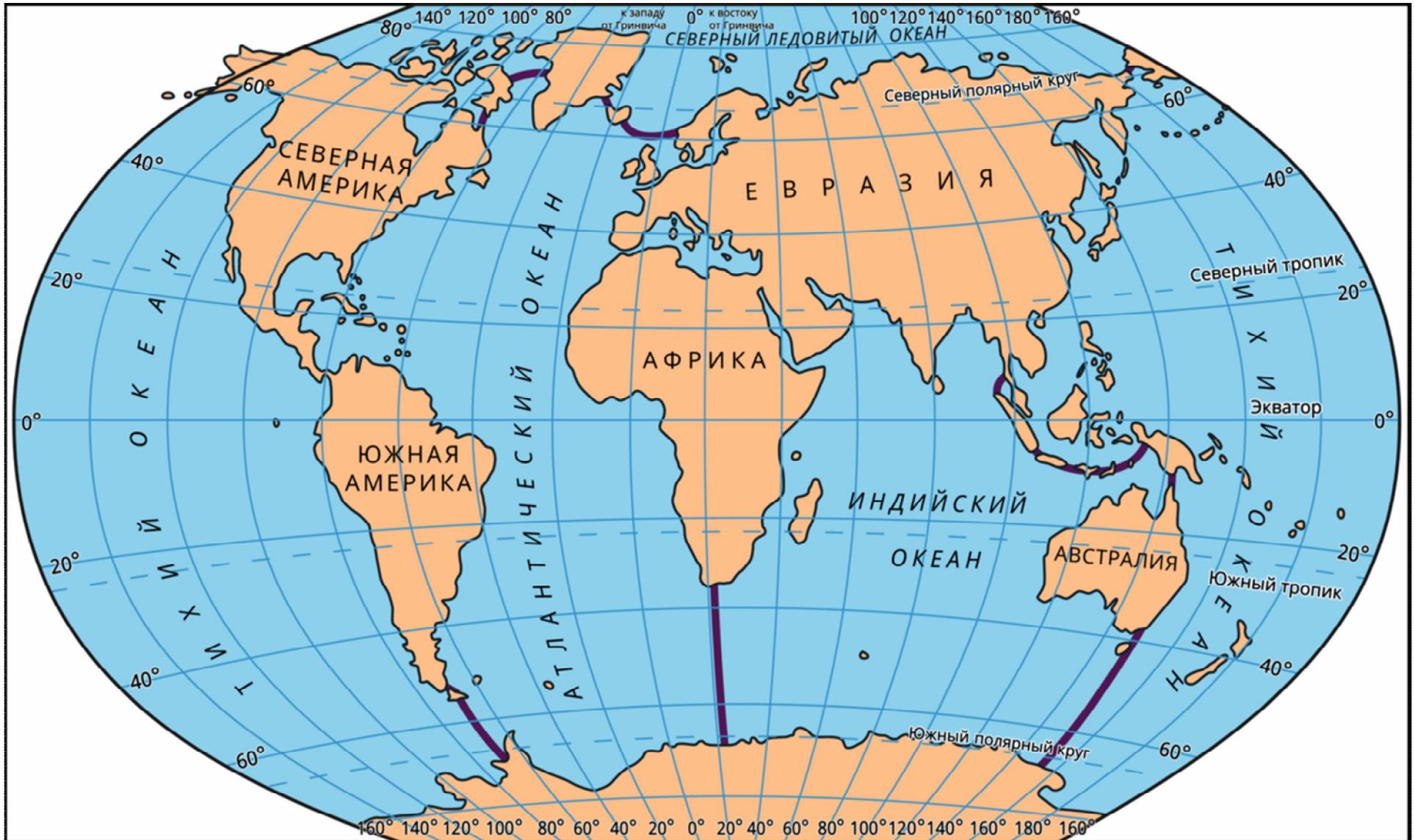
физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова



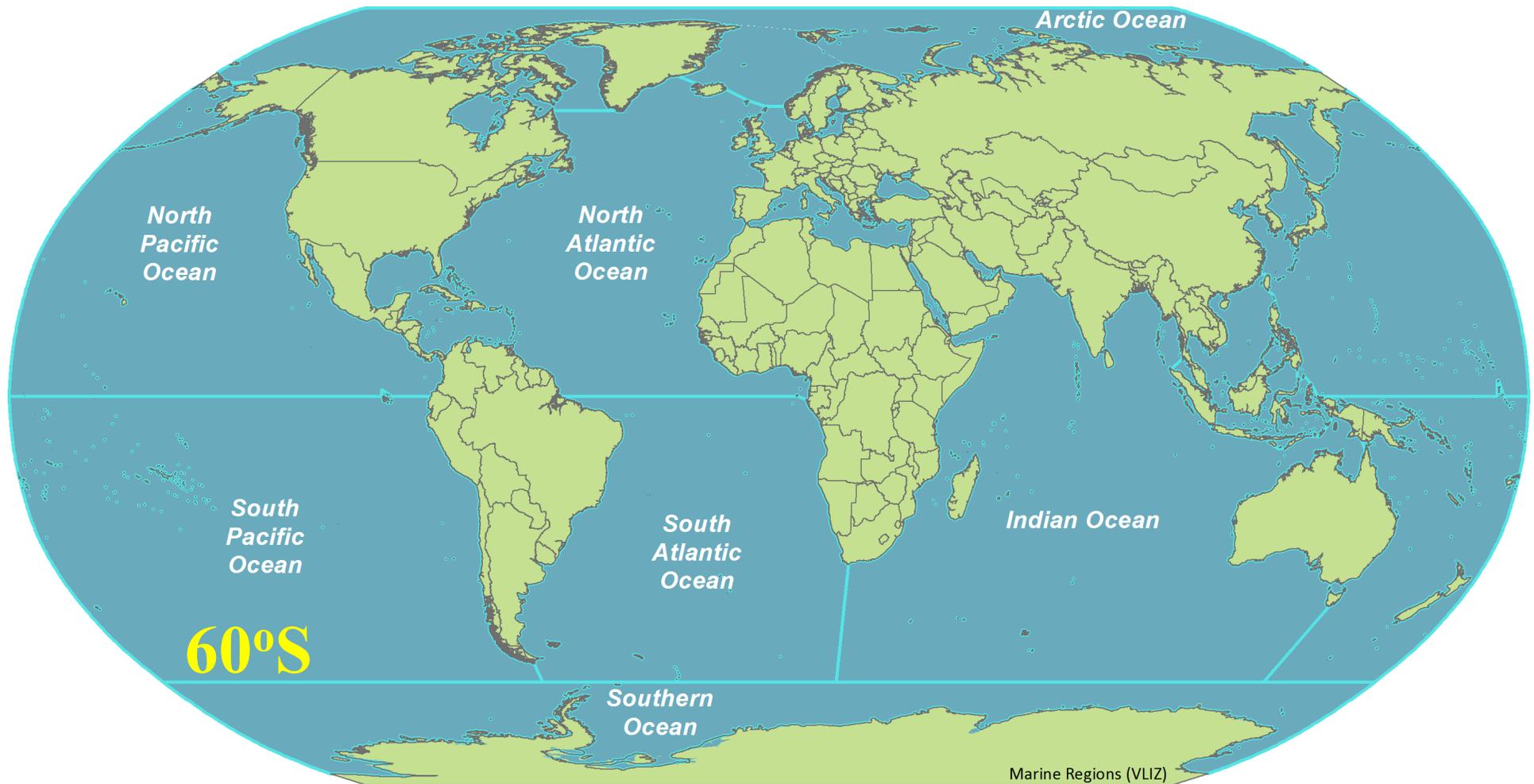
Гидросфера — прерывистая водная оболочка Земли, располагающаяся между атмосферой и твёрдой земной корой (литосферой) и представляющая собой совокупность океанов, морей и поверхностных вод суши.

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.



