

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ВОДЕ

Факторы, влияющие на распространение звука в воде:

- *Скорость звука;*
- *Отражение и преломление звука;*
- *Полное внутреннее отражение;*
- *Критический угол падения;*
- *Рефракция звука. Звуковой канал;*
- *Пространственно-временная изменчивость скорости звука в море;*
- *Дифракция;*
- *Интерференция. Многолучевость и аномалия распространения звука;*
- *Явление реверберации;*
- *Кавитация.*

Скорость звука

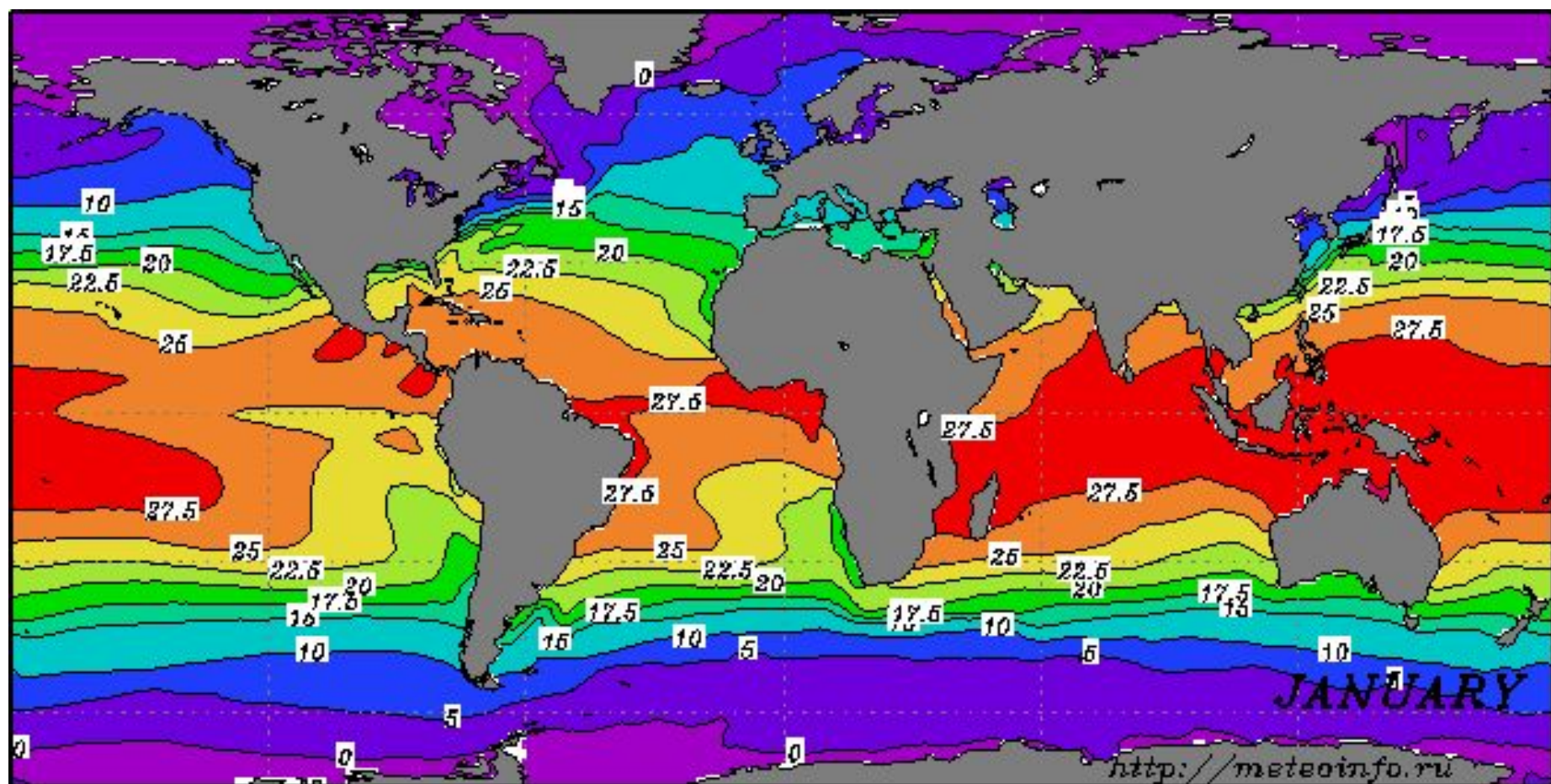
Скорость звука является функцией от температуры (t), солёности (‰), гидростатического давления.

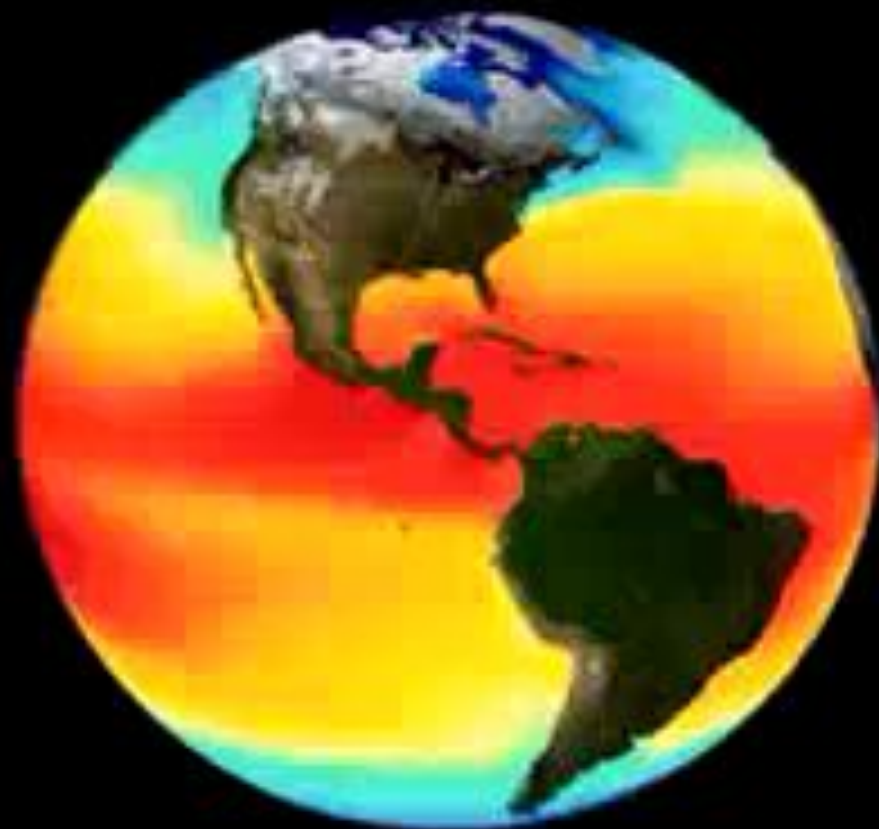
В наибольшей степени величину скорости звука определяет **температура воды**.
Общее распределение *температуры* в Мировом океане обуславливается годовым запасом тепла, получаемого океаном от Солнца. Наряду с этим действуют и такие факторы:

- течения;
- теплопроводность;
- испарения с поверхности моря;
- теплообмен между морем и атмосферой;
- перемешивание воды под влиянием ветра;
- образование и таяние льда.

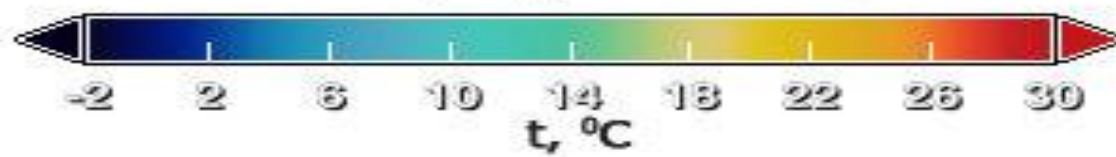
Характер изменения скорости звука в сильно зависит от начальной температуры воды: чем ниже начальная температура воды, тем эта зависимость сильнее, чем выше - тем она слабее

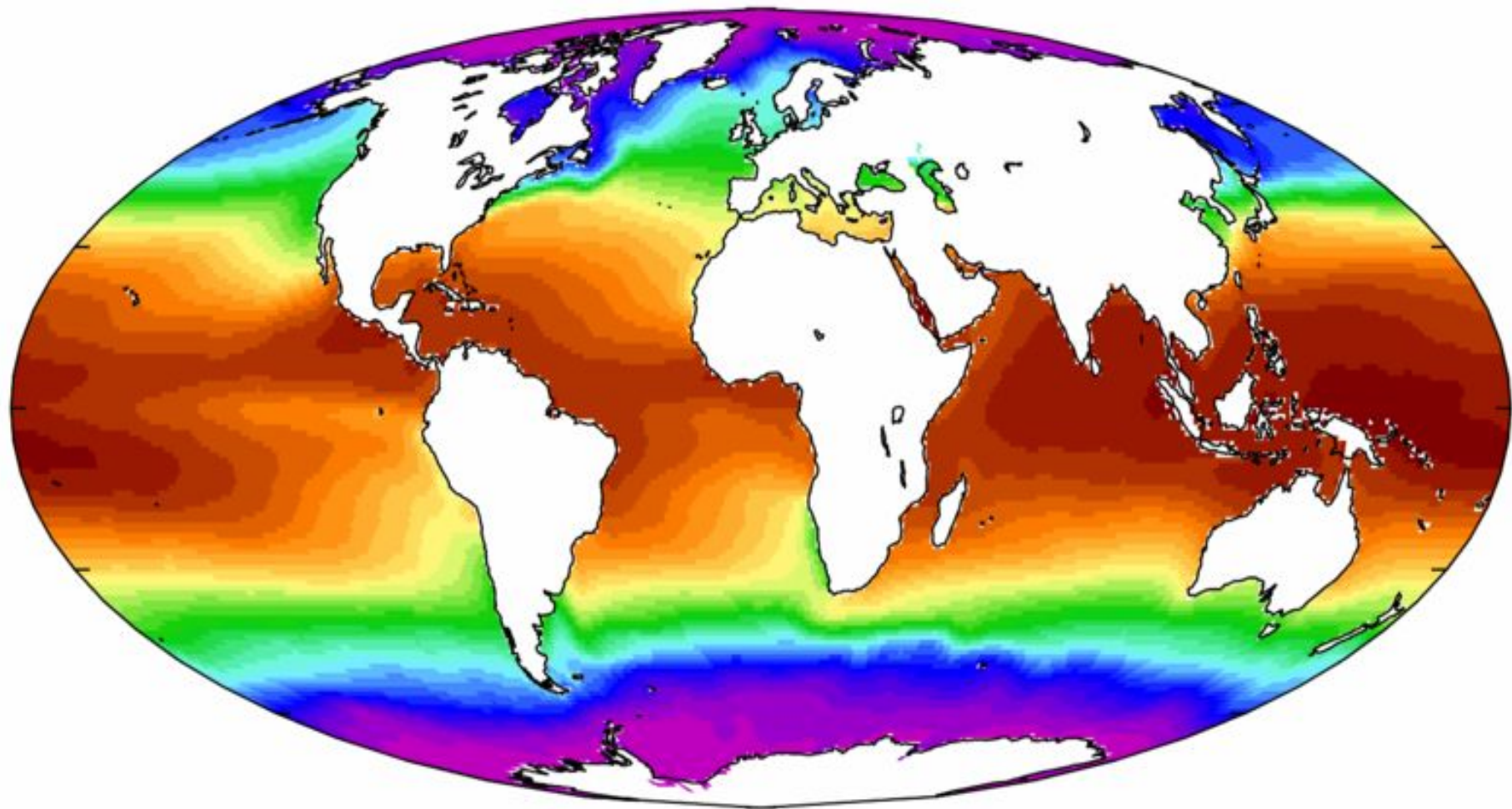
Начальная температура (°C)	Изменение С вследствие повышения температуры воды на 1°C (м/с)
0	4.4
5	3.8
10	3.5
15	3.1
20	2.7