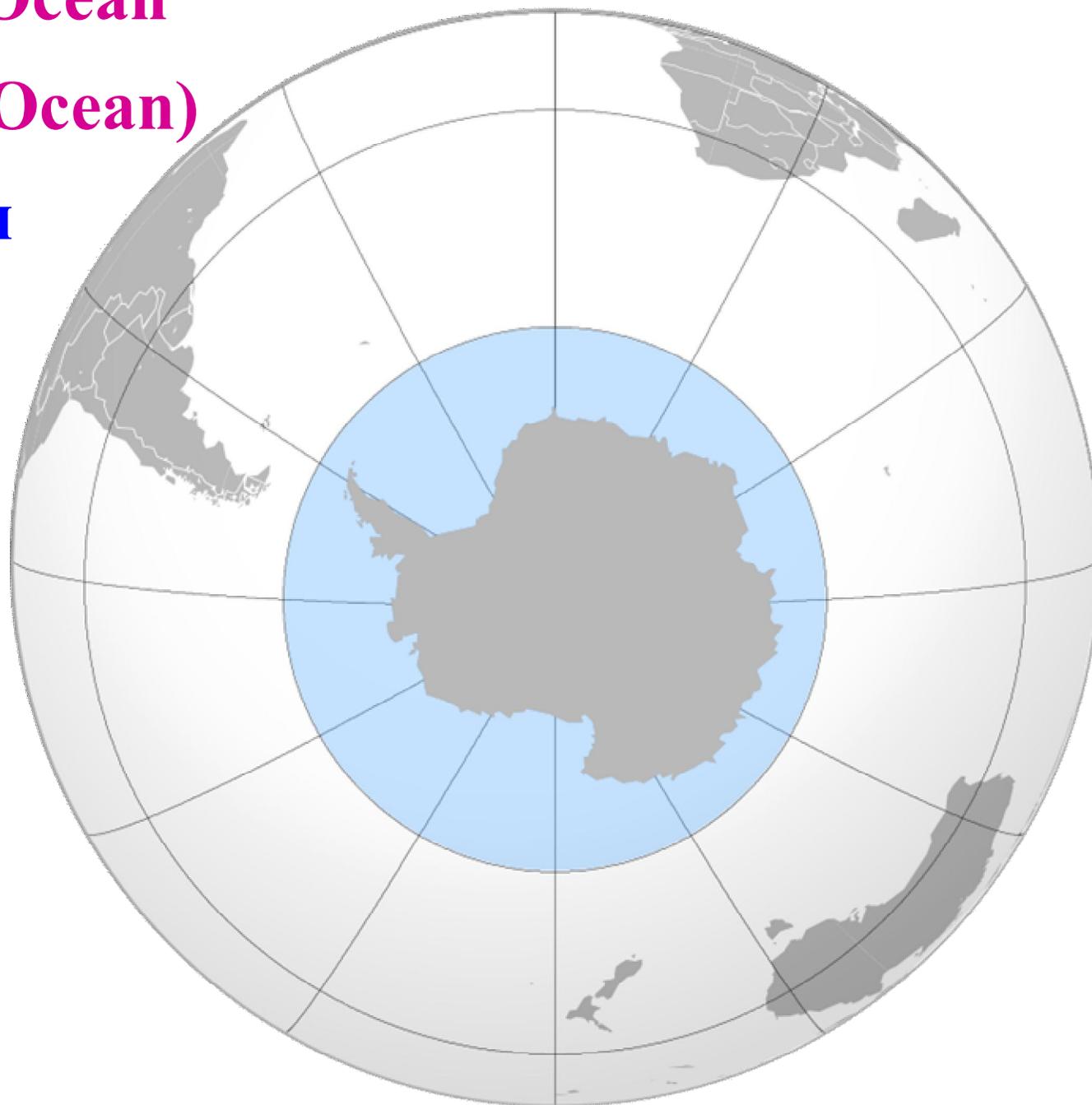
Границы океанов



International Hydrographic Organization, 2000

**The Southern Ocean
(the Antarctic Ocean)**

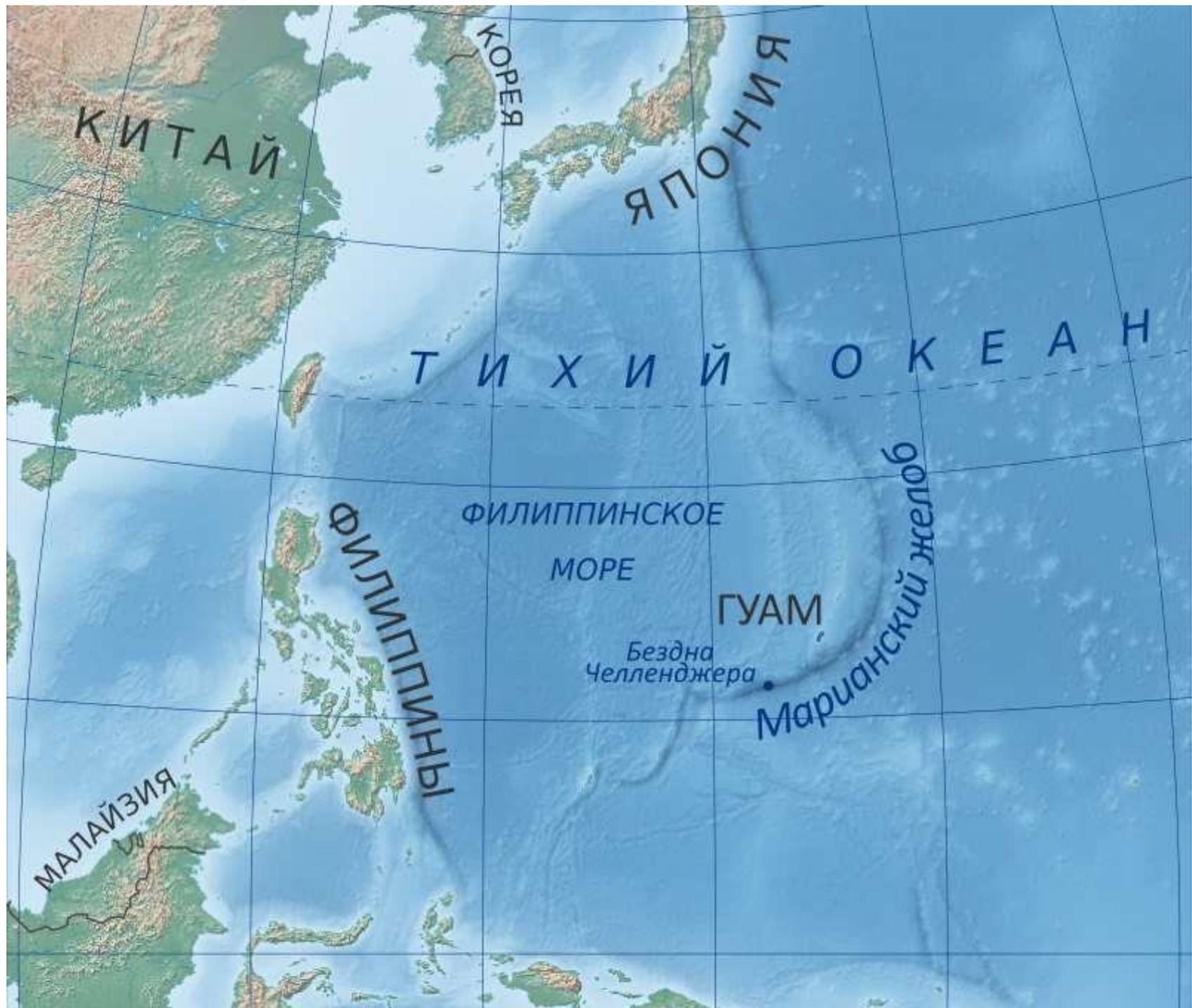
**Южный океан
(южнее 60°S)**



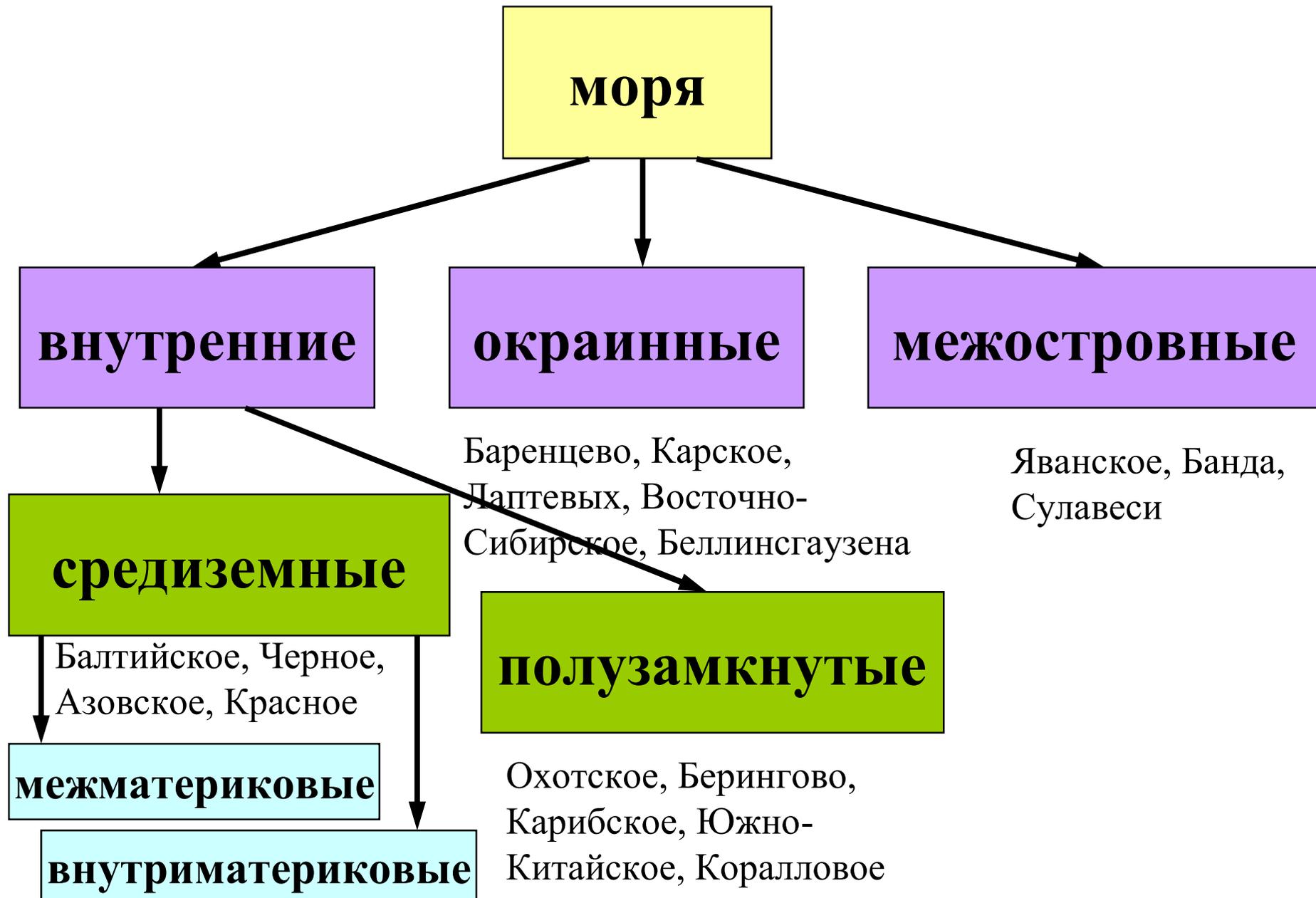
Море — часть Мирового океана, более или менее обособленная сушей или возвышениями подводного рельефа и отличающаяся от открытой части океана главным образом гидрологическим, метеорологическим и климатическим режимом.

Условно морем называют также некоторые открытые части океанов, как, например, Саргассово море в северной части Атлантического океана и Филиппинское море в западной части Тихого океана. Некоторые озёра — Аральское, Мёртвое — называются морями.





Классификация морей



Внутренние моря — моря, глубоко вдающиеся в сушу и сообщающиеся с океаном или прилегающим морем одним или несколькими проливами. Находятся под большим влиянием суши, в некоторых морях поверхностные воды сильно распреснены обильным речным стоком (например, Балтийское море, Чёрное море, Азовское море), в других — имеют повышенную солёность в результате воздействия засушливого климата и слабого влияния материкового стока наряду с большим испарением (например, Красное море, Средиземное море).

Средиземные моря — моря, сильно вдающиеся в сушу и соединяющиеся с океаном посредством одного или нескольких проливов. Разделяются на внутриматериковые и междуматериковые — в зависимости от того, окружены ли они сушей одного материка (например, Балтийское море) или расположены между 2 материками (Средиземное море, Красное море и др.). По сравнению с др. морями характеризуются наибольшей обособленностью и в связи с этим наибольшим своеобразием гидрологического режима, на который существенное влияние оказывает окружающая их суша.

внутренние

средиземные

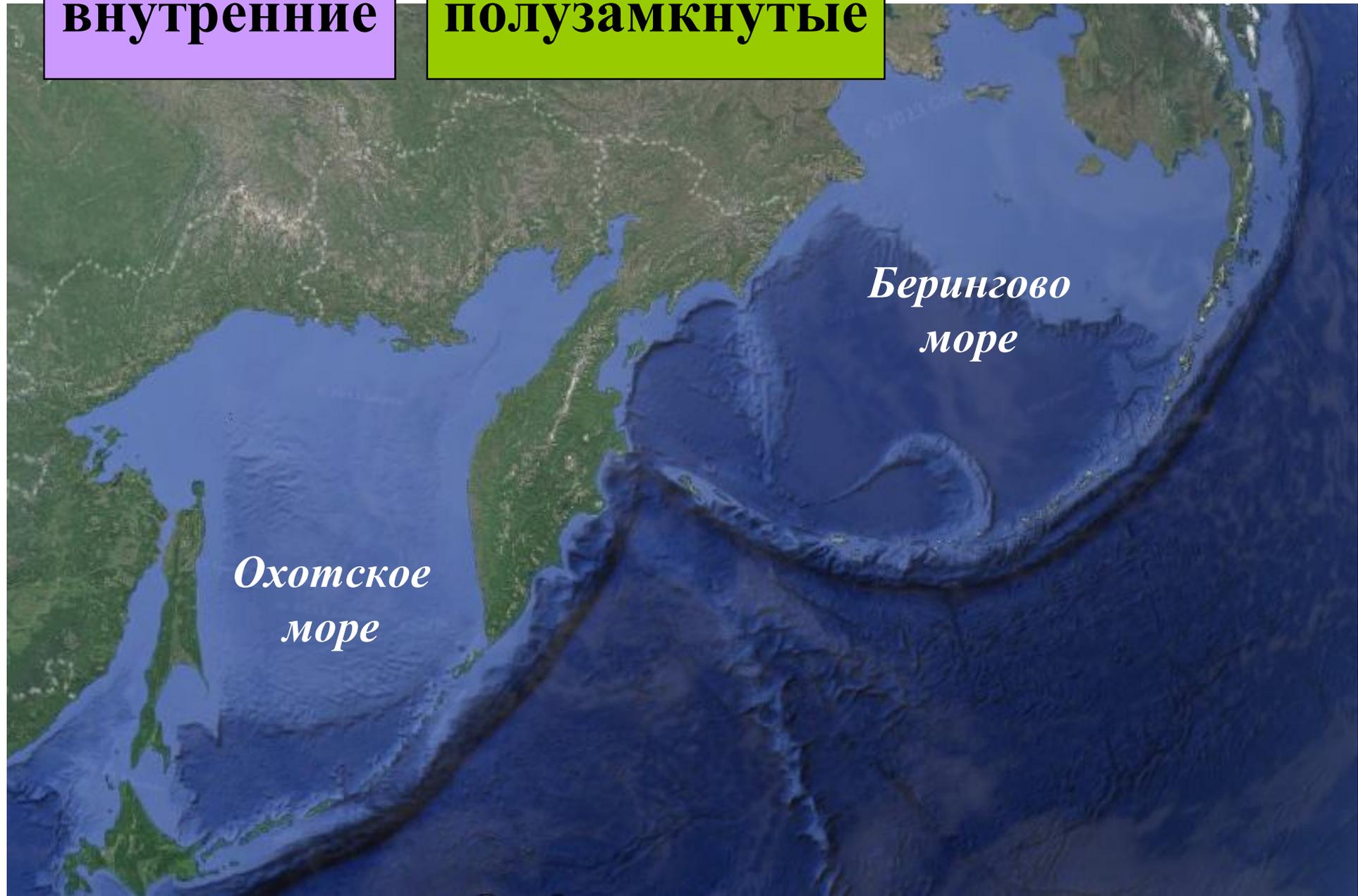
внутриконтинентальные



Полузамкнутые моря — моря частично ограниченные материками и отделённые от океана или прилегающего моря островами или цепью островов, пороги между которыми ограничивают водообмен данного бассейна с прилегающими водоёмами. В полузамкнутых морях течения образуют самостоятельную циркуляцию, температура, солёность и др. гидрологические и гидрохимические элементы обладают собственным режимом, находящимся, однако, под большим или меньшим влиянием прилегающего водоёма. К полузамкнутым морям относятся моря Коралловое, Южно-Китайское, Охотское, Берингово, Карибское и др.

внутренние

полузамкнутые

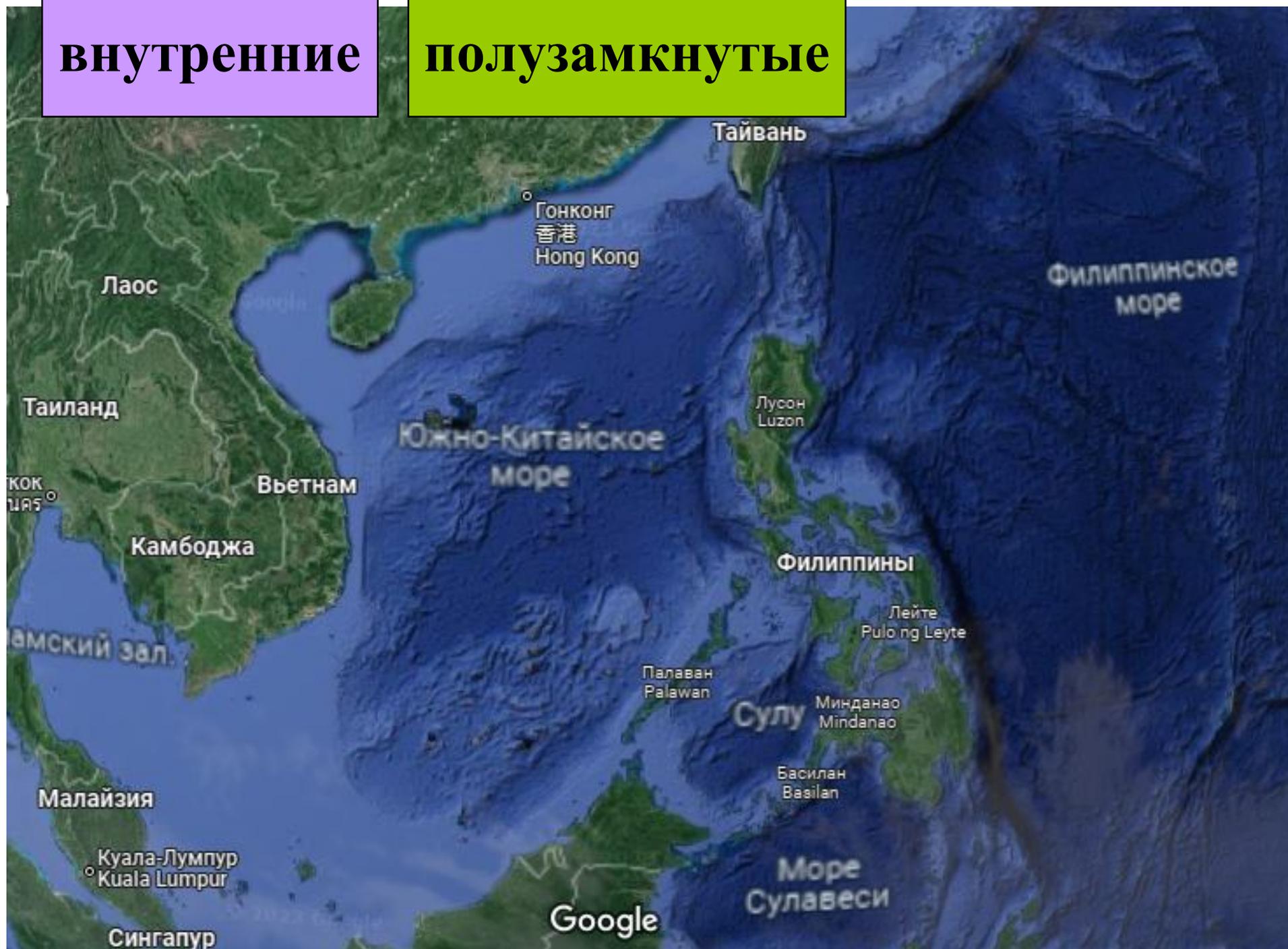


*Охотское
море*

*Берингово
море*

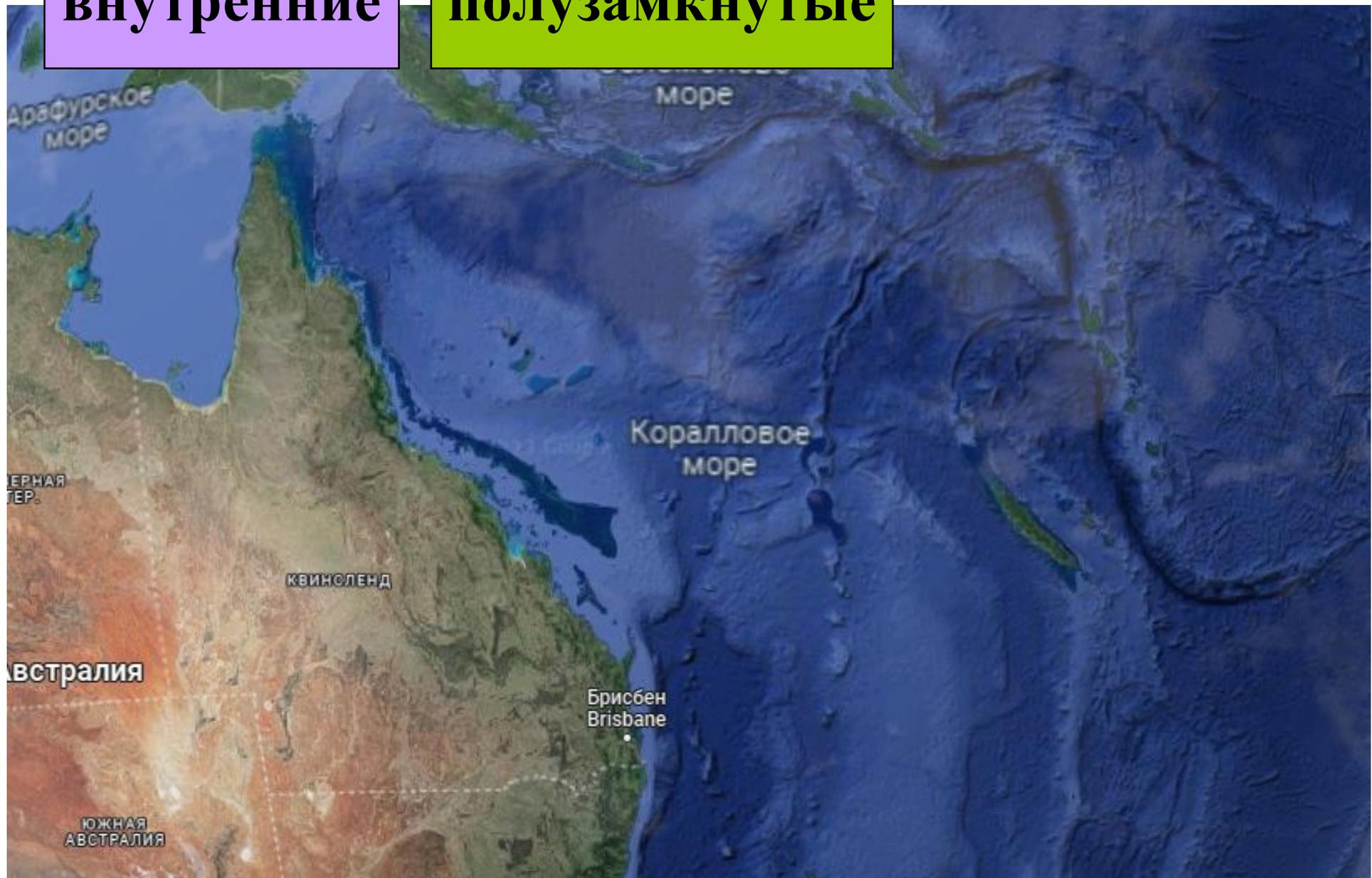
внутренние

полузамкнутые



внутренние

полузамкнутые



Окраинные моря — моря, прилегающие к материкам, в слабой степени обособленные полуостровами или островами. Расположены обычно на шельфе и материковом склоне, лишь иногда захватывают глубоководную область океана. На все особенности этих морей (характер донных отложений, климатический, гидрологический режимы, органическая жизнь) сильное влияние оказывают как материк, так и океан. Типичные Окраинные моря: Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Норвежское, Беллинсгаузена.

окраинные



окраинные

*Море
Беллинсгаузена*



Межостровные моря — моря, окруженные более или менее тесным кольцом островов, пороги между которыми препятствуют свободному водообмену этих морей с открытой частью океана. Почти все межостровные моря находятся среди островов Малайского архипелага. Наибольшие: Яванское море, Банда, Сулавеси.

межостровные

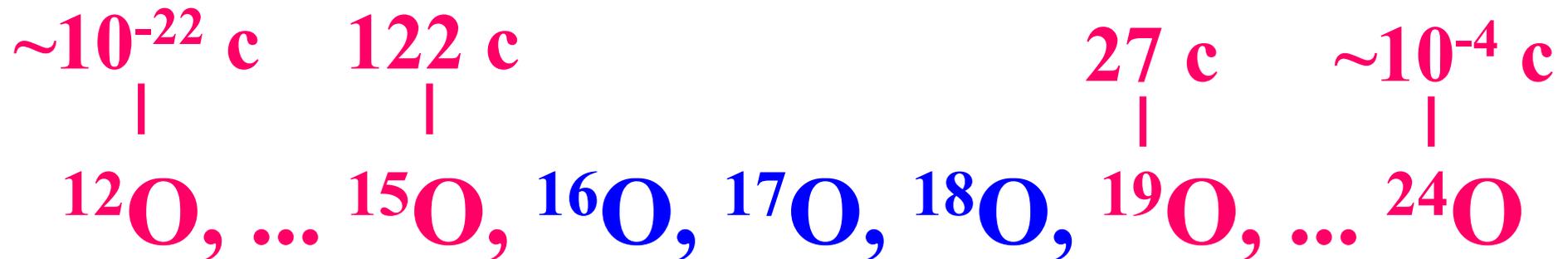
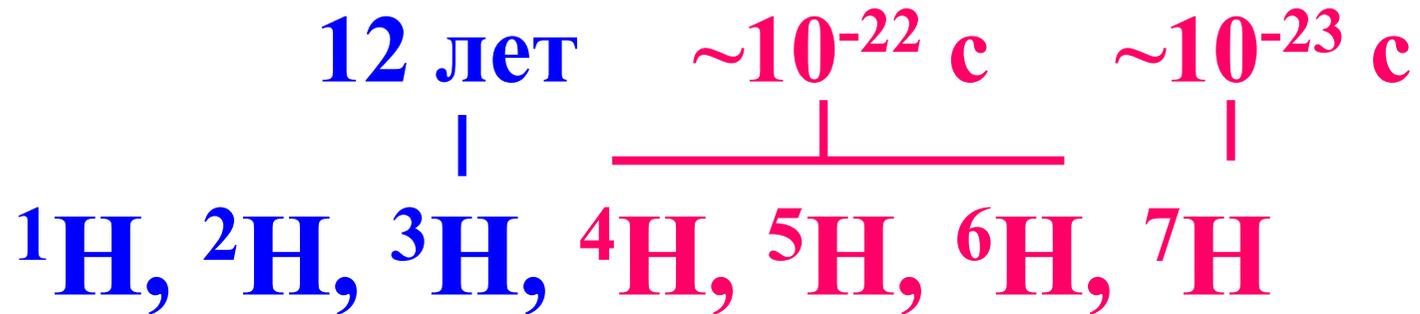


Межматериковые моря — моря, расположенные между двумя или несколькими материками (например, Средиземное море, Красное море, Мексиканский залив).

Внутриматериковые моря — моря, глубоко вдающиеся в пределы одного материка. Являются частным случаем средиземных морей. К внутриматериковым морям относятся: Азовское, Балтийское и Белое моря, Гудзонов залив и др.

Вода как вещество

Известны следующие изотопы водорода и кислорода:



стабильны (существуют в природе)

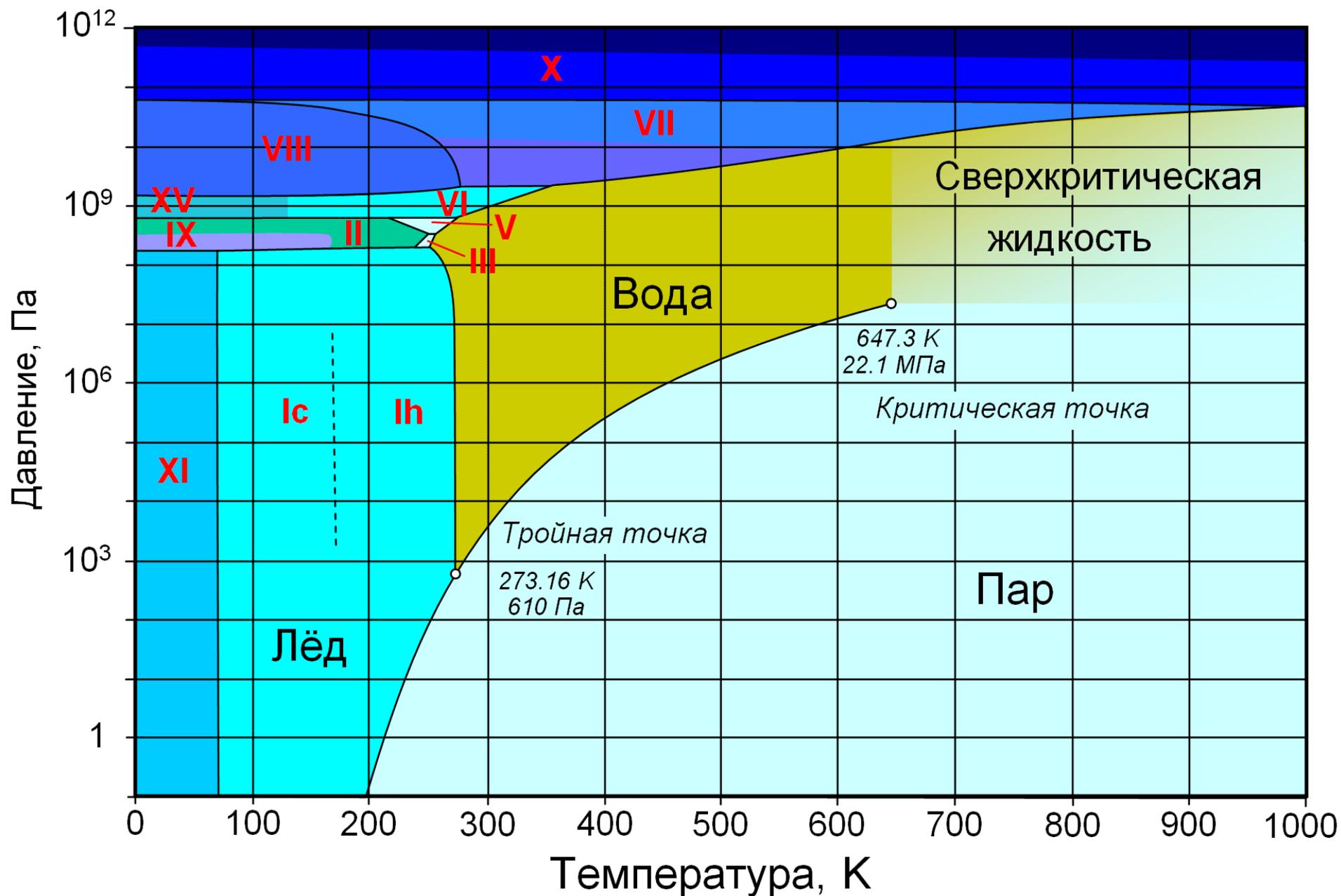
нестабильны (малый период полураспада)

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



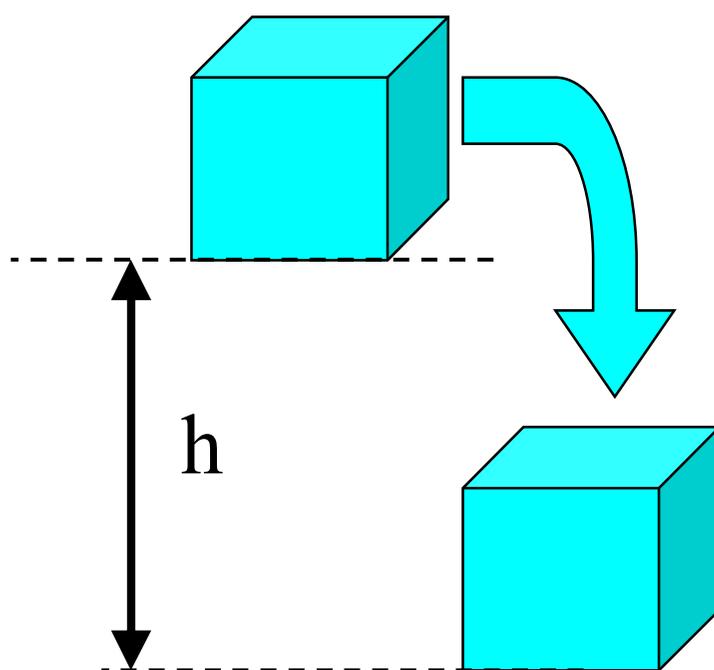
Физические свойства ВОДЫ

Теплоемкость

Вещество	Ср, Дж/(кг·град)
вода	4219
воздух	1005
Грунт песчаный	1100 - 3200
Гранит	750
Глицерин	2430
Бензин	2090
Спирт этиловый	2390

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

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



$W_p = mgh$ $W_p \Rightarrow Q$

$Q = mC_p\Delta t$

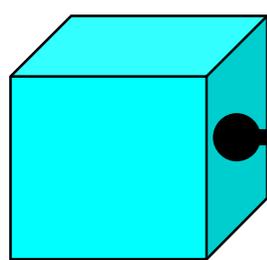
9.8 м/с^2 100 м

$\Delta t = \frac{gh}{C_p} \approx 0.23 \text{ град}$

$4195 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$

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

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



V
1 м/с
10 м/с 100 м/с

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

$$W_k \Rightarrow Q$$

$$\Delta t = \frac{V^2}{2C_p} \approx 0.00012 \text{ град}$$

$$\approx 0.012 \text{ град}$$

$$\approx 1.2 \text{ град}$$

$$Q = mC_p\Delta t$$

4195 Дж/(кг·град)

Удельная теплота плавления

Вещество	λ , кДж/кг
Лёд (вода)	333.5
Алюминий	390
Железо	247
Золото	67
Олово	59
Ртуть	12
Нафталин	151

$$\rho_{\text{в}} \approx \rho_{\text{л}}$$

$$Q_{\text{л}} = \lambda \cdot \rho_{\text{л}} \cdot S \cdot h_{\text{л}}$$

$$Q_{\text{в}} = C_p \cdot \rho_{\text{в}} \cdot S \cdot h_{\text{в}} \cdot \Delta t$$

$$h_{\text{в}} \approx \frac{\lambda \cdot h_{\text{л}}}{C_p \cdot \Delta t} \approx 80 \text{ м}$$

1 м
1 град

Удельная теплота парообразования

Вещество	L, кДж/кг
Вода	2 260
Алюминий	10 900
Железо	6 120
Этиловый спирт	837
Свинец	855
Ртуть	282
Азот	199

$$Q_{\text{исп}} = L \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta h$$

||

$$Q_{\text{охл}} = C_p \cdot \rho \cdot S \cdot h \cdot \Delta t$$

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_p \Delta t}{L} \quad \begin{matrix} \text{80 град} \\ \approx 0.15 \end{matrix}$$

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
$\kappa, \text{ Вт}/(\text{м К})$	0.556	0.579	0.598	0.614

теплопроводность

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

поток тепла
(в неподвижной
жидкости)

уравнение
теплопро-
водности

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

$$\kappa = C_p \rho \chi$$

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

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

время
тепловой
релаксации
шара

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

1 мм

$$\kappa = C_p \rho \chi$$

поток тепла
(в неподвижной
жидкости)

температуропроводность

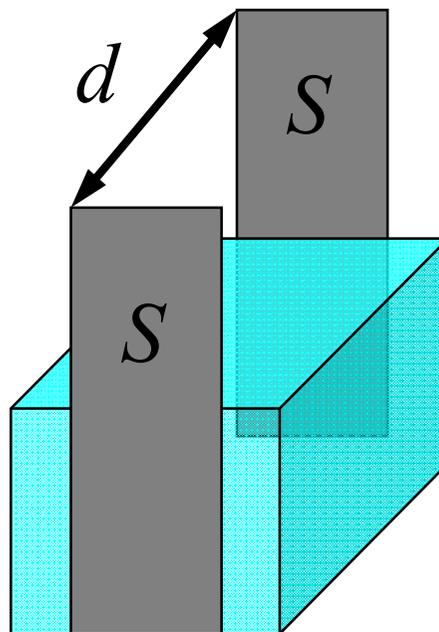
$$1.38 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$$

Диэлектрическая проницаемость воды (относительная)