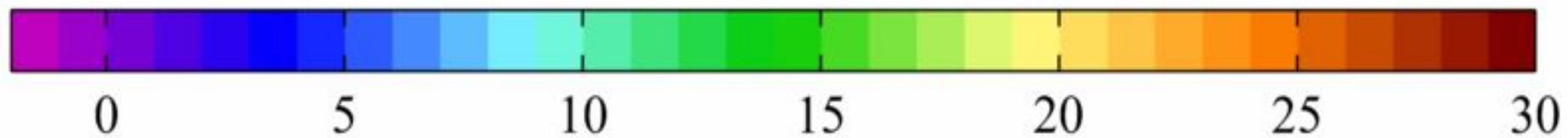


Температурная шкала

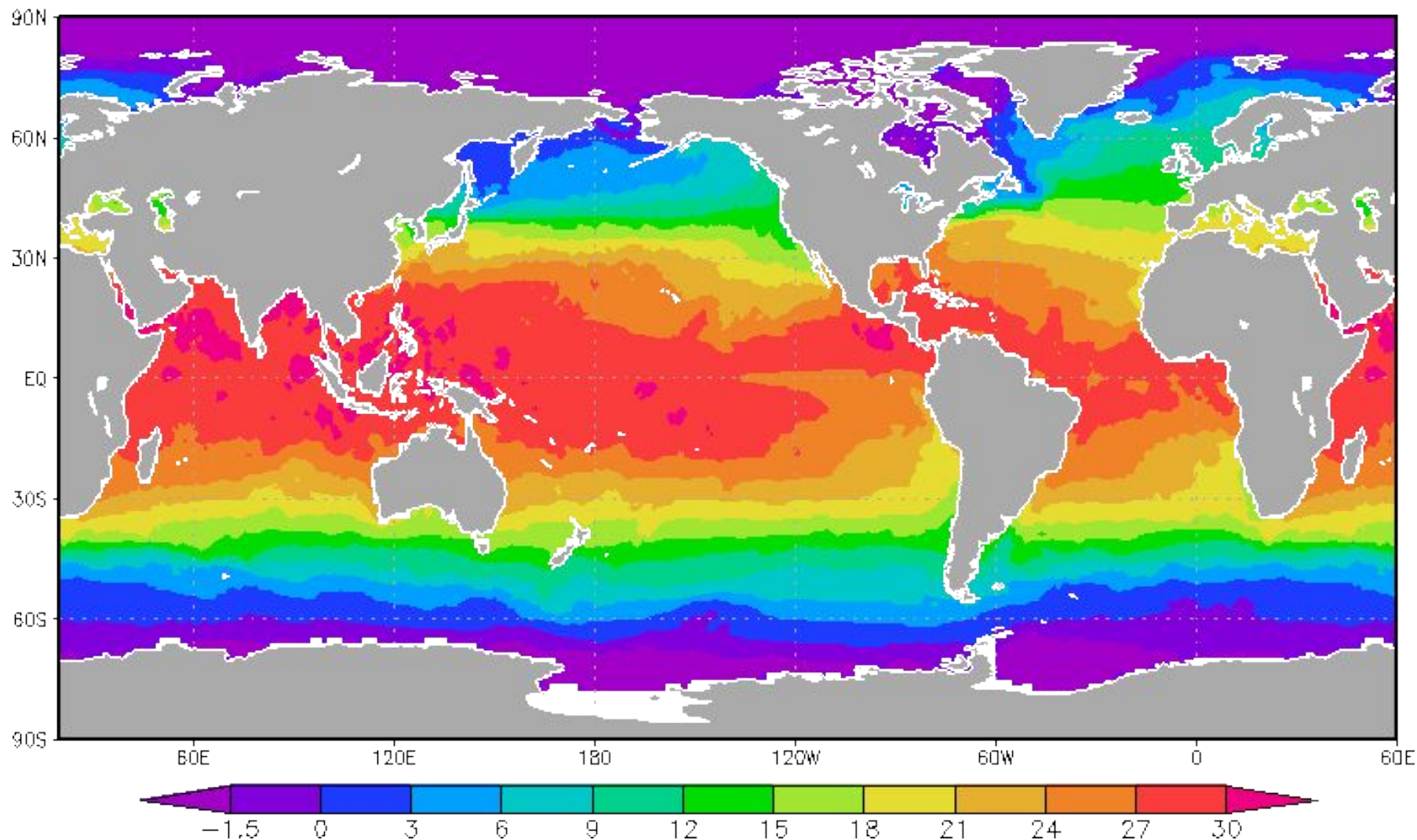




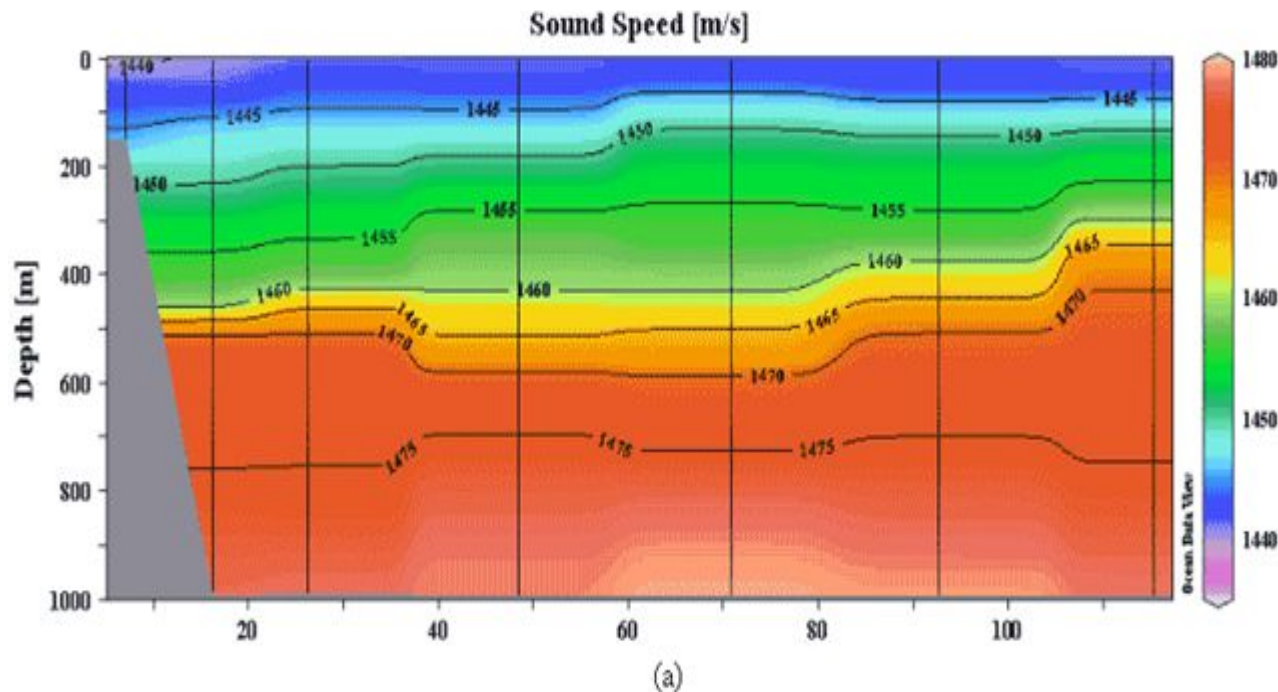
Sea-surface temperature [$^{\circ}\text{C}$]



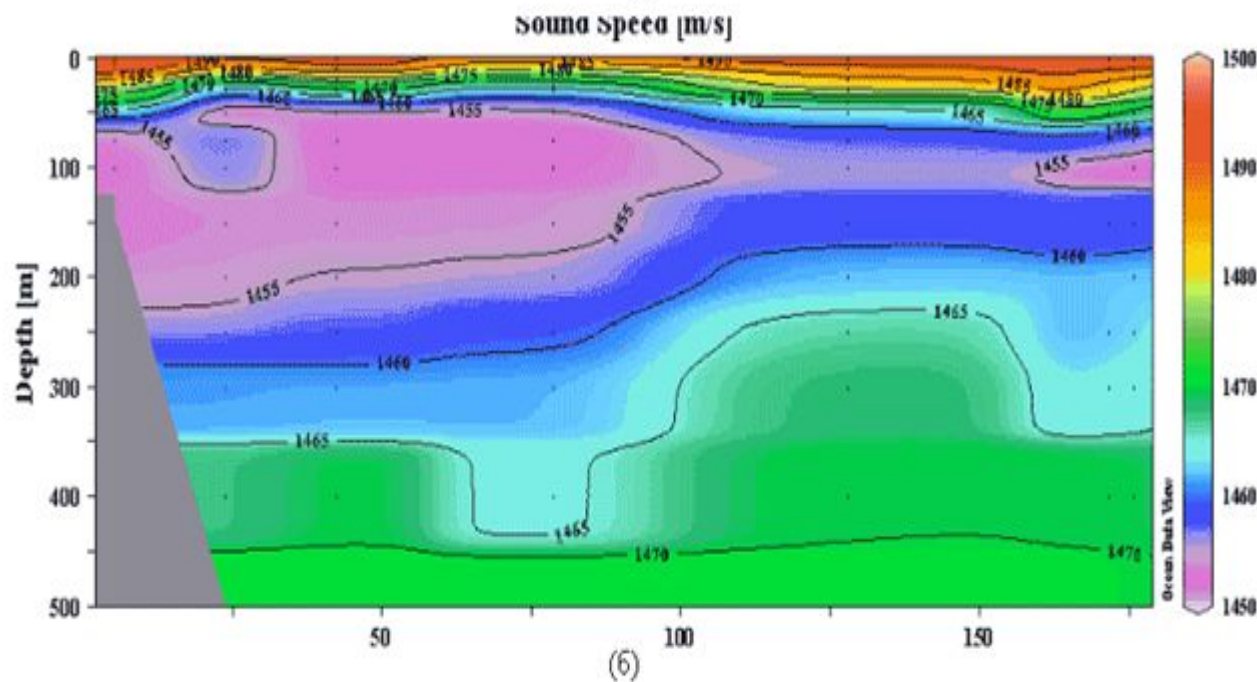
23.05.2012–02.06.2012



Температура поверхности Мирового океана за декаду по данным Гидрометцентра России на основе спутниковых и контактных измерений. Поле обновляется ежедневно в 10.00 по мск. времени и представляет среднюю за 10 суток температуру поверхности океана в °C



Вертикальное распределение скорости звука на разрезах в районе Авачинского залива в марте (а) и июле (б).



На горизонтальной оси указано расстояние в милях.

Плотность воды

Сжимаемость и плотность морской воды зависят от степени ее солености. При увеличении солености модуль объёмной упругости $\chi = \rho \cdot c^2$ и плотность среды ρ возрастают, причем увеличение χ превосходит соответствующий рост ρ .

Средняя соленость составляет 35‰.