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
ε	87.99	84.08	80.32	76.71

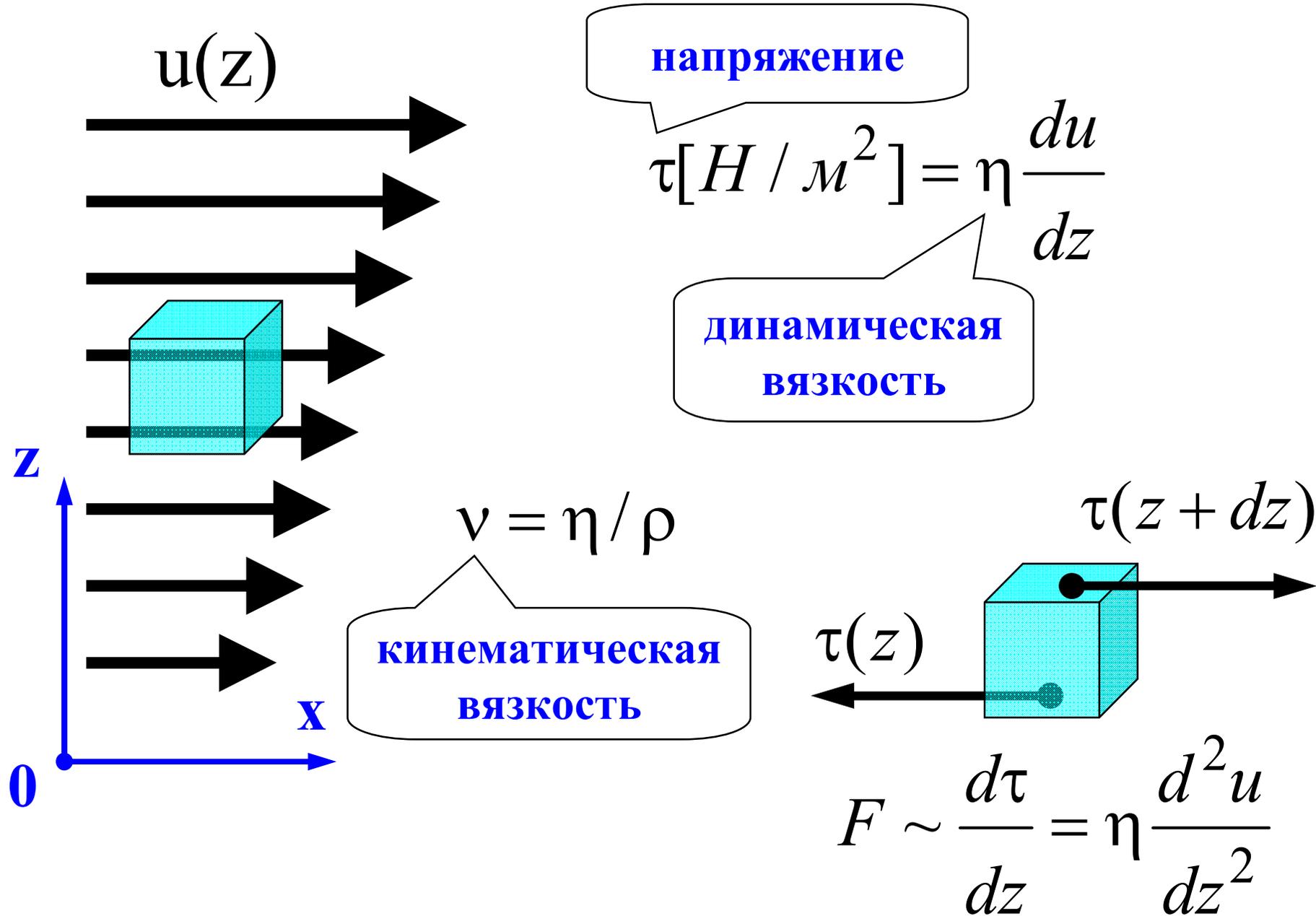
формула
конденсатора

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

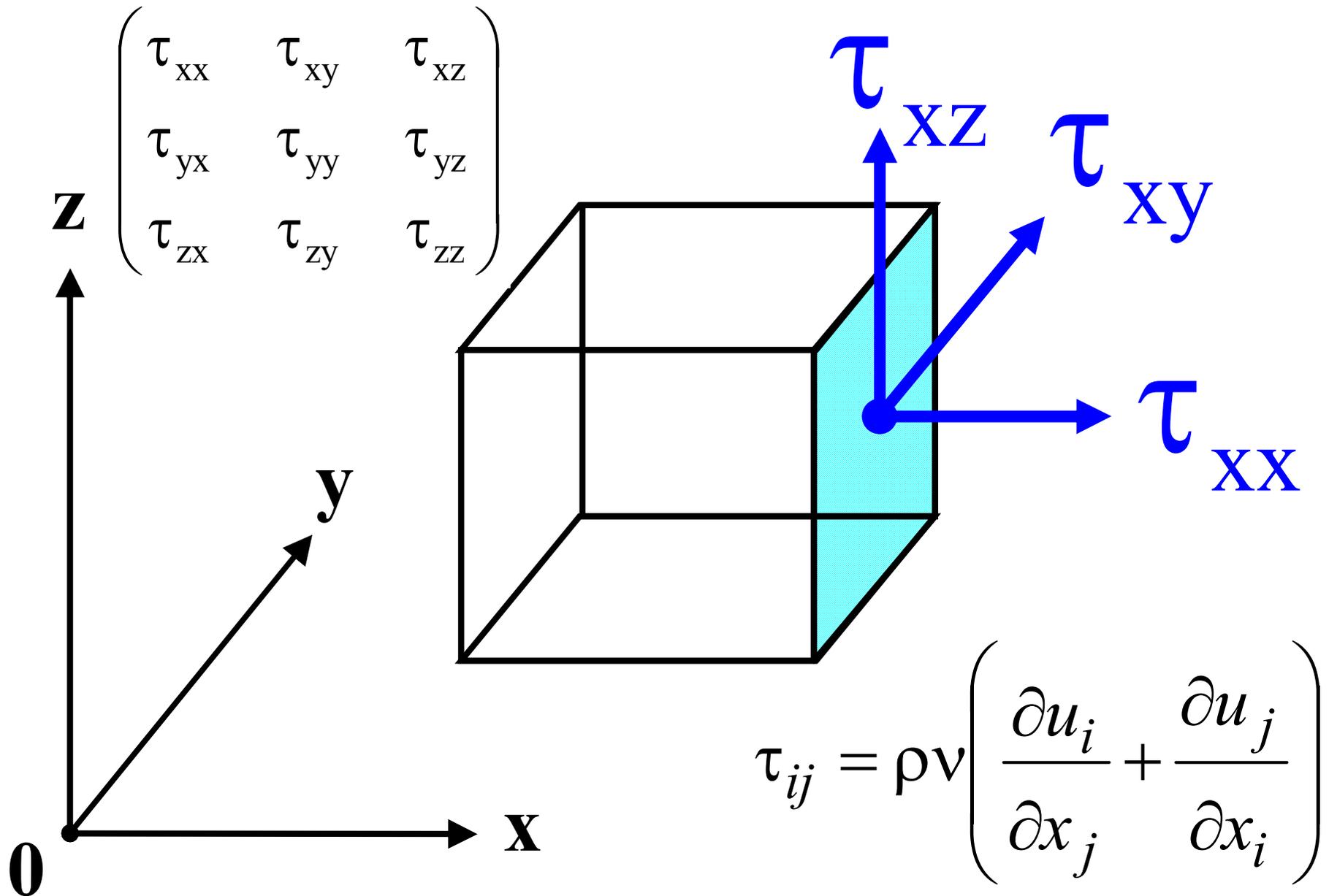


Емкостной
датчик
уровня

Вязкость воды



Тензор вязких напряжений



Вязкость пресной воды при $p=101325$ Па

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

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_{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

Капиллярные волны



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

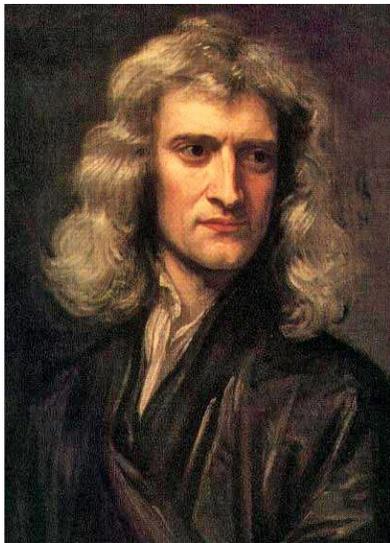
$$\beta_S = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_S$$

Сжимаемость воды

$$\Delta\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial p} \right) \Delta p$$

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

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



Sir Isaac Newton

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

$$\beta_S = \frac{1}{\rho c^2}$$



Pierre-Simon Laplace

Скорость звука в воде

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

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

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

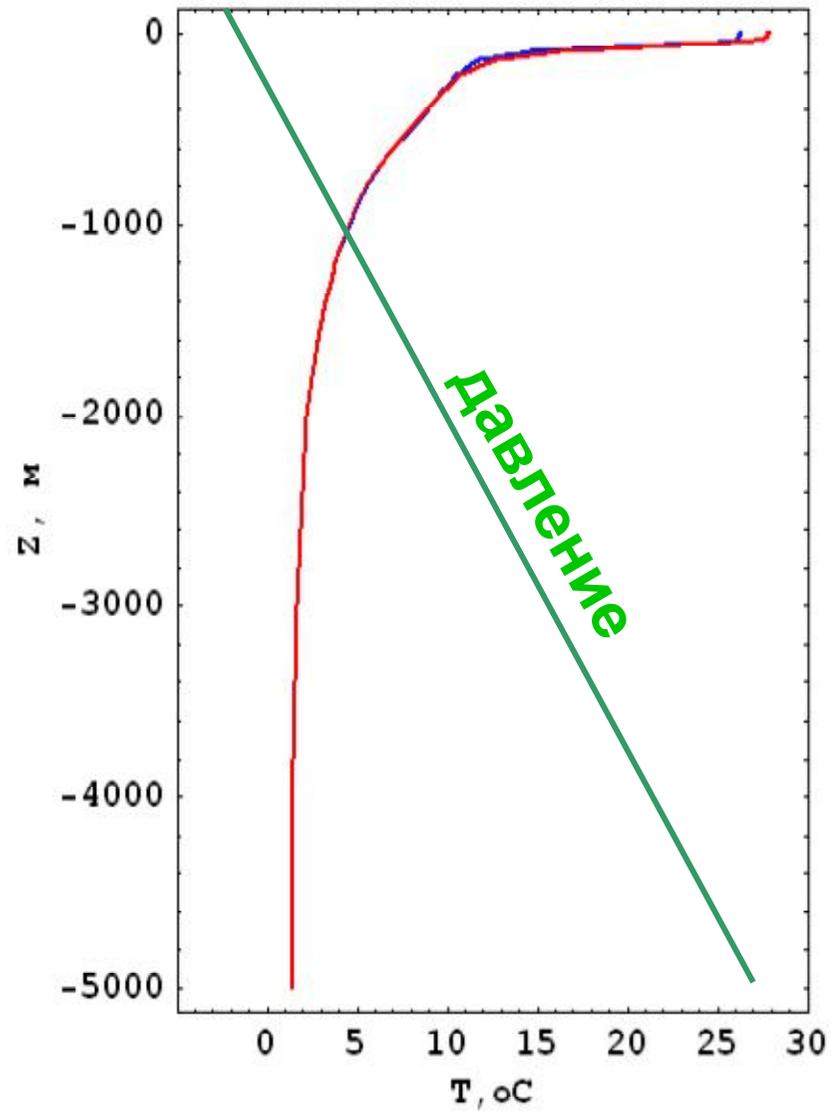
$$1480 < c < 1545 \text{ м/с}$$

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

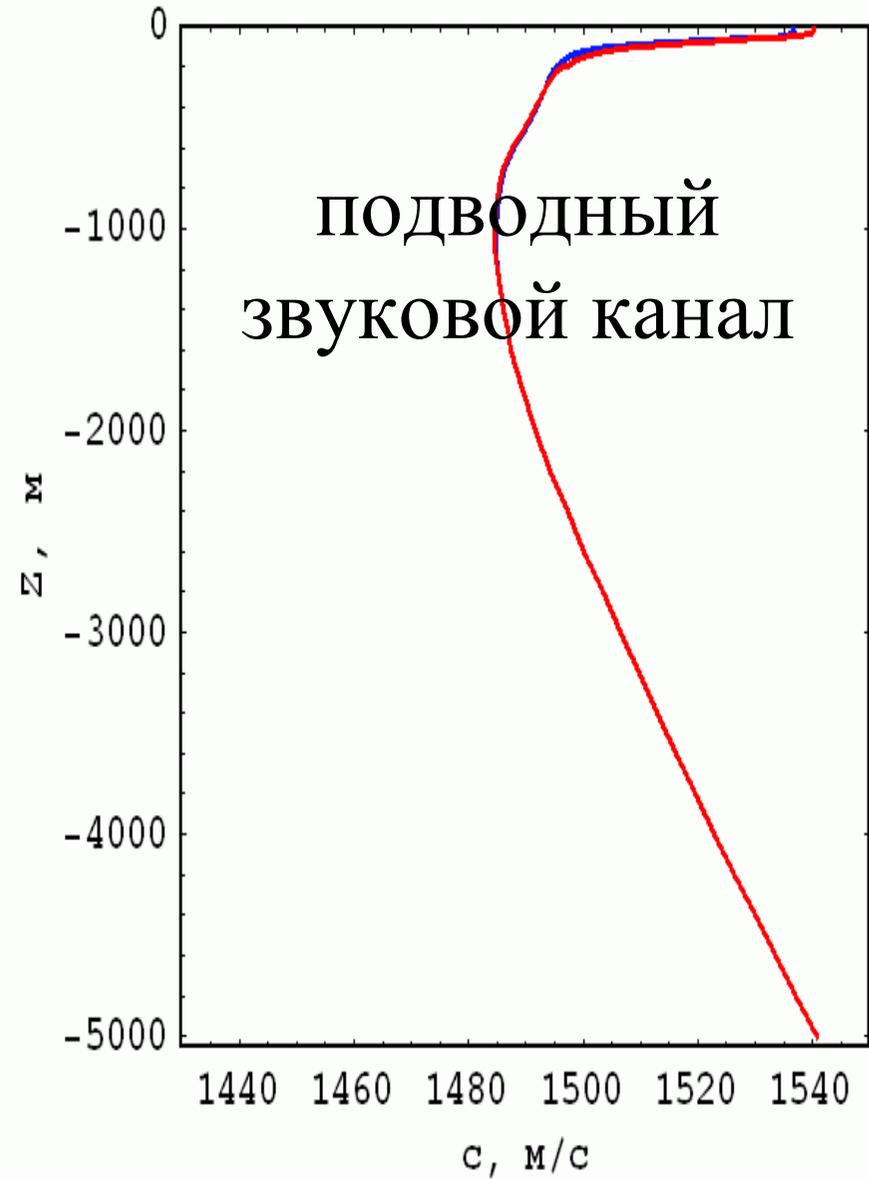
$$\frac{\partial c}{\partial p} > 0$$

Lat=10 Lon=-150

Температура



Скорость звука



Соленость морской воды

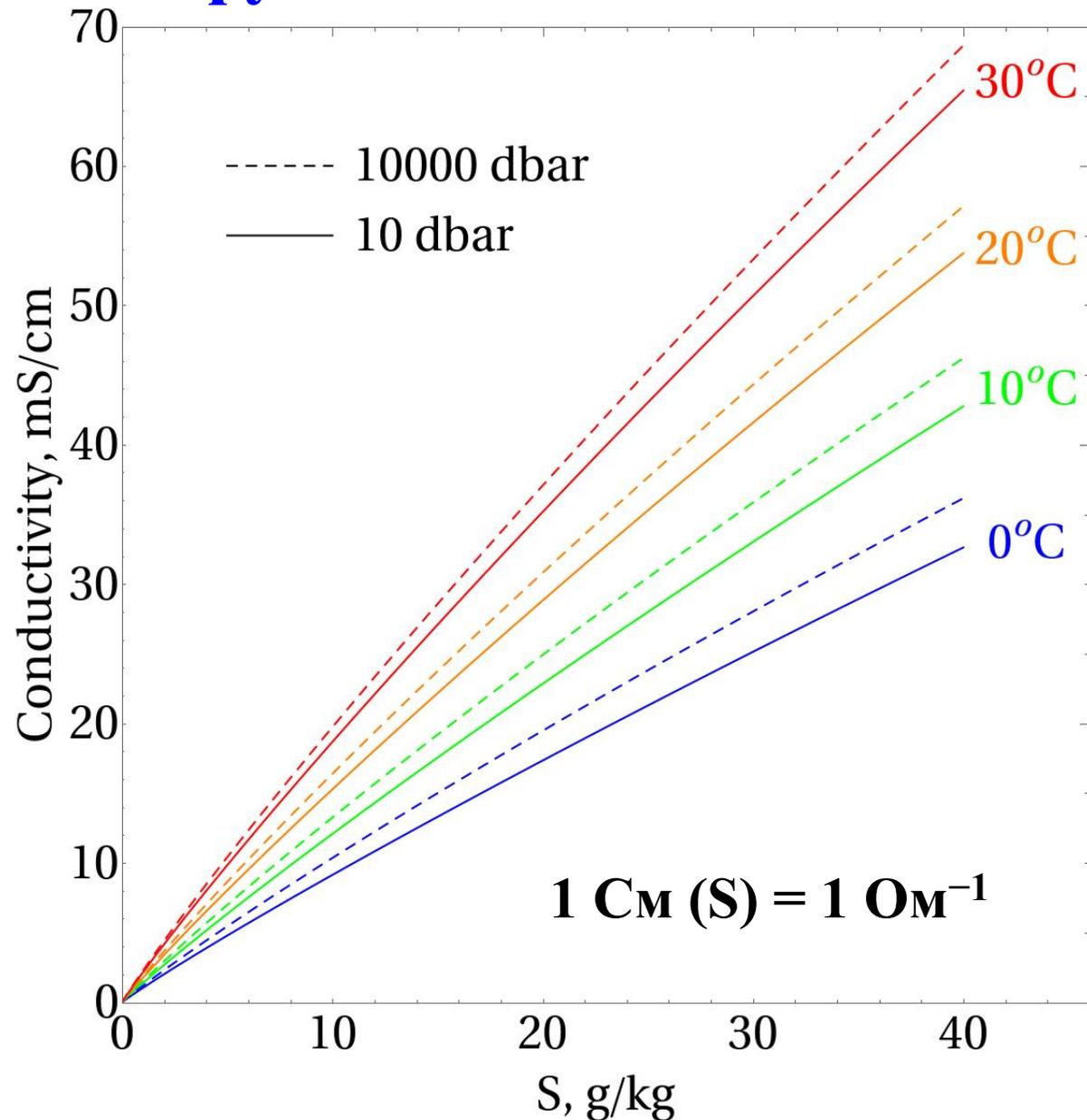
$$S = \frac{m_{\text{примеси}}}{m_{\text{примеси}} + m_{\text{чистой воды}}} \left[\text{‰ промилле} \right]$$

PSU (Practical Salinity Unit)

Соленость – масса в граммах твердых веществ, растворенных в 1 кг воды, при условии, что карбонаты (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

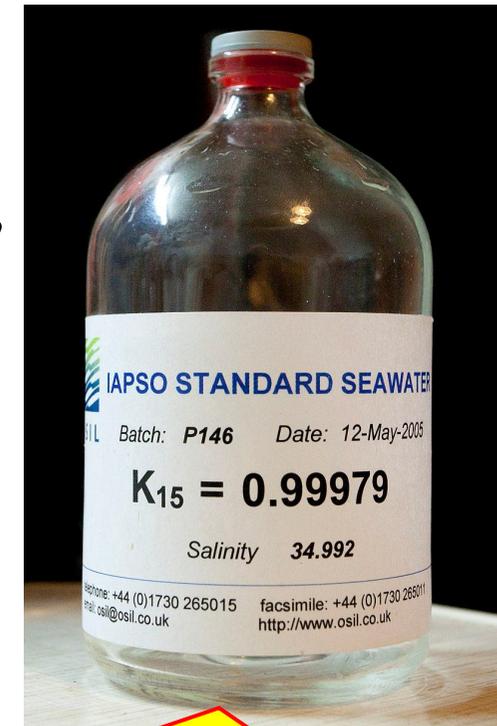
На практике определение солености основано на измерении **электропроводности** воды и ***закономерности** постоянства солевого состава морской воды