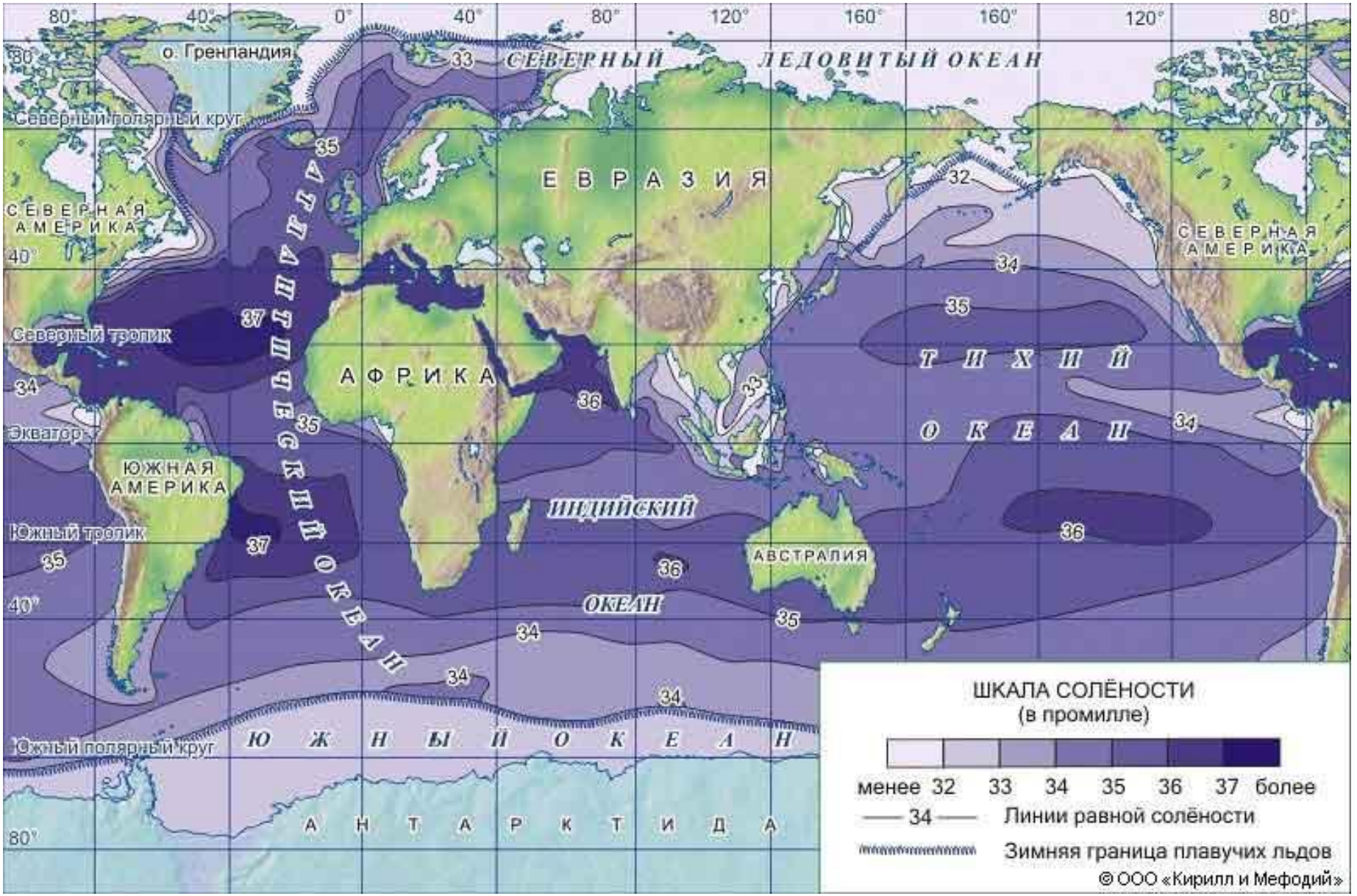
В большей части Мирового океана соленость колеблется в пределах от 31 до 38‰

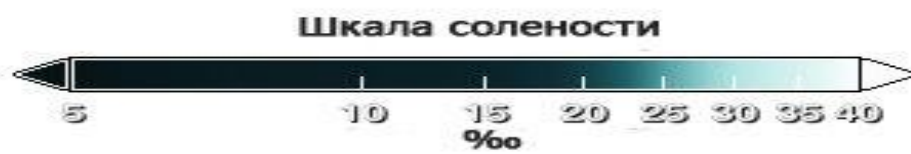
Средняя соленость *на поверхности* равна 34,7 ‰

Изменение солености (‰)

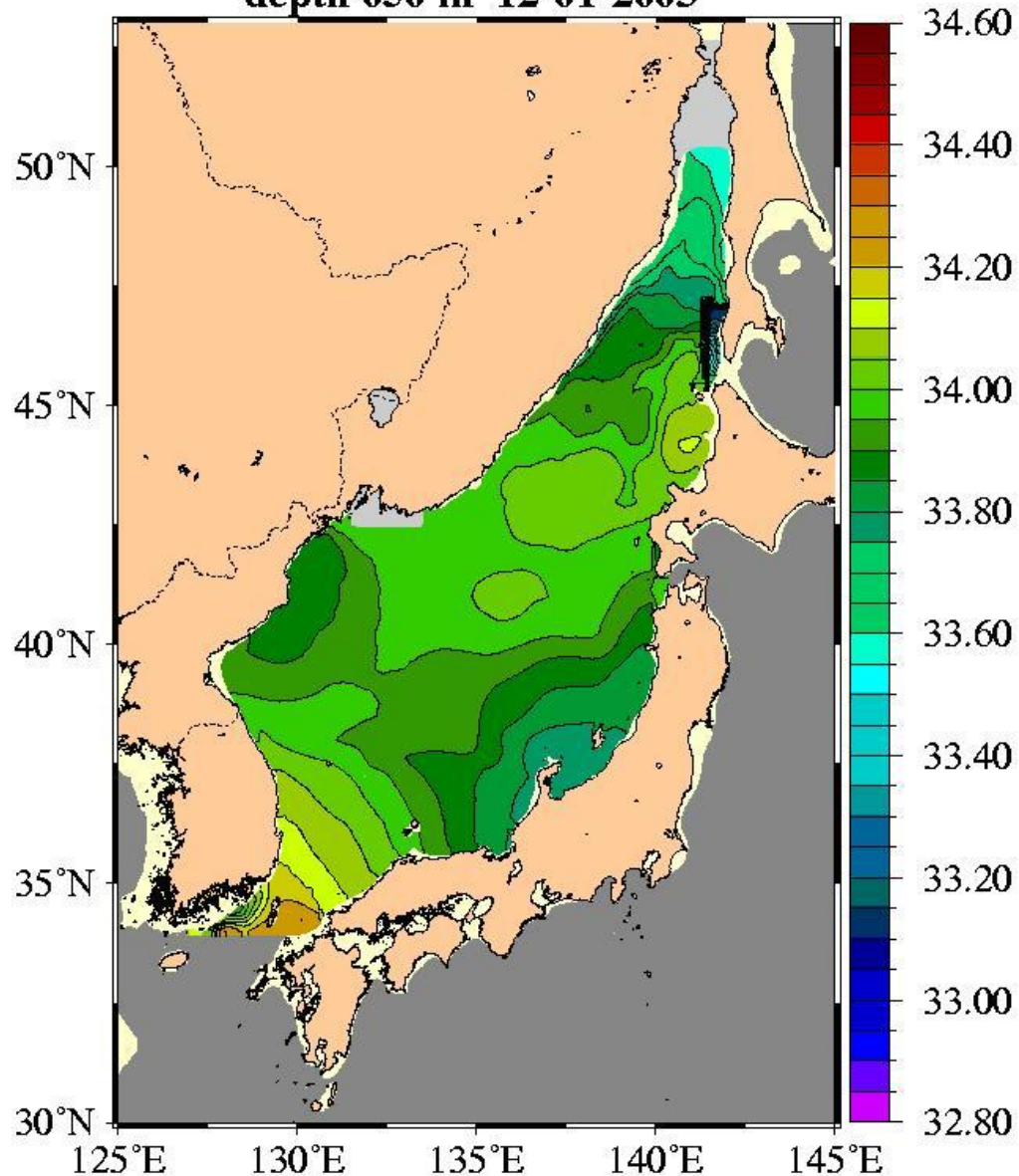
с широтой	по океанам	по морям
тропики – 35,8	Атлантический – 35,5	Красное - 42
экватор – 34	Тихий - 34,8	Средиземное - 39
умеренные – 33	Индийский – 34,8	Баренцево – 35
высокие - 32	Северный Ледовитый - 32	Черное - 18
		Карское - 10

Карта поверхностной солёности вод Мирового океана (‰)





**MODAS synthetics: Salinity
depth 050 m 12-01-2003**



Карта солености на
глубине 50 м Японское
море 12 января 2003 г.

При солености воды, равной 24,7 ‰, температура наибольшей плотности становится равной температуре замерзания ($-1,33^{\circ}\text{C}$),
По глубине соленость меняется лишь до 1500 м, ниже - она практически постоянна

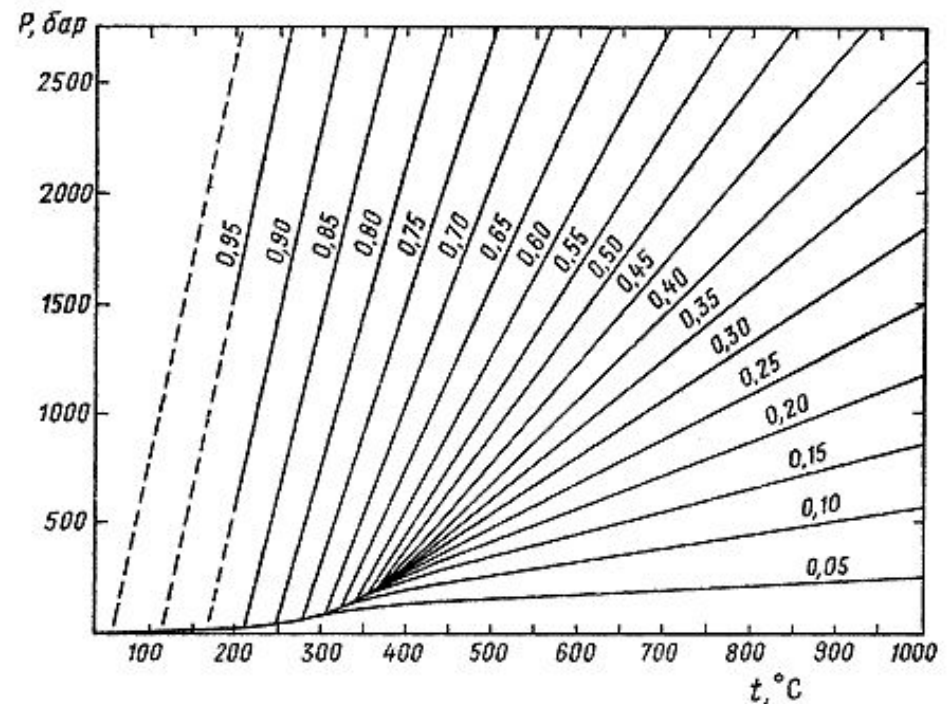
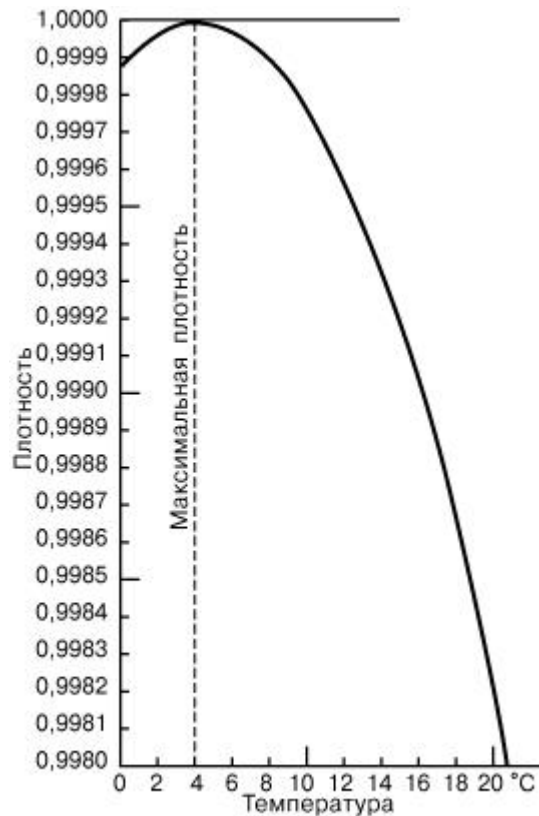
Изменение S на 1 ‰ приводит к изменению C на 1,2 м/с

Плотность воды является функцией температуры, солёности и давления:

$$\rho = f(t, S, P)$$

Плотность солёной воды превышает плотность дистиллированной воды и зависит от *состава растворённых солей* и *общей солёности S* .

Общая солёность морской воды не превосходит 40‰, тогда как в солёных озерах она достигает 250 — 300‰.