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

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

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‰

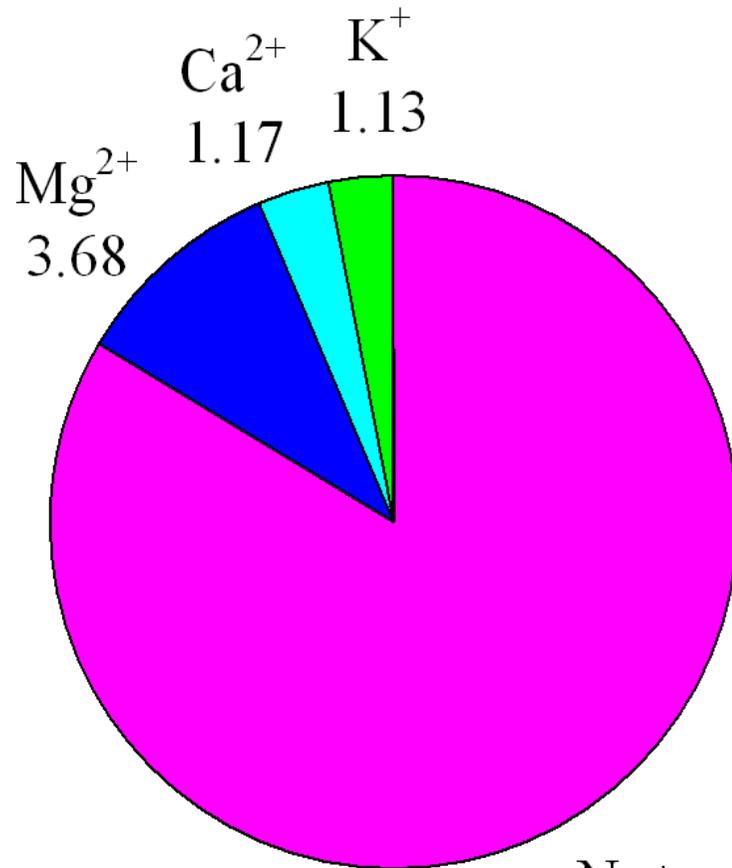
**Мертвое море
250-300 ‰**

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

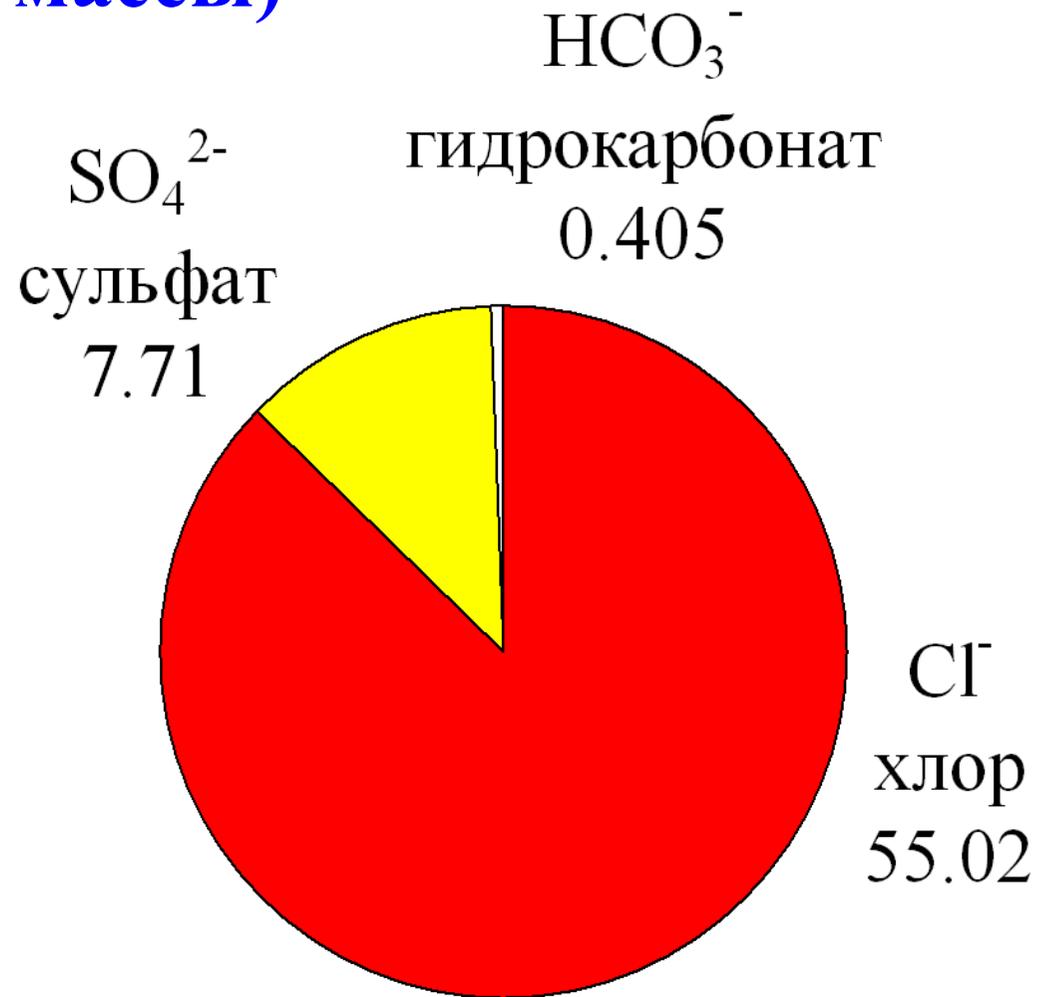
**На порядок больше
массы атмосферы!!!**

**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**

**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

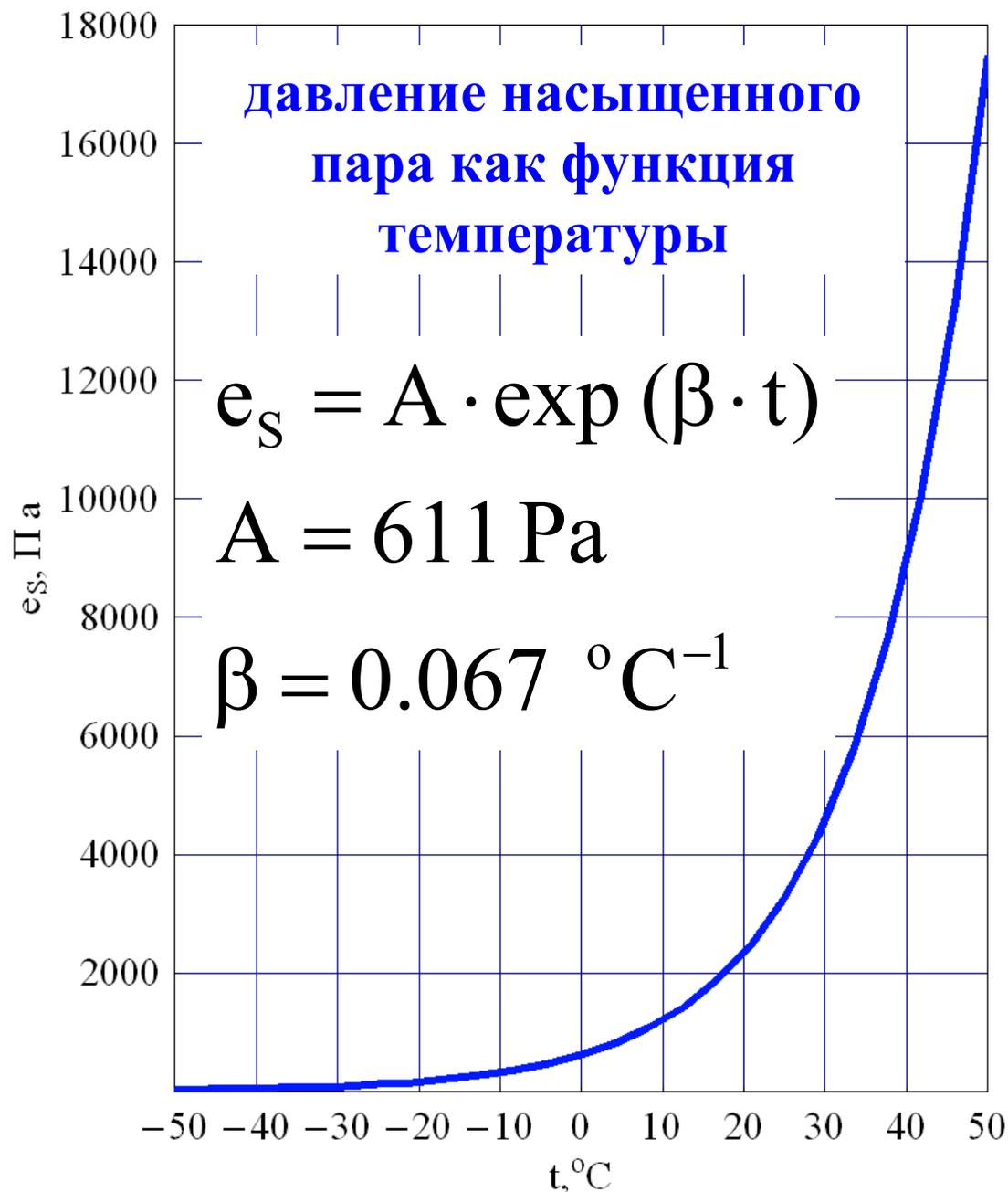
$$e = \rho_w R_w T$$

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

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

Уравнение
состояния
влажного
воздуха

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



- ❑ 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

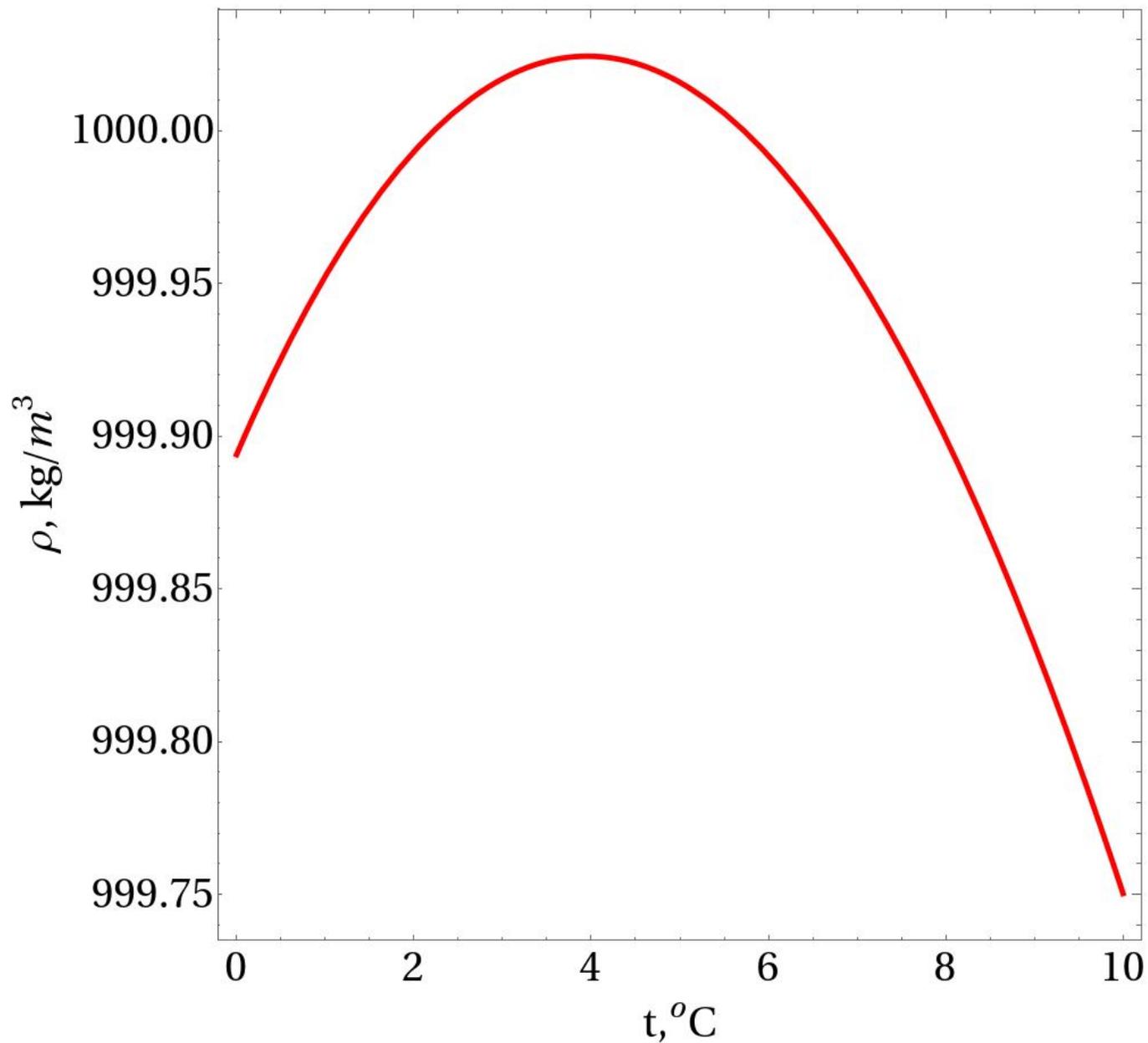
$$\rho = \rho(p, T, s)$$

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

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

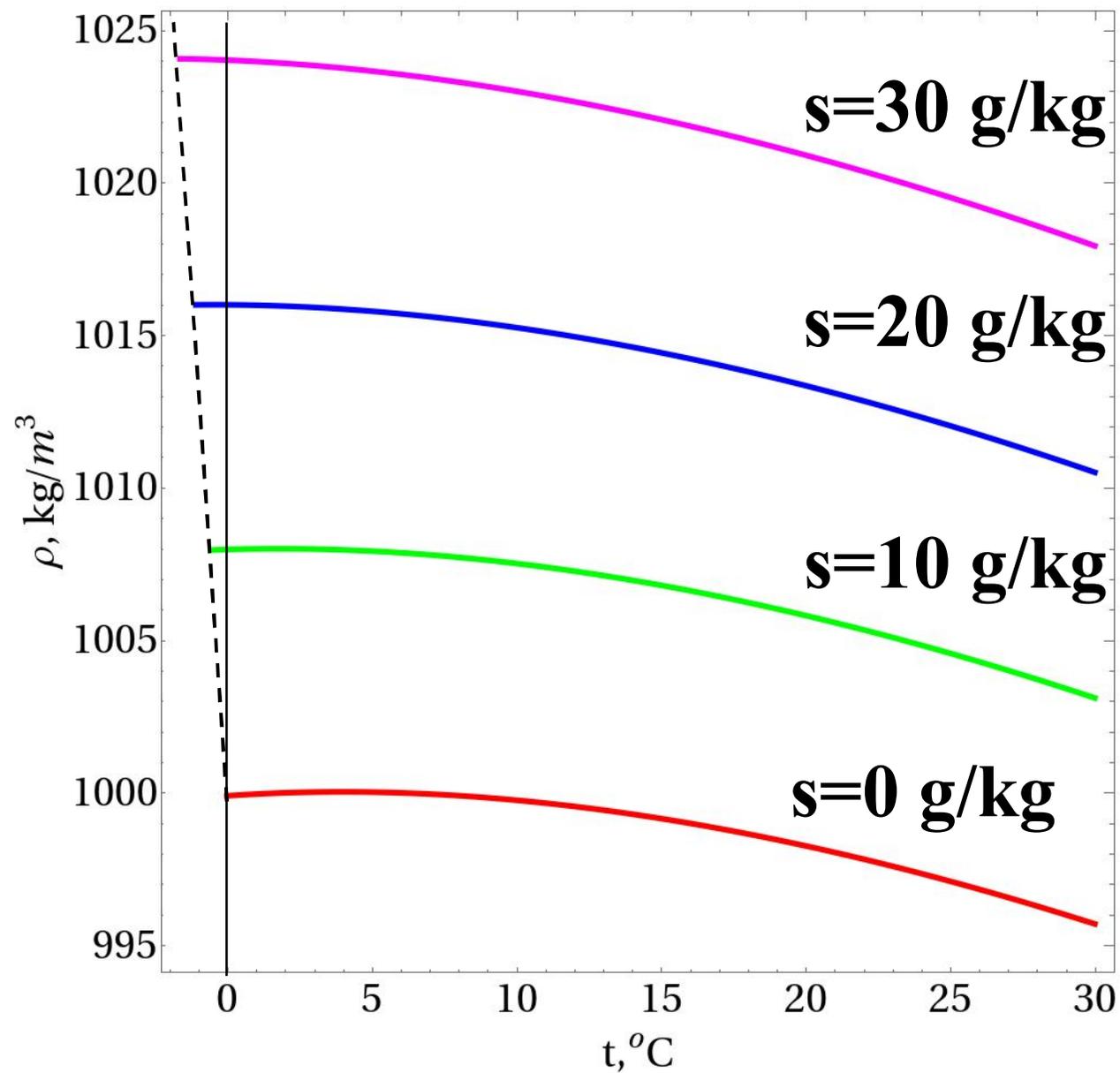
www.teos-10.org

TEOS-10 – уравнение для потенциала Гиббса

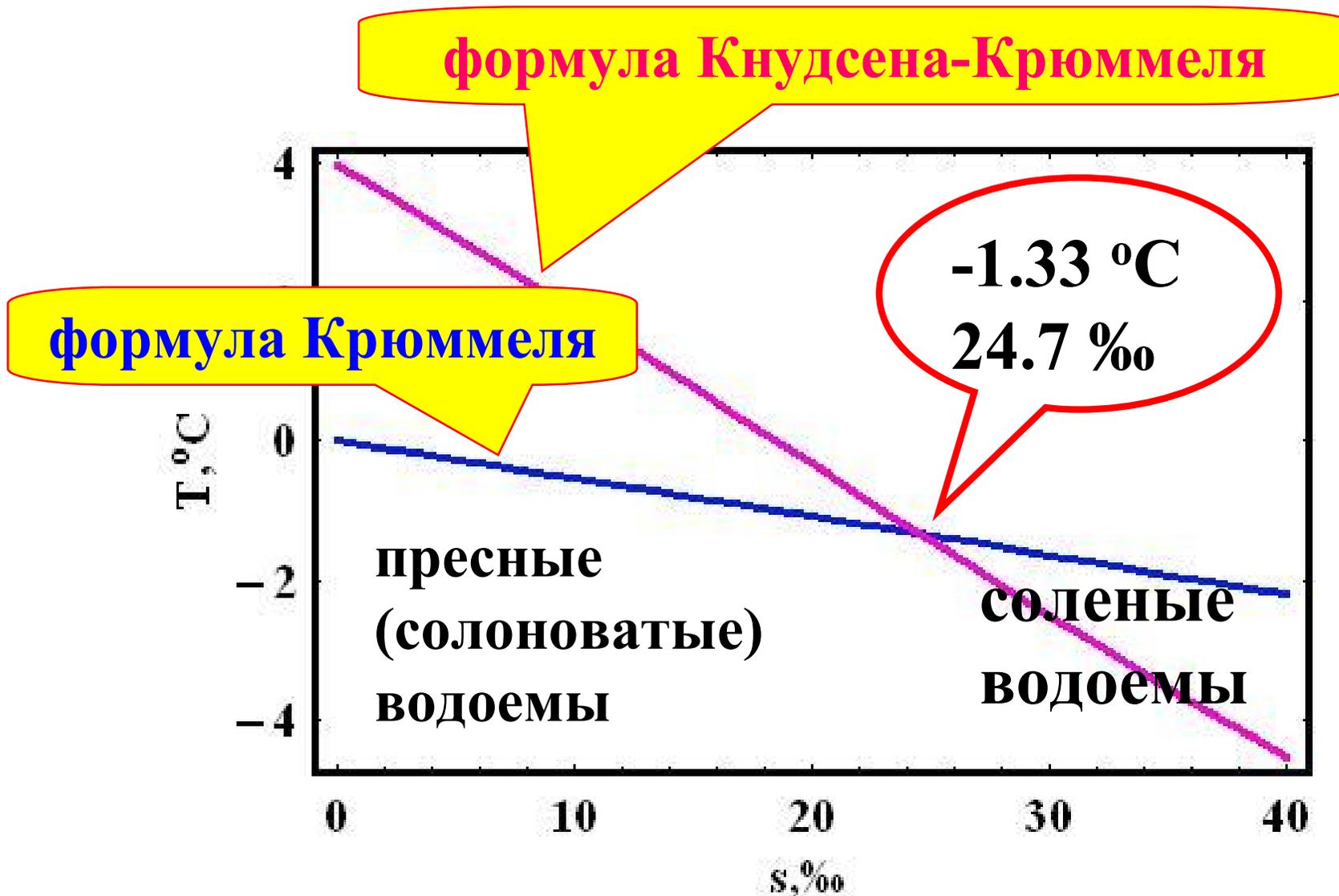


**у пресных (солонватых) вод существует
«температура максимальной плотности»**

Плотность морской воды как функция температуры и солёности



Температура замерзания и максимальной плотности как функция солености



Уникальные свойства воды

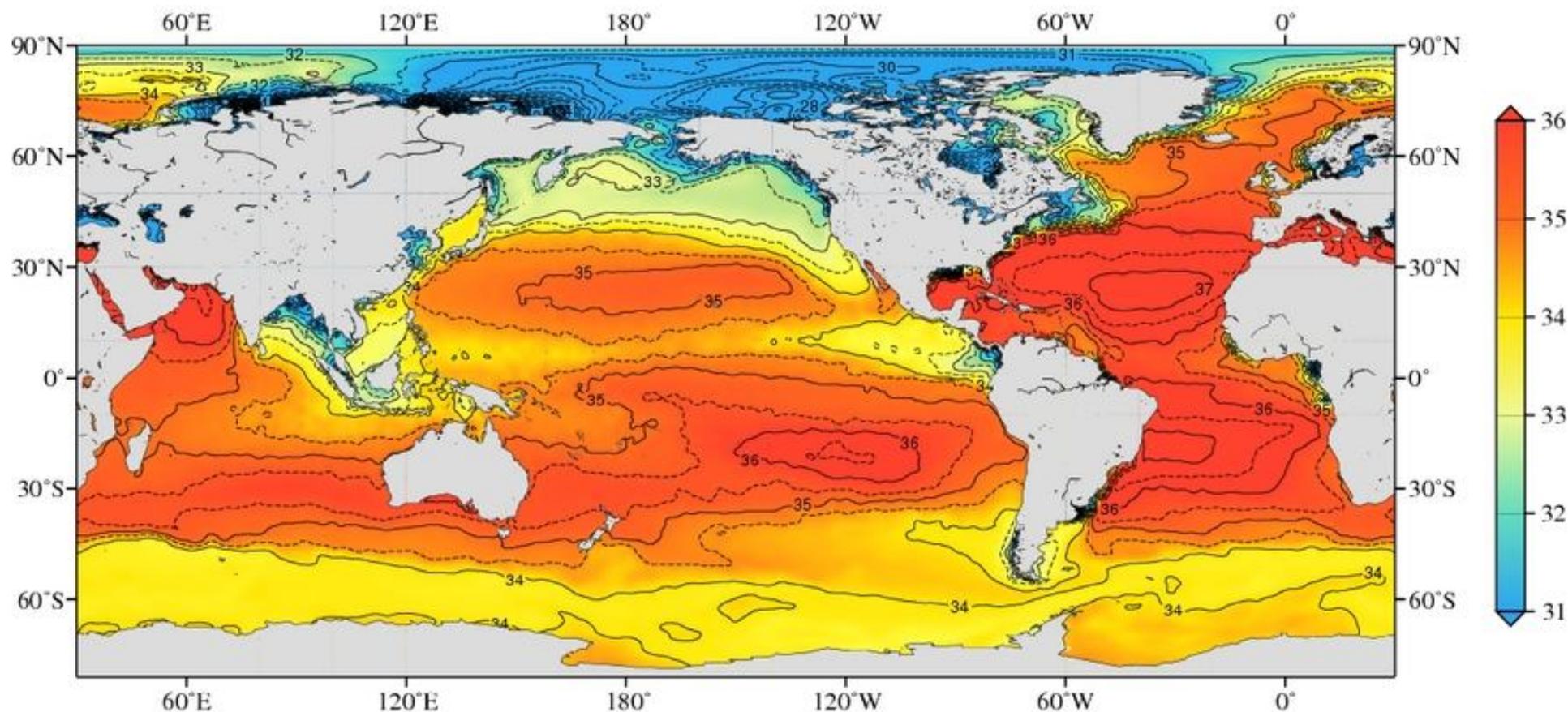
- 1. существование температуры максимальной плотности у пресных (солончатых) вод**
- 2. плотность льда < плотности воды**
917 кг/м³ 999.8 кг/м³
- 3. высокая теплоемкость воды и широкий диапазон существования жидкой фазы**
- 4. вода – эффективный растворитель**

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)

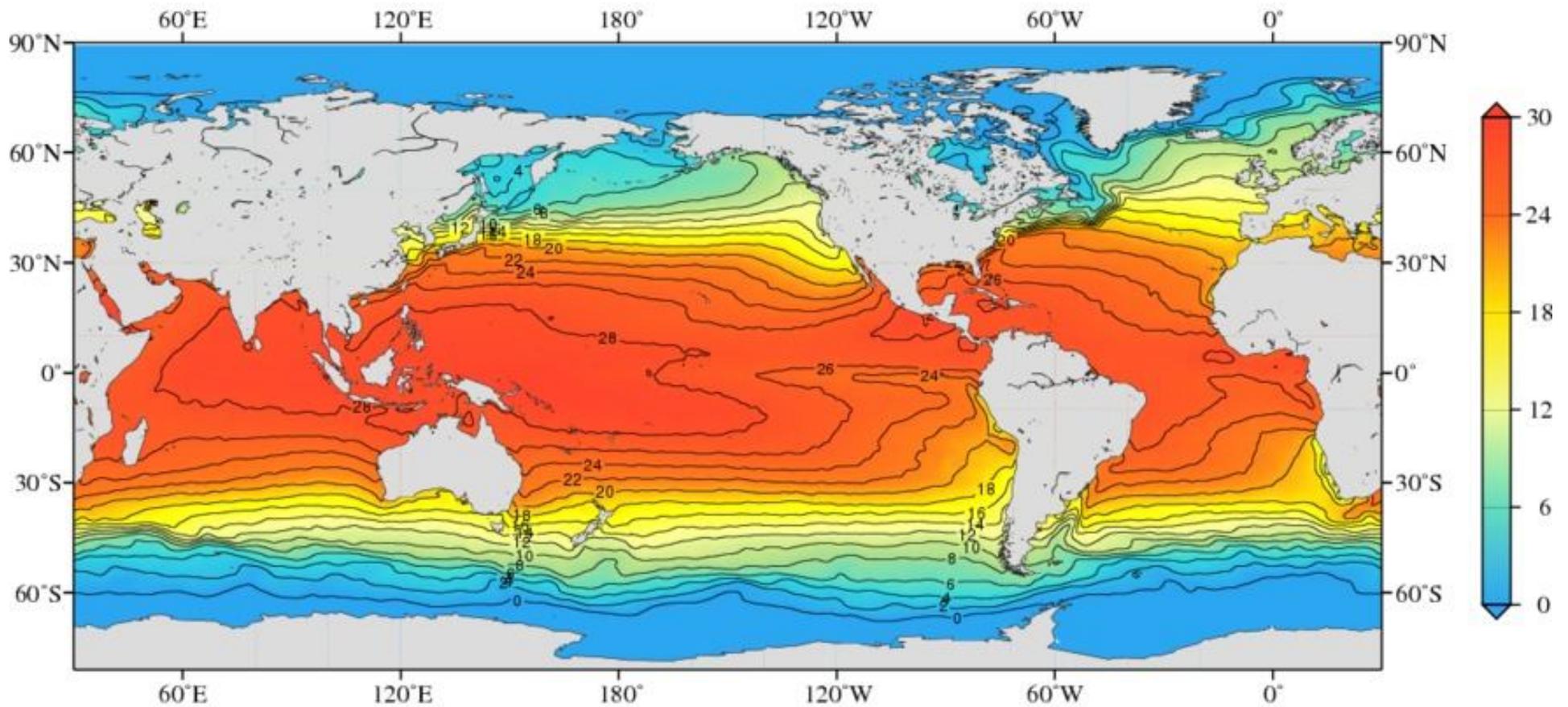
WORLD OCEAN ATLAS 2013 <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>

Среднегодовая температура поверхности Мирового океана

World Ocean Atlas Climatology

Decadal Average: 1955 - 2012

Contour Interval=2

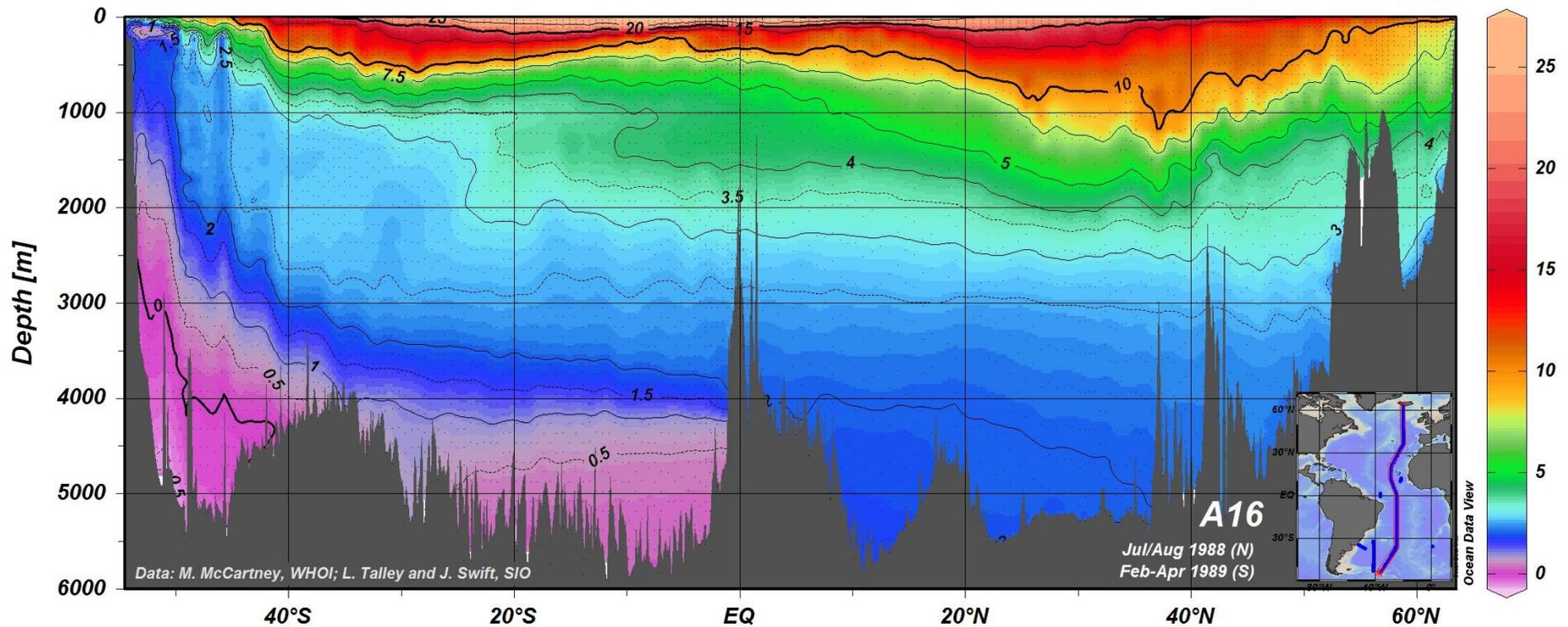


Annual temperature [°C] at the surface (quarter-degree grid)

Вертикальный разрез (температура)