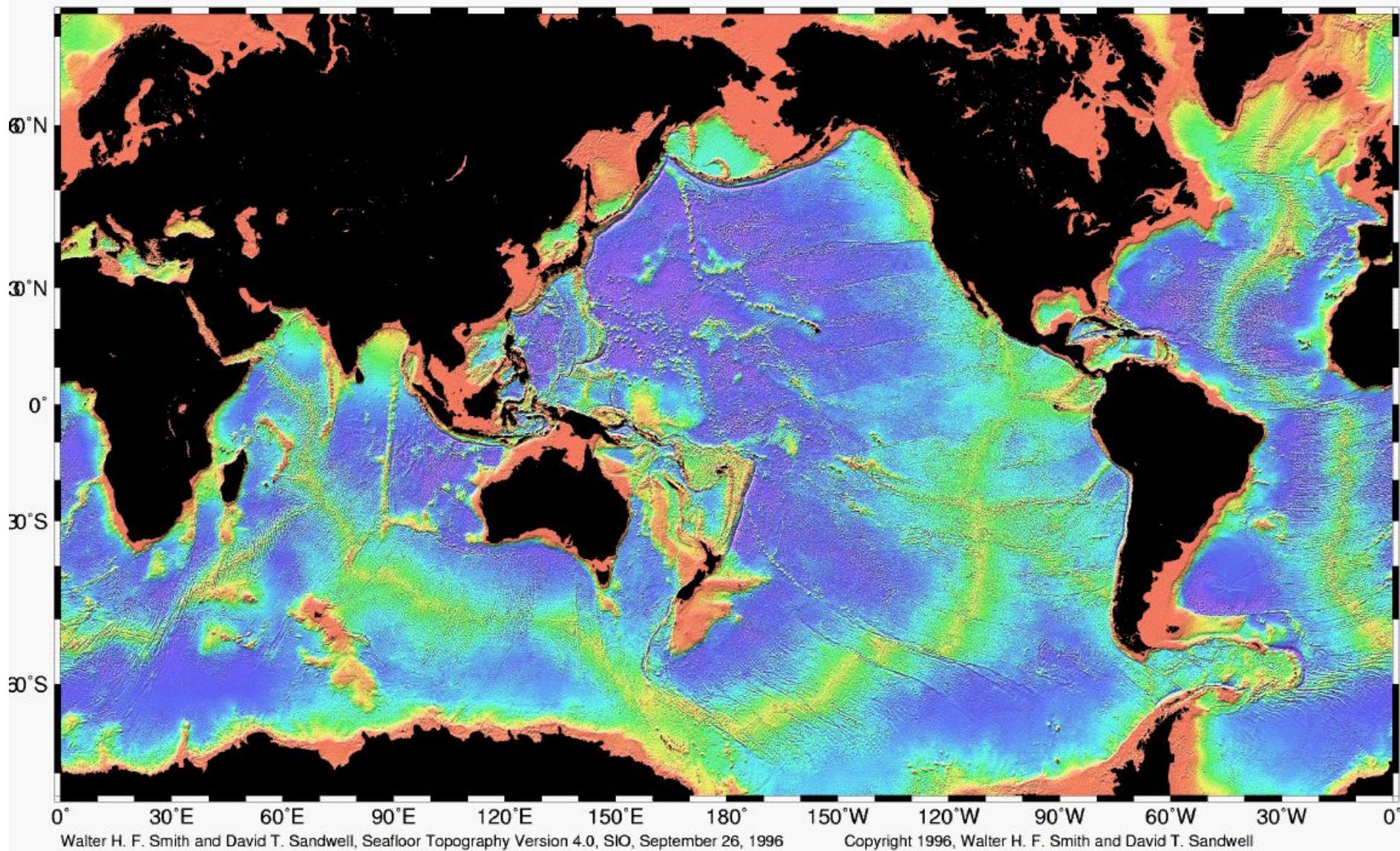
Зависимость плотности воды от температуры и давления.

Гидростатическое давление воды

Возрастание гидростатического давления ведет к увеличению модуля объемной упругости и, следовательно, к увеличению скорости звука

Изменение P на 1 атм (10 м глубины) приводит к приращению C на 0,2 м/с

Карта глубин Мирового океана с разрешением 3км







Плотность морской воды



Определение скорости звука в океане

Отношение приращения каждого из указанных параметров к приращению глубины называется градиентом.

- градиент скорости звука (с) $G_c = \frac{dC}{dh}$

- температурный градиент (К/м) $G_t = \frac{dt}{dh}$

- градиент солености (‰) $G_s = \frac{ds}{dh}$

- градиент статического давления (Па/м) $G_p = \frac{dP_0}{dh}$

Эмпирические формулы для расчета абсолютных значений скорости звука в морской воде имеют вид:

$$C = C_o + \Delta C_t + \Delta C_s + \Delta C_p + \Delta C_{tSP} ,$$

где C_o - опорное значение скорости звука при $t=0^\circ\text{C}$, $S=35\text{‰}$, $P=0$.

Формула Вуда имеет вид:

$$C = 1450 + 4,206T - 0,0366T^2 + 1,137(S - 35) + 0,0175$$

Погрешность расчета по ней минимальная при температуре около $t = 10^\circ\text{C}$ и не превышает **1,5 м/с**. При отклонении температуры от 10°C погрешность возрастает. Так для пресной воды при температуре 30°C погрешность достигает 6 м/с.

Формула Лерея имеет вид:

$$C = 1492,9 + 3(T - 10) - 0,006(T - 10)^2 - 0,04(T - 18)^2 + \\ + 1,2(S - 35) - 0,01(T - 18)(S - 35) + 0,0164h$$

Формула Дель-Гроссе:

$$C = 1448,6 + 4,618T - 0,0523T^2 + 0,00023T^3 + 1,25(S - 35) - \\ - 0,011 \times (S - 35)T + 0,0027 \times 10^{-5} \times (S - 35)t^4 - 2 \times 10^{-7} \times \\ \times (S - 35)^4 \times (1 + 0,577T - 0,0072T^2) + 0,0175h$$

При солёности выше 15‰ и любой температуре погрешность расчета по формуле Дель-Гроссо не превышает **0,5 м/с**.

Формула Вильсона имеет следующий вид:

$$C(S,T,P) = c_0 + D c_T + D c_S + D c_P + D c_{STP} \quad C_0 = 1449,14 \text{ м/с}$$

$$D_{cT} = 4.5721T - 4.4532 \cdot 10^{-2}T^2 - 2.6045 \cdot 10^{-4}T^3 + 7.9851 \cdot 10^{-6}T^4$$

$$D_{cS} = 1.39799(S - 35) + 1.69202 \cdot 10^{-3}(S - 35)^2$$

$$D_{cP} = 1.60272 \cdot 10^{-1}P + 1.0268 \cdot 10^{-5}P^2 + 3.5216 \cdot 10^{-9}P^3 - 3.3603 \cdot 10^{-12}P^4;$$

$$\begin{aligned} D_{cSTP} = & (S - 35)(-1.1244 \cdot 10^{-2}T + 7.7711 \cdot 10^{-7}T^2 + 7.7016 \cdot 10^{-5}P - 1.2943 \cdot 10^{-7}P^2 + 3.1580 \\ & \cdot 10^{-8}PT + 1.5790 \cdot 10^{-9}PT^2) \\ & + P(-1.8607 \cdot 10^{-4}T + 7.4812 \cdot 10^{-6}T^2 + 4.5283 \cdot 10^{-8}T^3) \\ & + P^2(-2.5294 \cdot 10^{-7}T + 1.8563 \cdot 10^{-9}T^2) + P^3(-1.9646 \cdot 10^{-10}T) \end{aligned}$$

где $c(S,T,P)$ - скорость звука, м/с;

T - температура, °С;

S - соленость, промилле ‰;

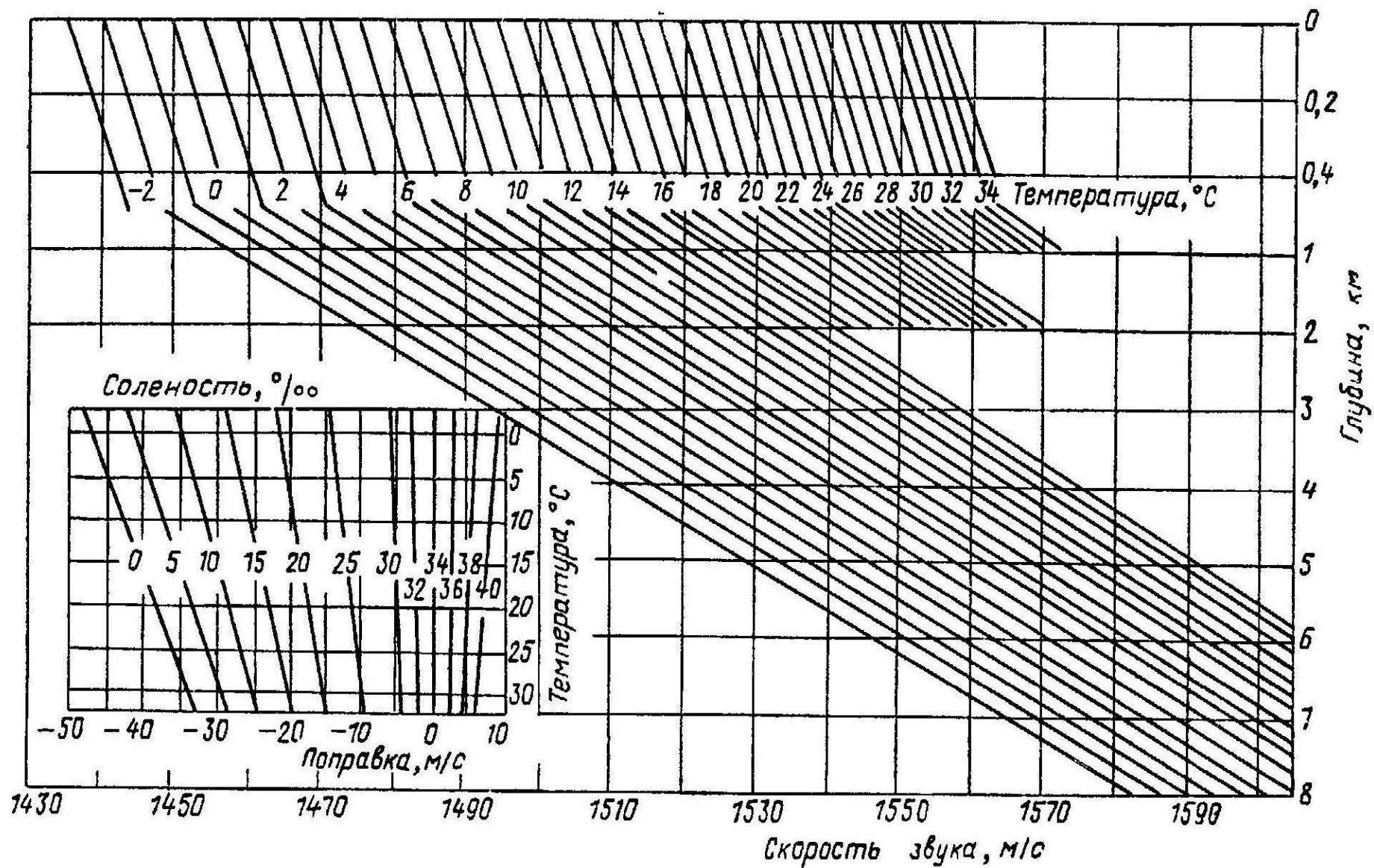
P - гидростатическое давление, МПа.