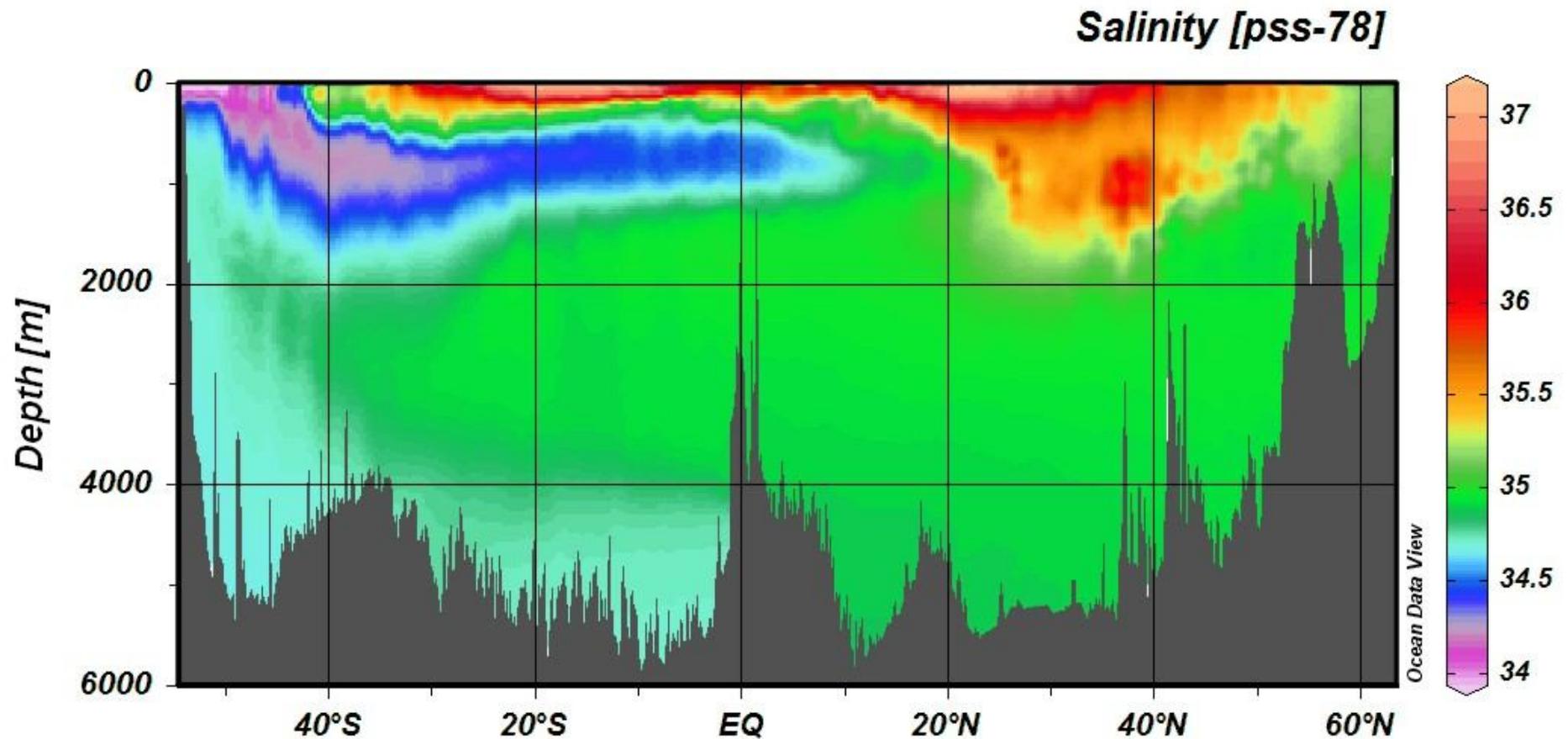
eWOCE

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



<http://www.ewoce.org>

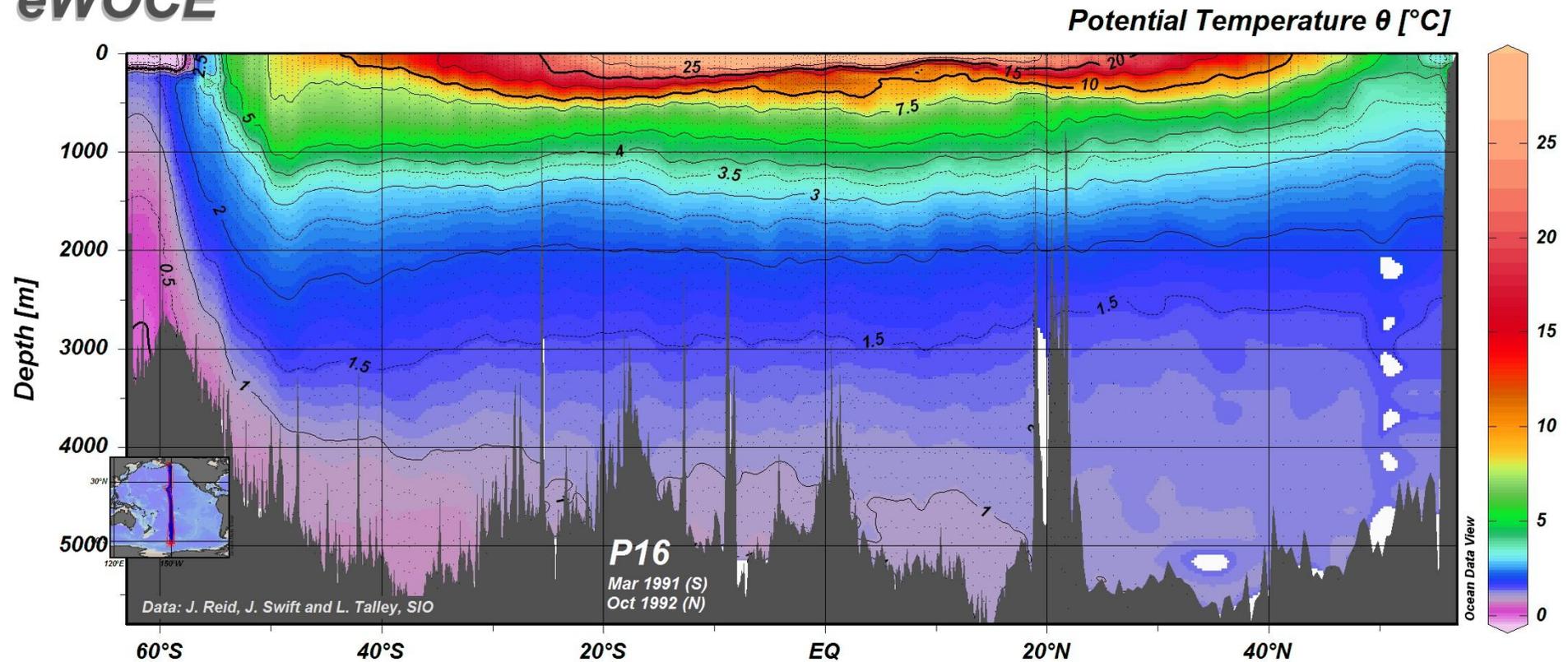
Вертикальный разрез (соленость)



<http://www.ewoce.org>

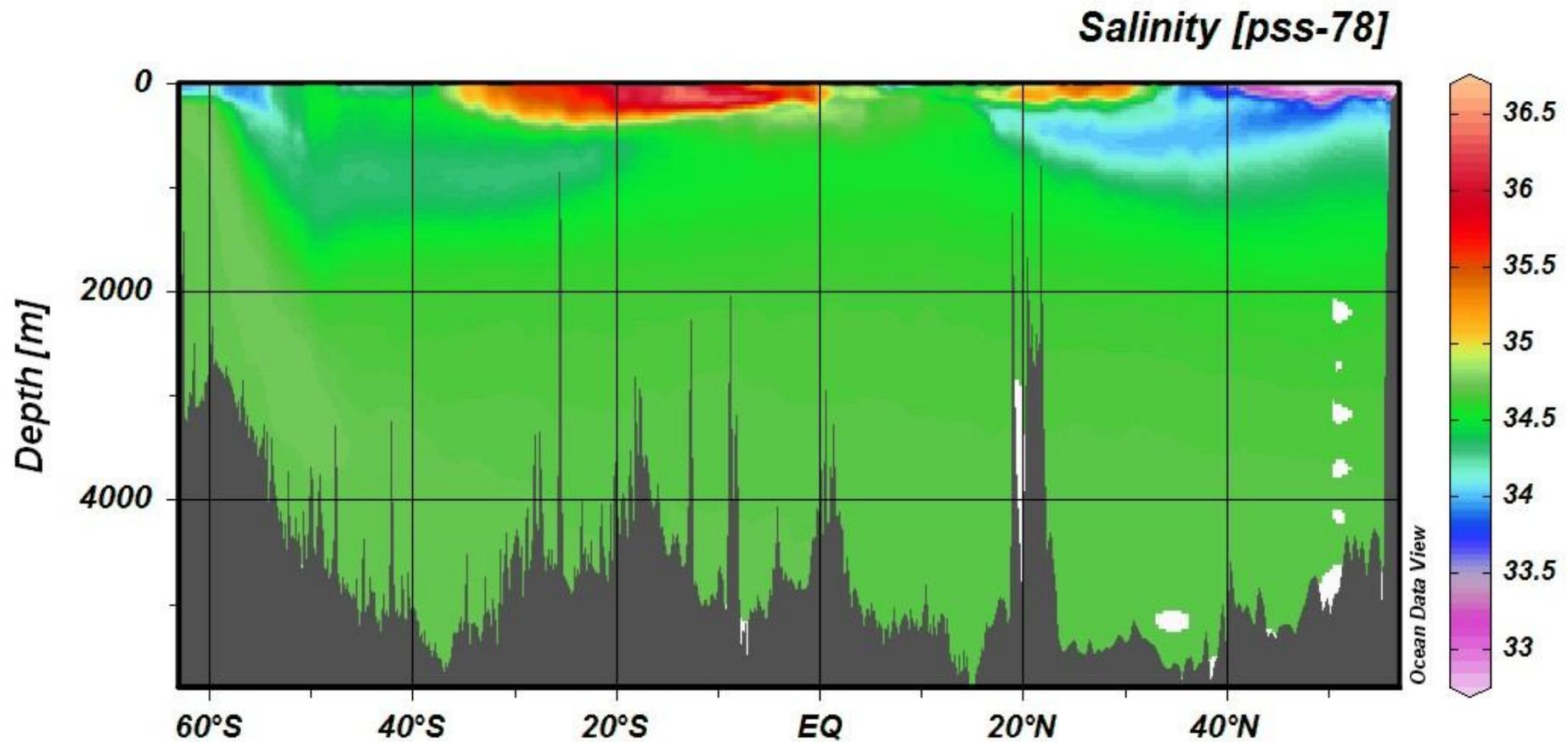
Вертикальный разрез (температура)

eWOCE



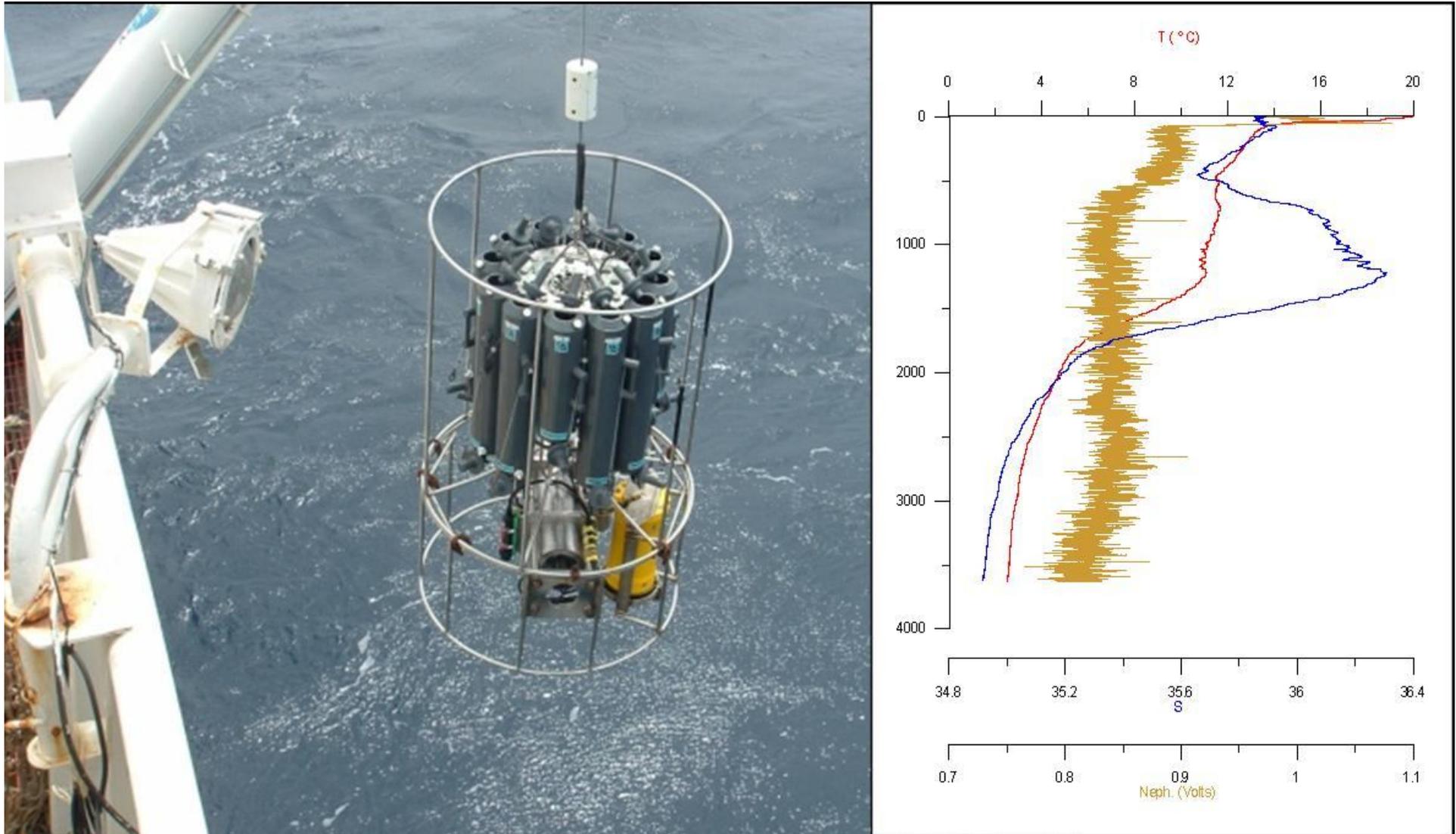
<http://www.ewoce.org>

Вертикальный разрез (соленость)