Формула Вильсона справедлива для: диапазонов:

температура от -4° до 30°;

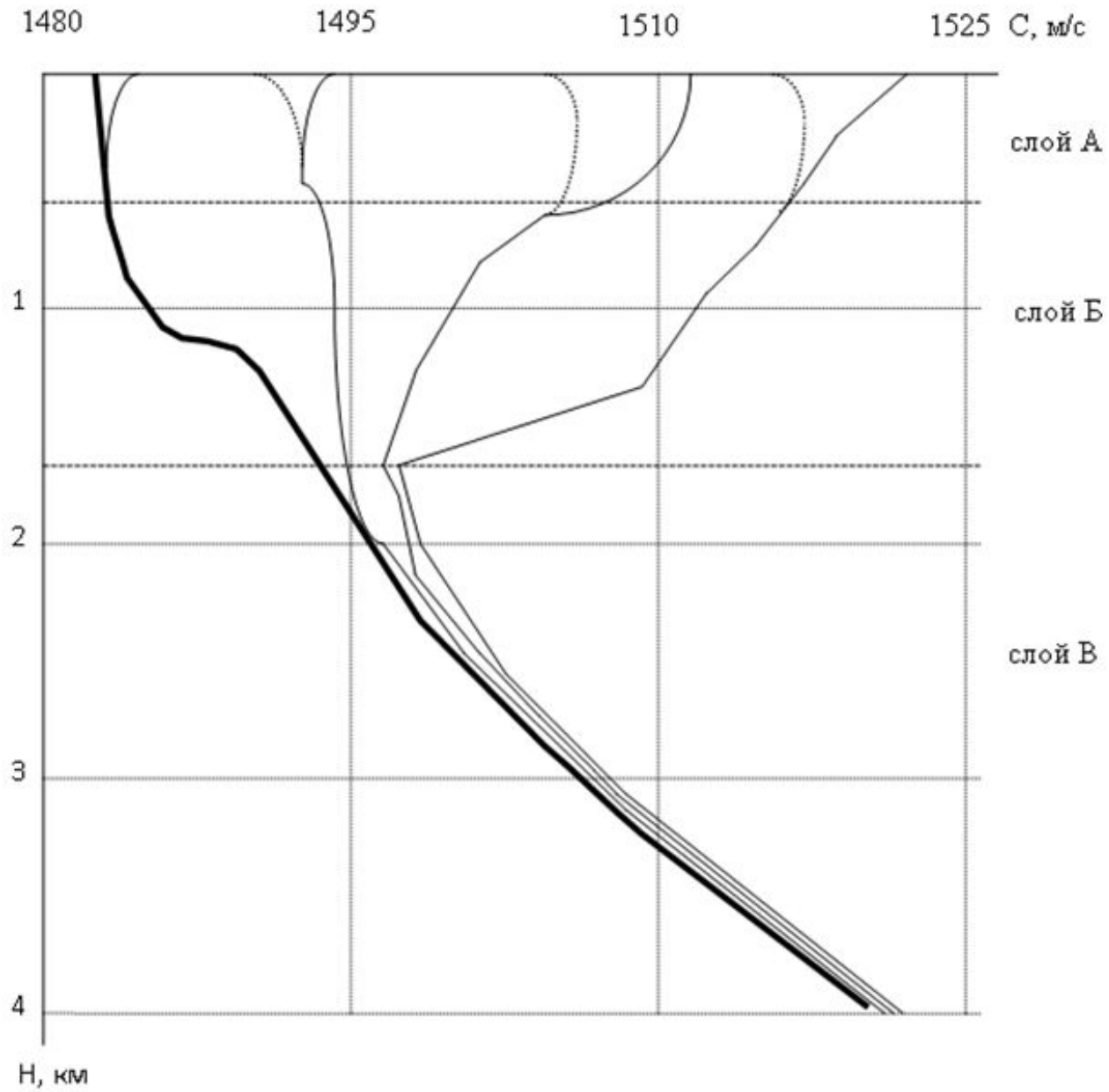
соленость от 0 до 37 ‰;

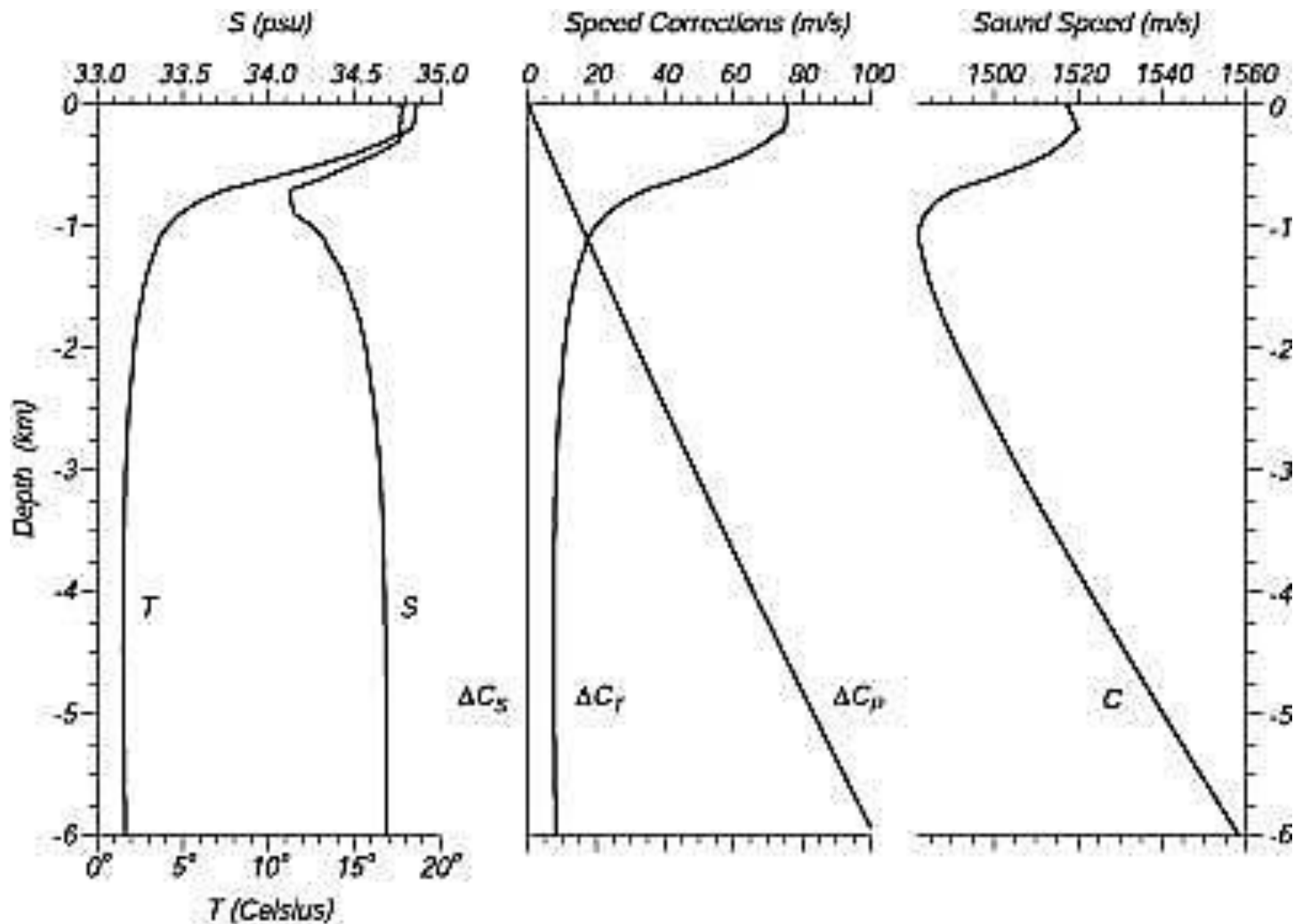
гидростатическое давление от 0,1 МПа до 100 МПа. **СКП $\approx 0,3$ м/с**



Номограмма для определения скорости звука в зависимости от температуры воды и глубины. В левой части рисунка приведен график поправок для случая, когда соленость воды отличается от 35‰.

Пространственно-временная изменчивость скорости звука в море





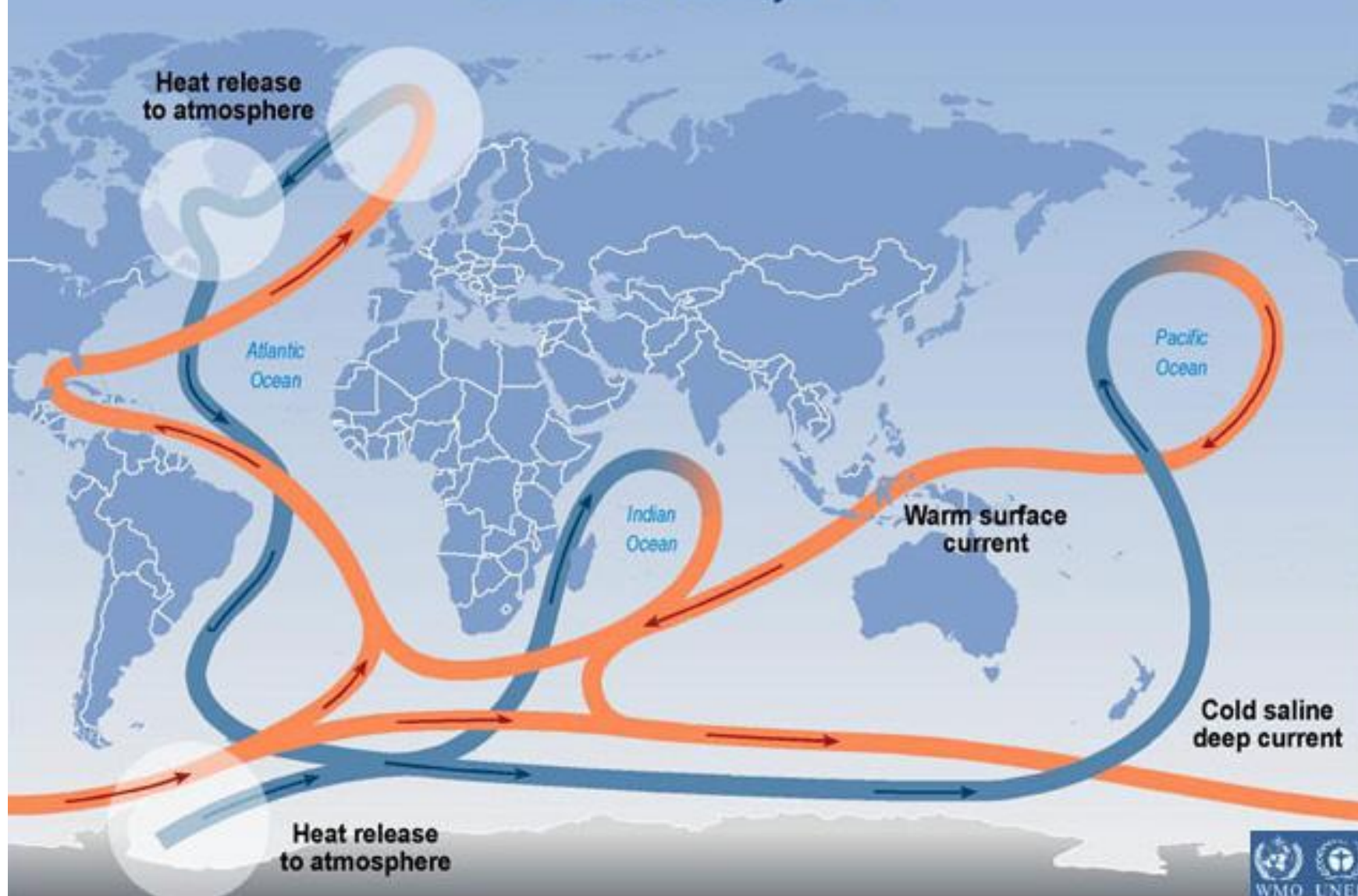
Процессы создающие звуковой канал в океане.

Слева: T и S измеренные 28.01.1987 на $\varphi=33^\circ52.90' \text{ N}$ и $\lambda=141^\circ55.80' \text{ E}$ в северной части Тихого Океана.

В центре: Изменение C в зависимости от изменений T , S и h .