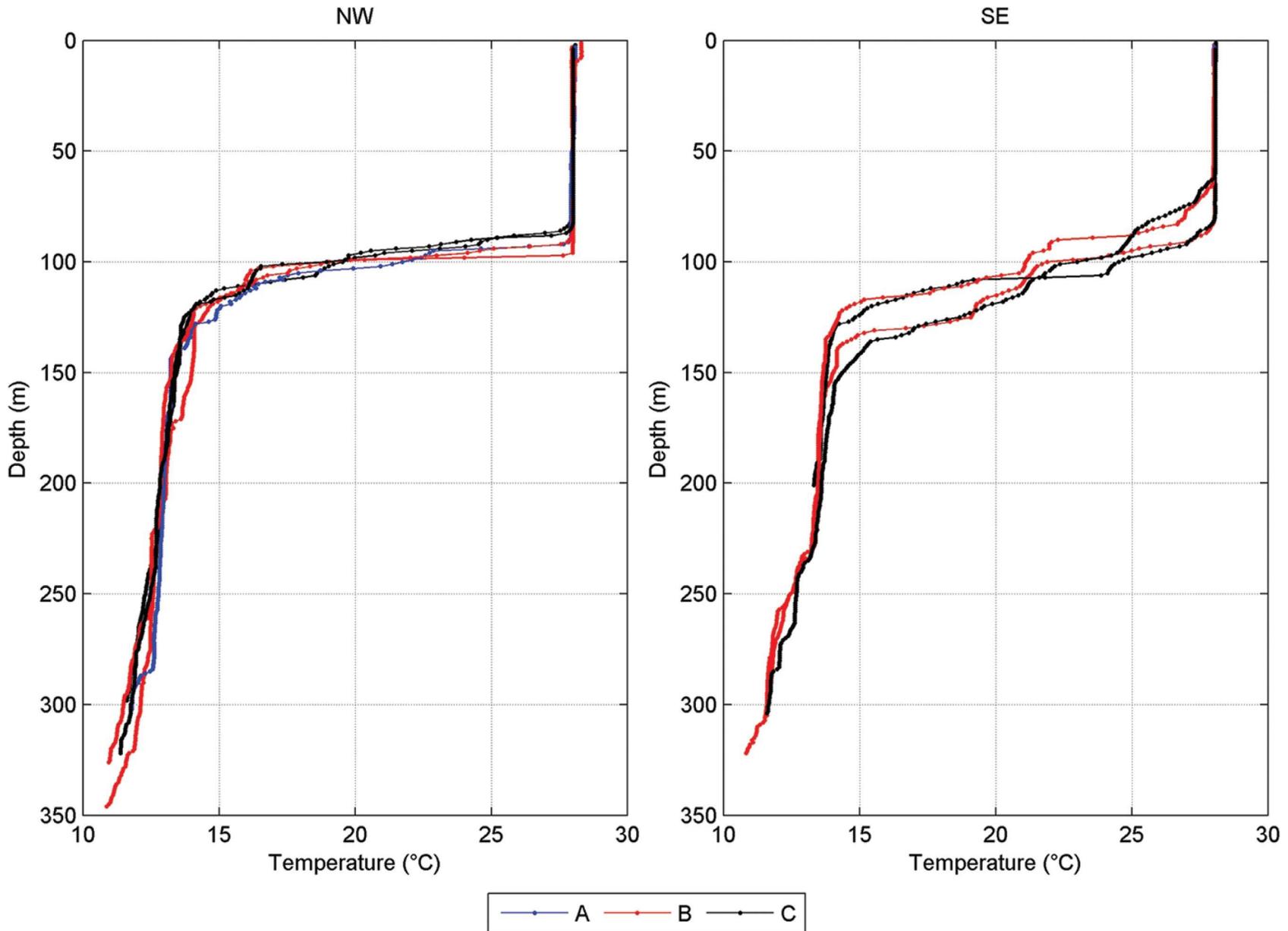


<http://www.ewoce.org>

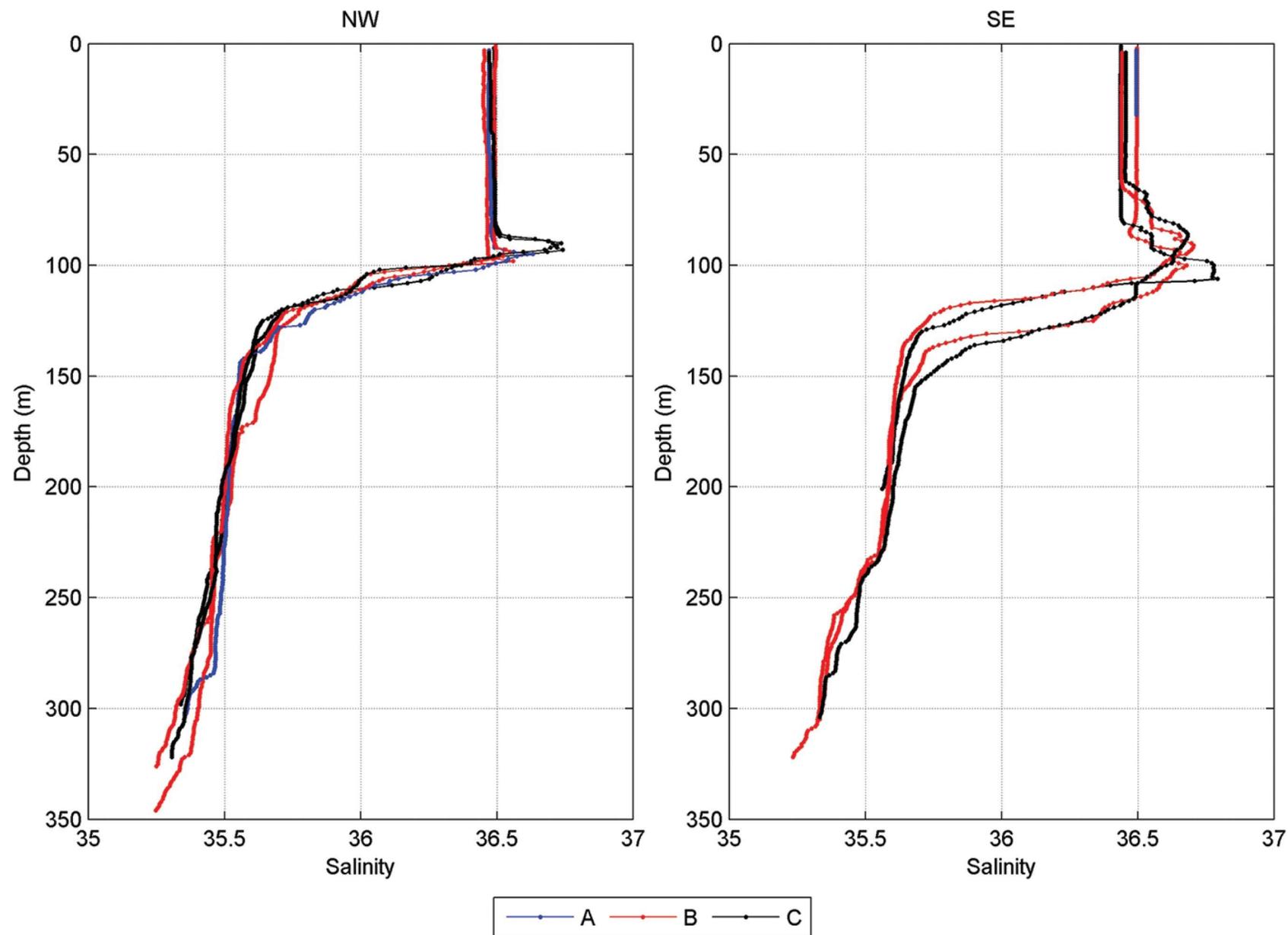
СТД- зонд (CTD -conductivity, temperature, depth)



Вертикальный профиль температуры (примеры регистрации)



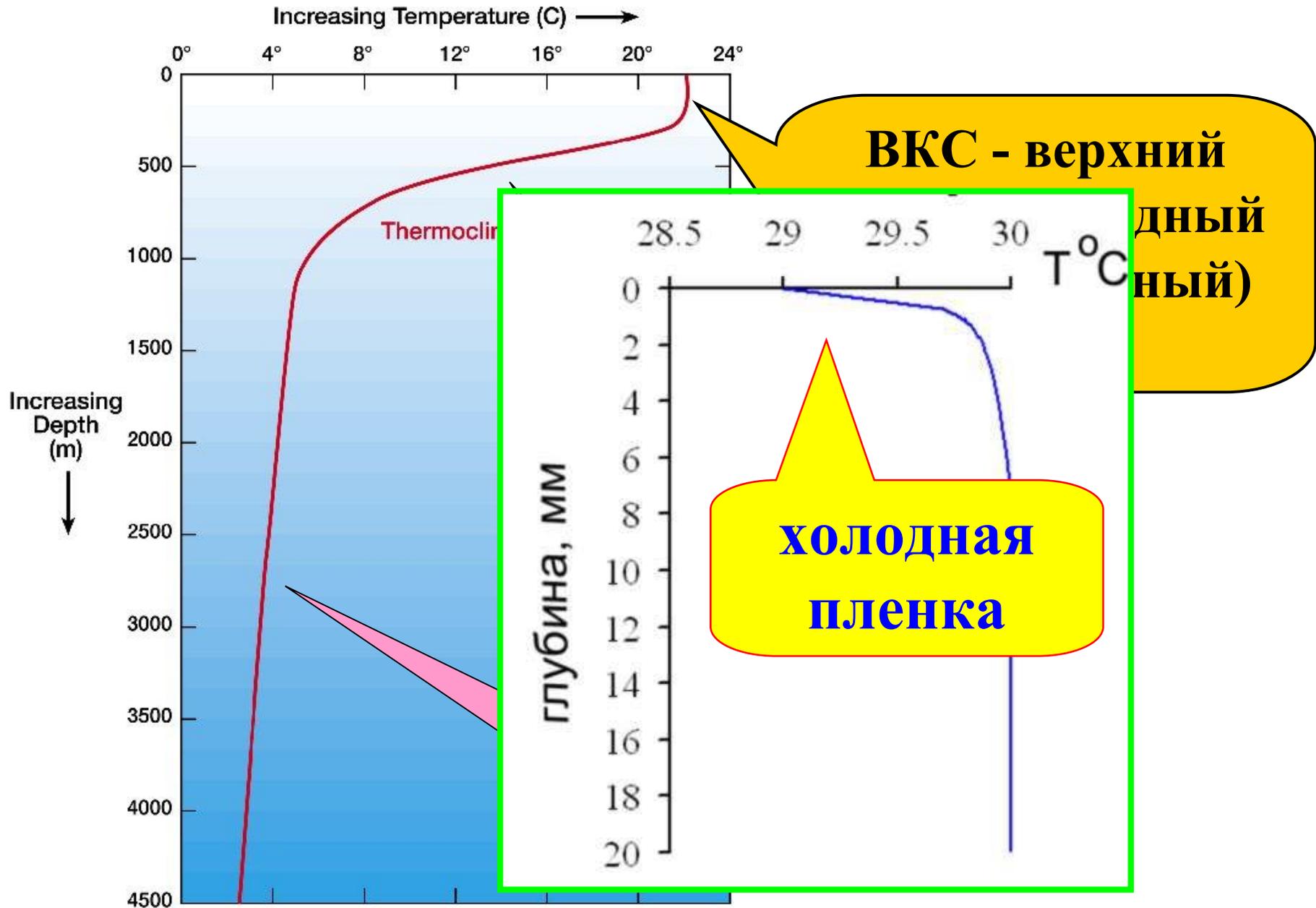
Вертикальный профиль солености (примеры регистрации)



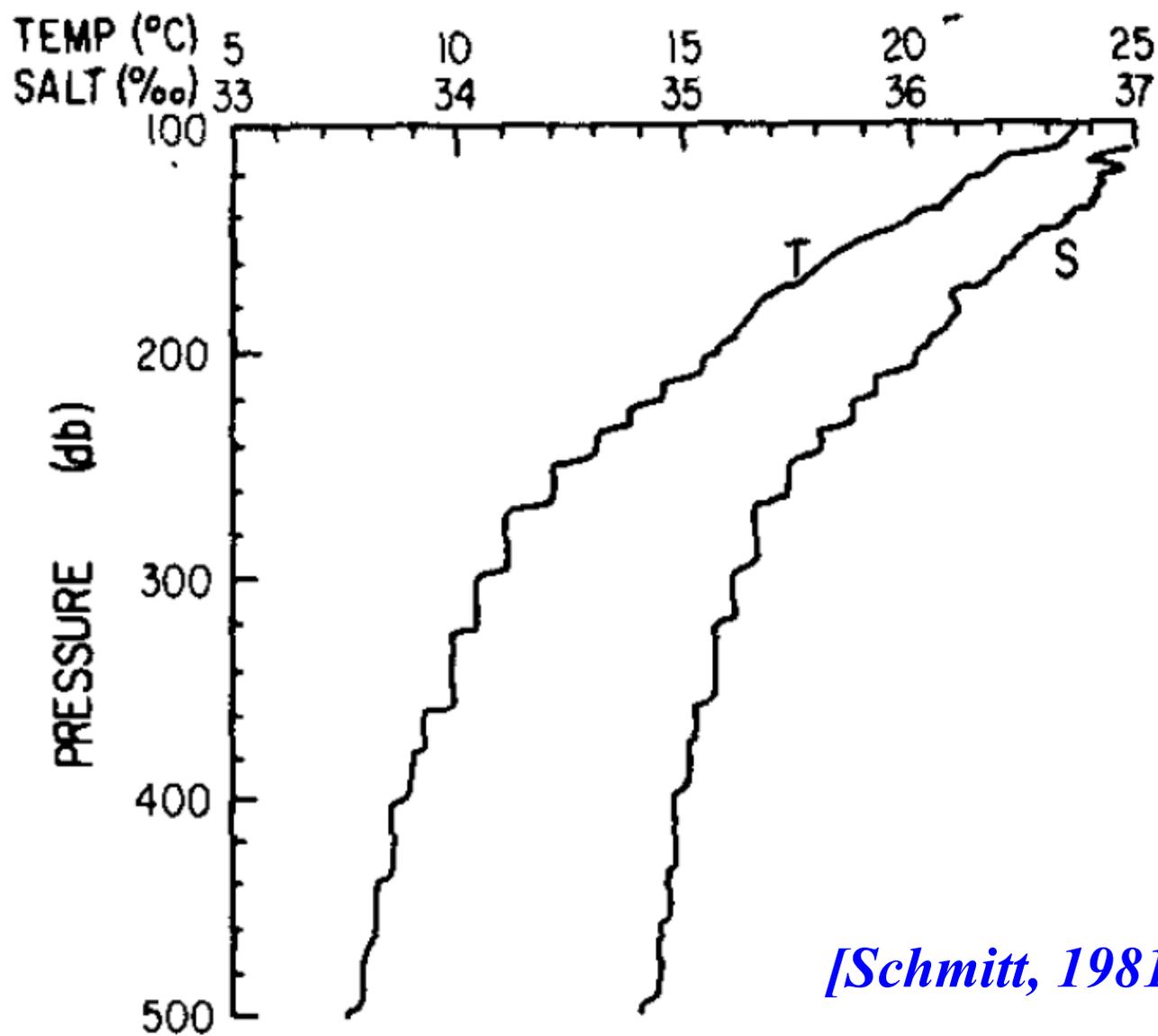
Типичный вертикальный профиль температуры в океане



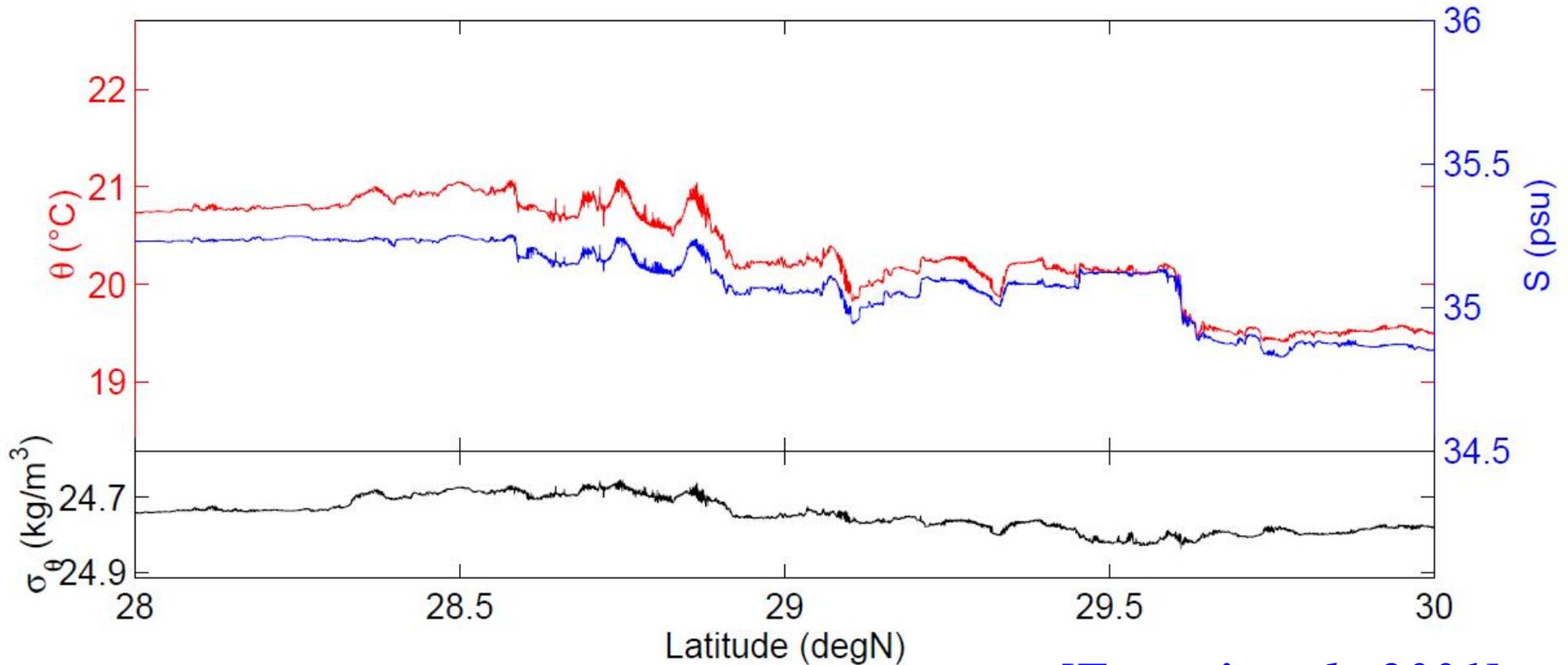
Типичный вертикальный профиль температуры в океане



Тонкая структура в океане



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



[Ferrari et al., 2001]

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