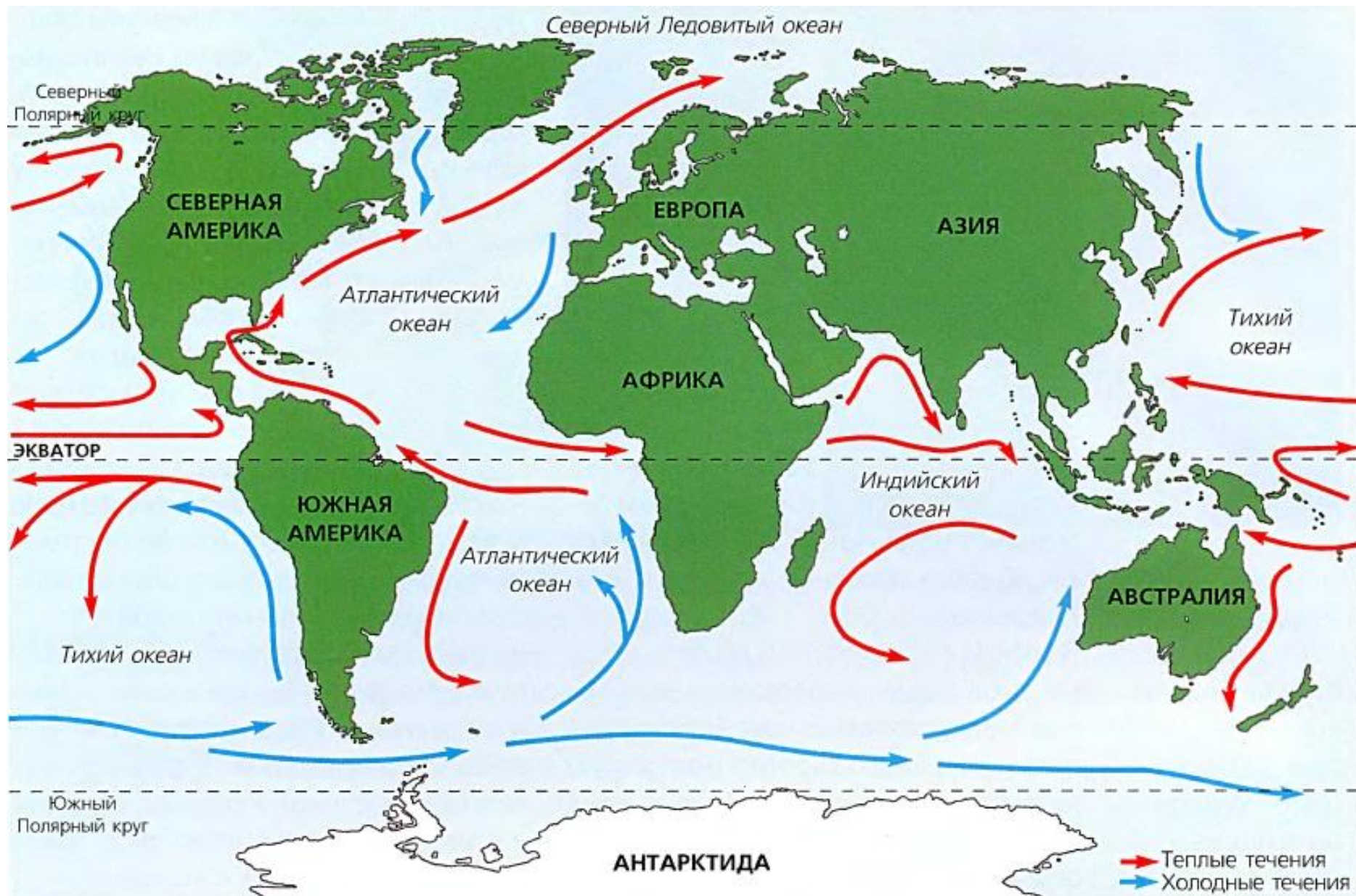
Справа: звуковой канал на глубине около 1 км,

Great ocean conveyor belt

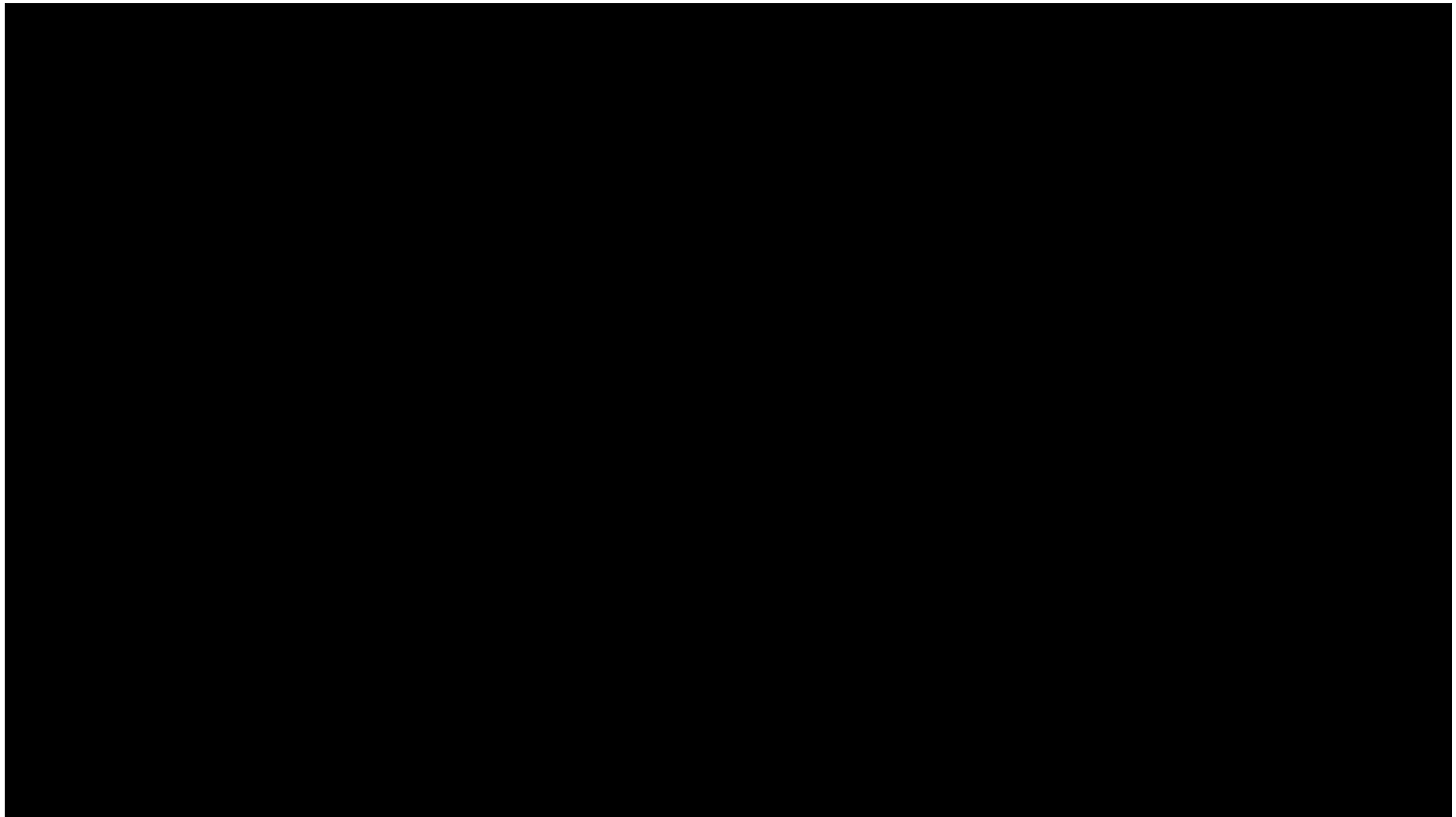


Система термогалинной циркуляции является конвейерной лентой океана, которая переносит тепло из экваториальных вод в более холодные регионы.

Течения Мирового океана



Визуализация океанских течений



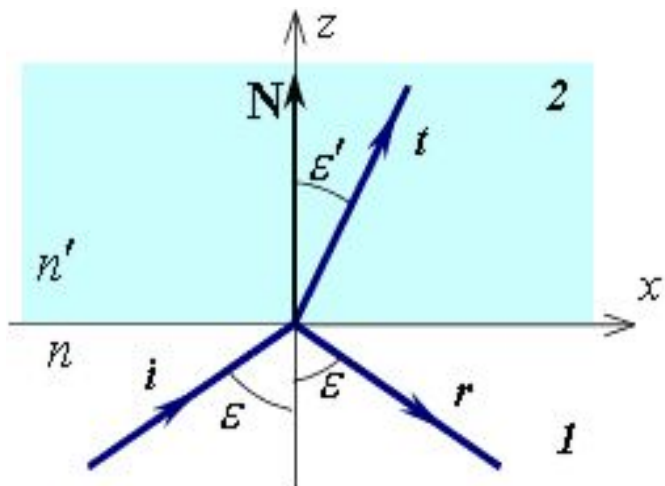


Отражение и преломление звука

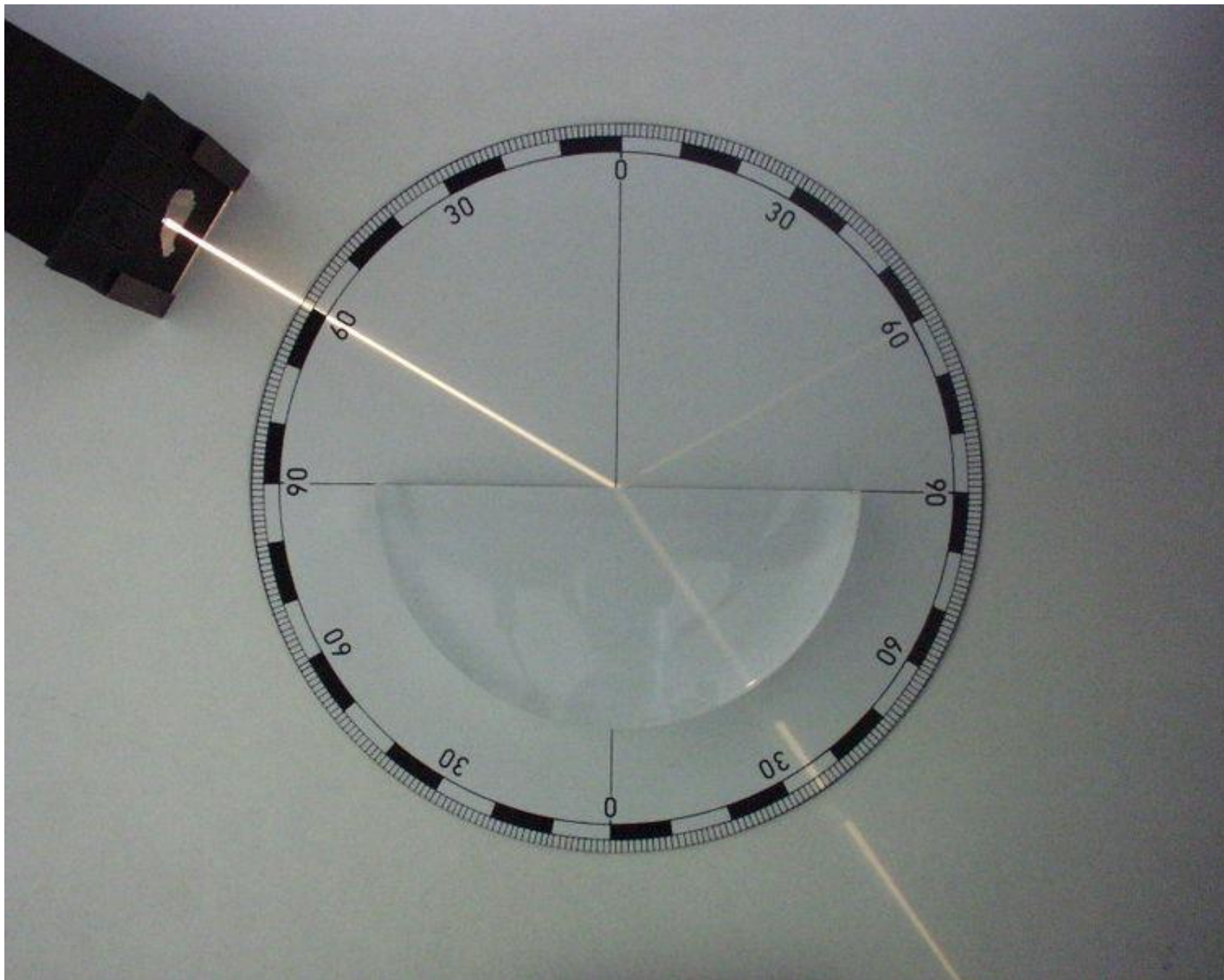
Классический закон преломления Снеллиуса:

1. Падающий луч, преломленный луч и нормаль к поверхности раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.
2. Закон отражения: угол падения равен углу отражения $\theta = \theta_1$.
3. Закон преломления (Снелиуса): $\sin$ угла падения относится к $\sin$ угла преломления, как отношение скорости в 1-й среде к скорости во 2-й среде:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{C_1}{C_2} > \sin \theta_1, \quad C_2 > C_1 \quad \text{или} \quad \sin \theta_2 < \sin \theta_1, \quad C_2 < C_1$$

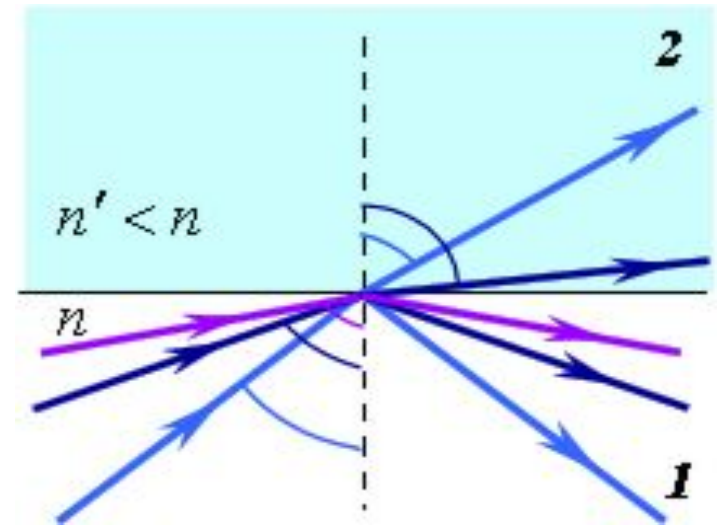


N – вектор нормали
Угол падения ϵ
 N_k – нормаль
Угол преломления ϵ'
Угол отражения ϵ



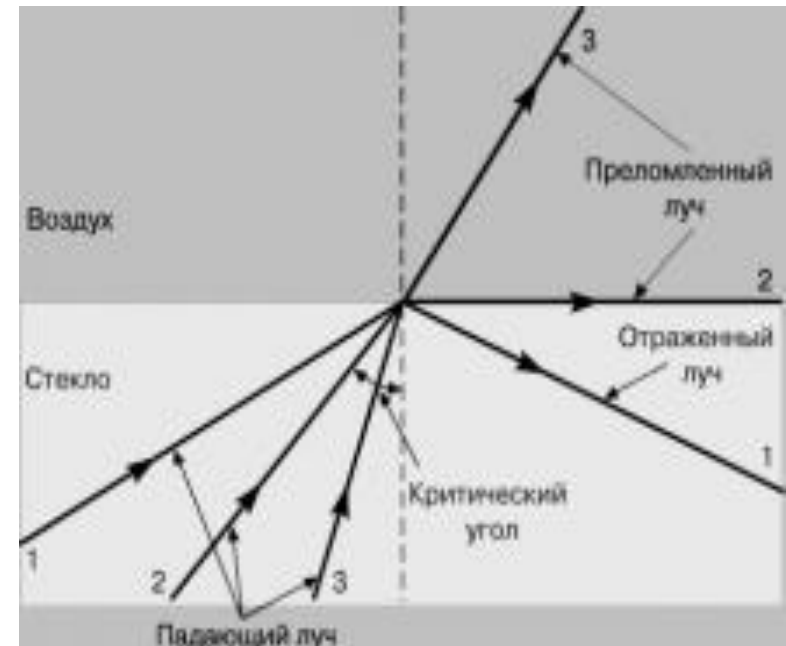
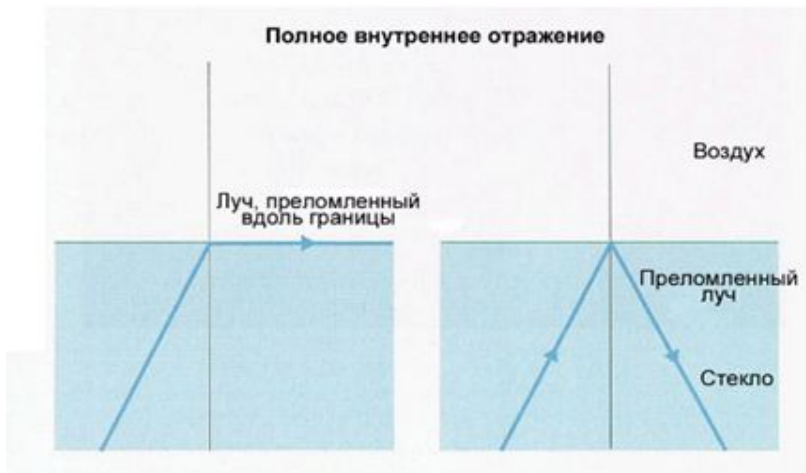
Полное внутреннее отражение

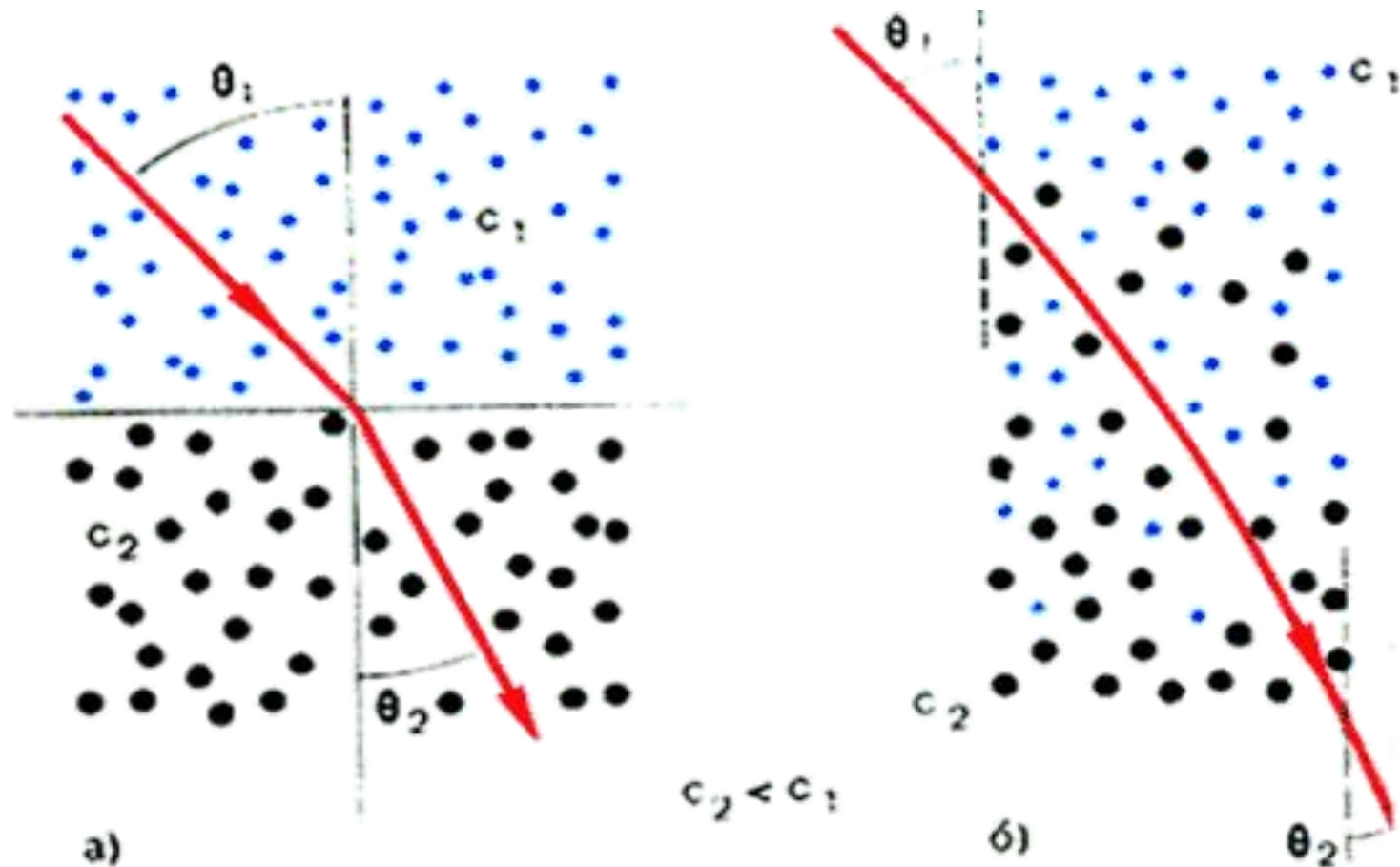
$$\sin \theta \geq \frac{n'}{n} \quad \text{- условие полного внутреннего отражения}$$



Критический угол падения

$$\sin \theta_{\text{кр}} = \frac{330 \text{ м/с}}{1500 \text{ м/с}} = 0,22 \quad \theta_{\text{кр}} = 13^\circ$$

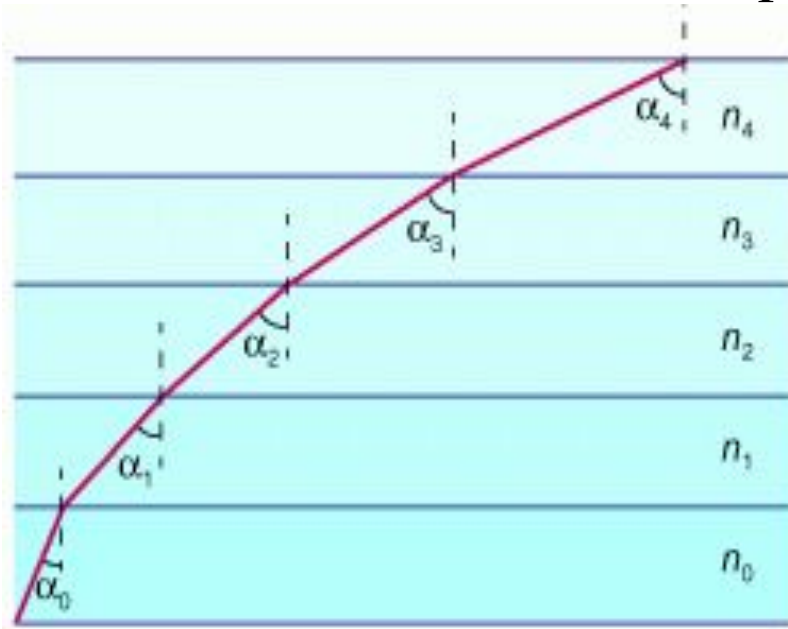




Преломление лучей при переходе из одной среды в другую:
а - резкая граница между средами; *б* - плавное изменение скорости звука.

И при скачкообразном и при плавном изменении скорости волны всегда "стремятся" *повернуть в том направлении, в котором уменьшается скорость их распространения.*

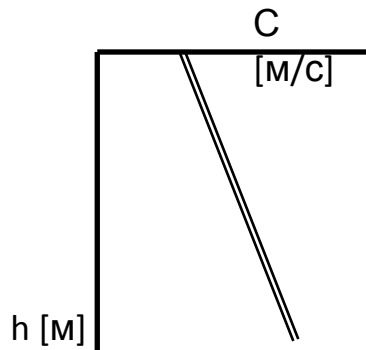
Рефракция звука



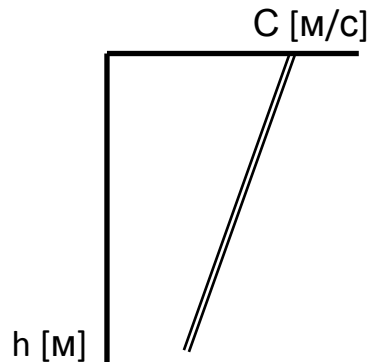
Рефракцией звука называется искривление траектории движения звука за счёт неоднородности среды.

Типы рефракции:

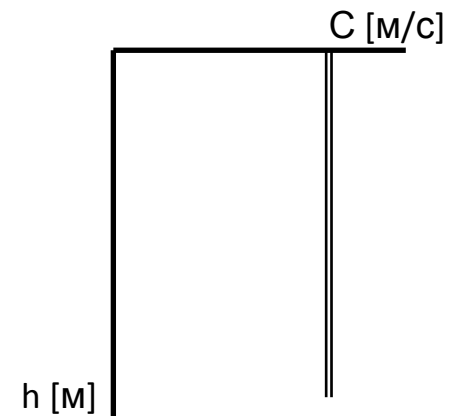
1. Положительная;
2. Отрицательная;
3. Изотермия



а) Положительная рефракция характеризуется положительным градиентом скорости звука: $G_c > 0$

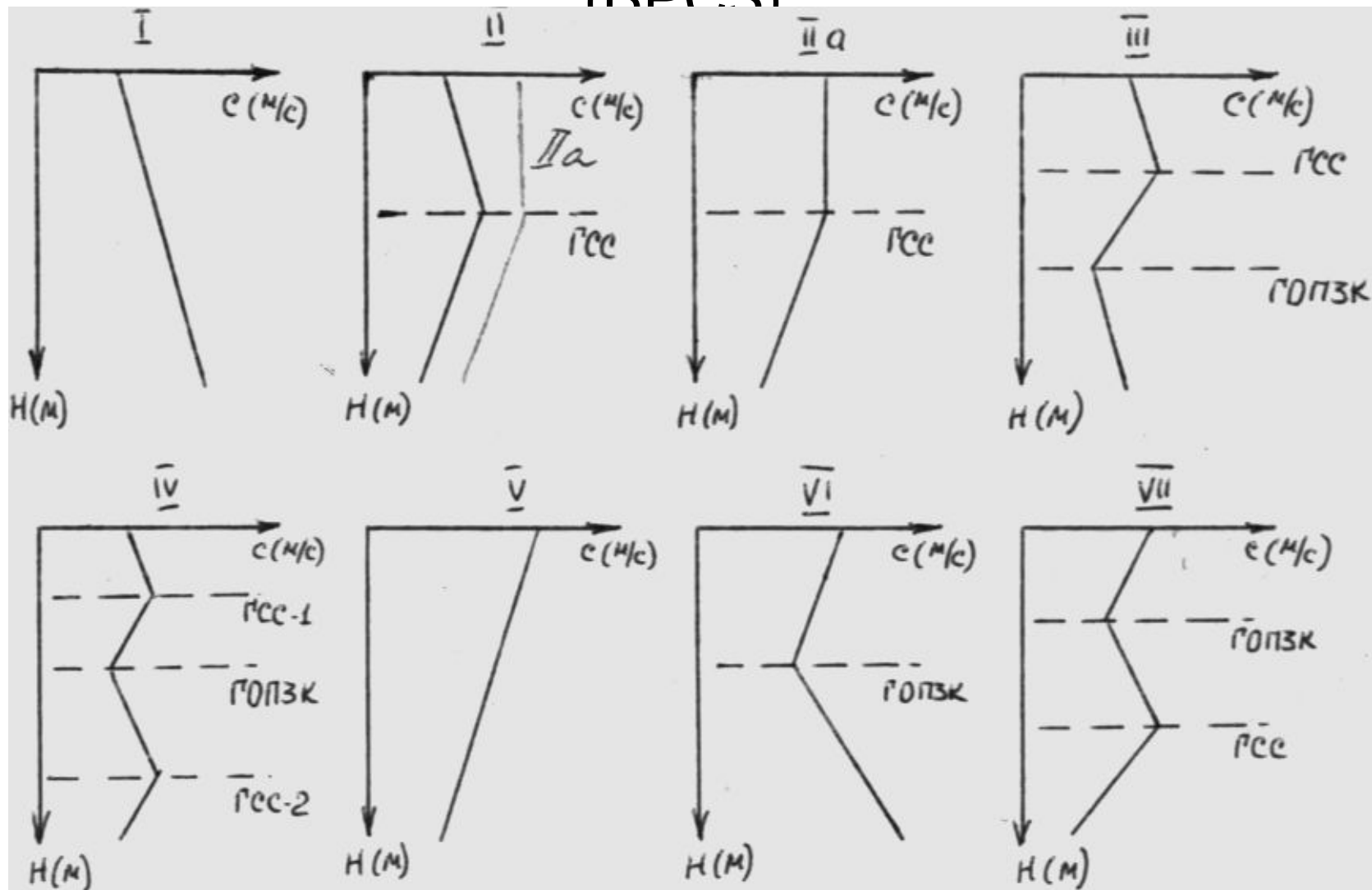


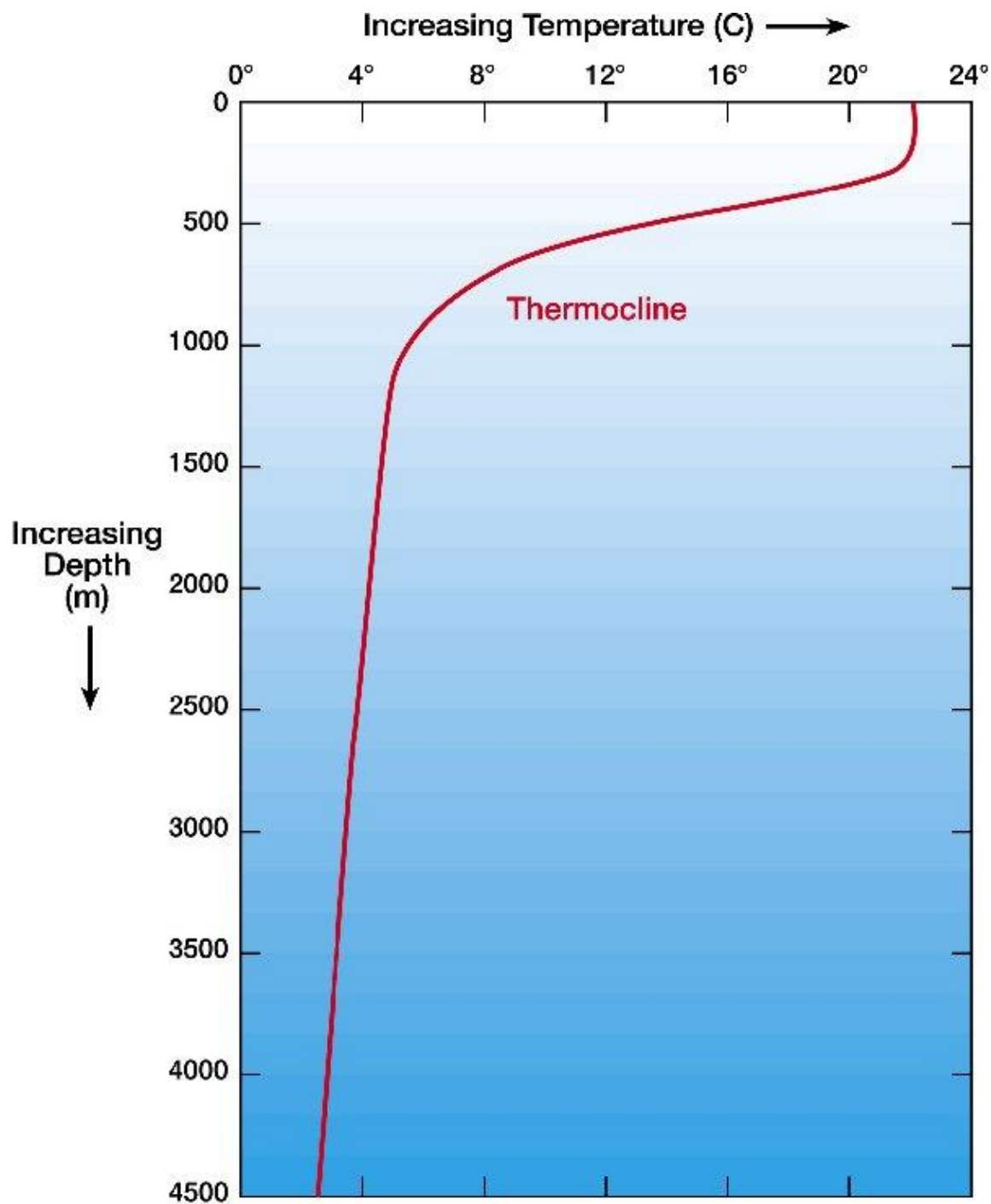
б) Отрицательная рефракция обладает отрицательным градиентом скорости звука: $G_c < 0$



Изотермия: $G_c = 0$

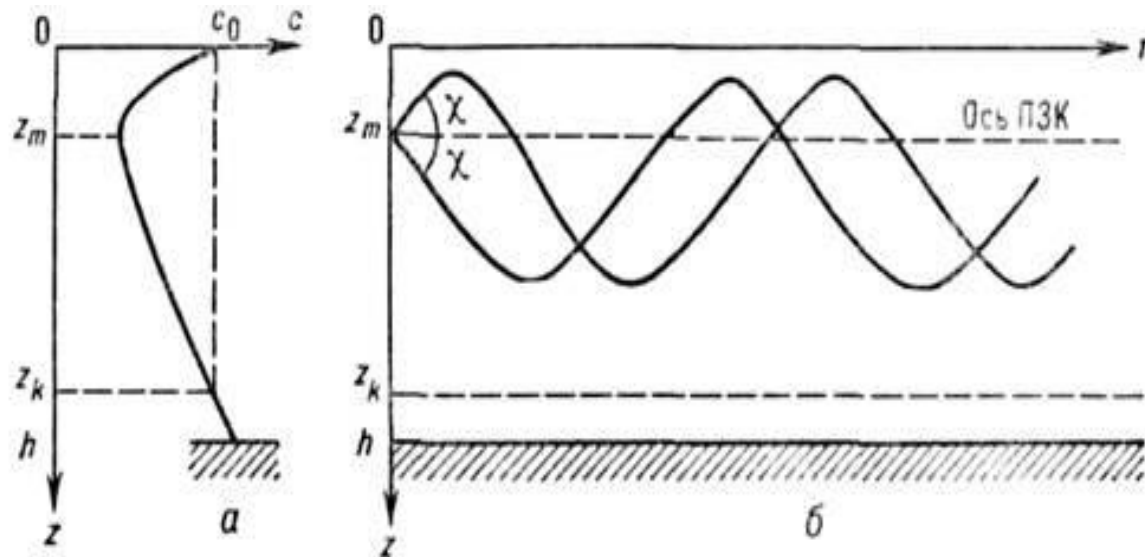
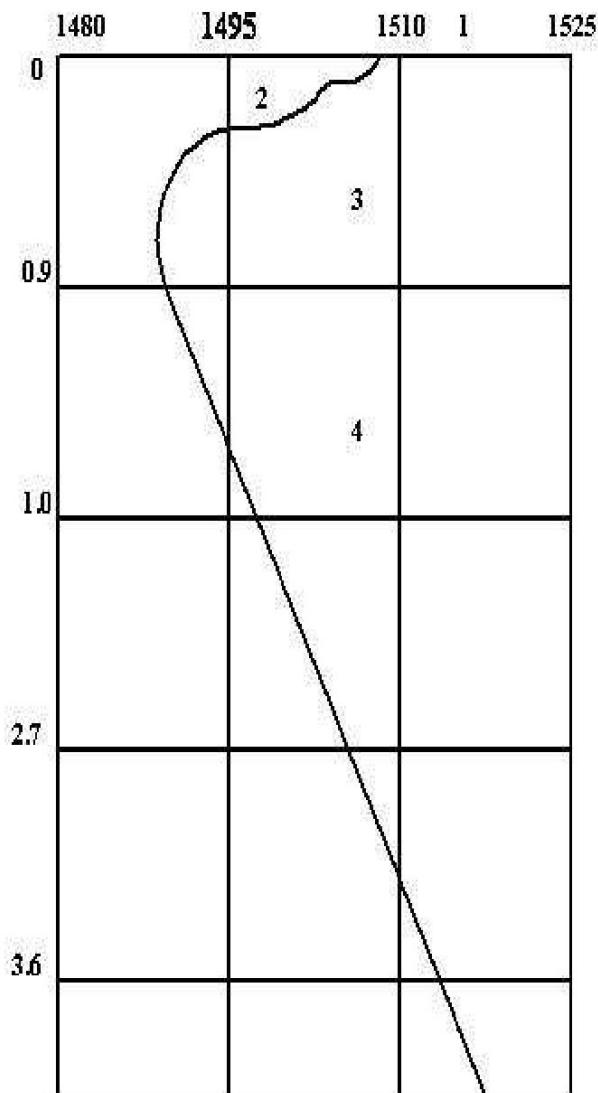
Вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ)





Подводный звуковой канал

ГЛУБИНА
км



Подводный звуковой канал:

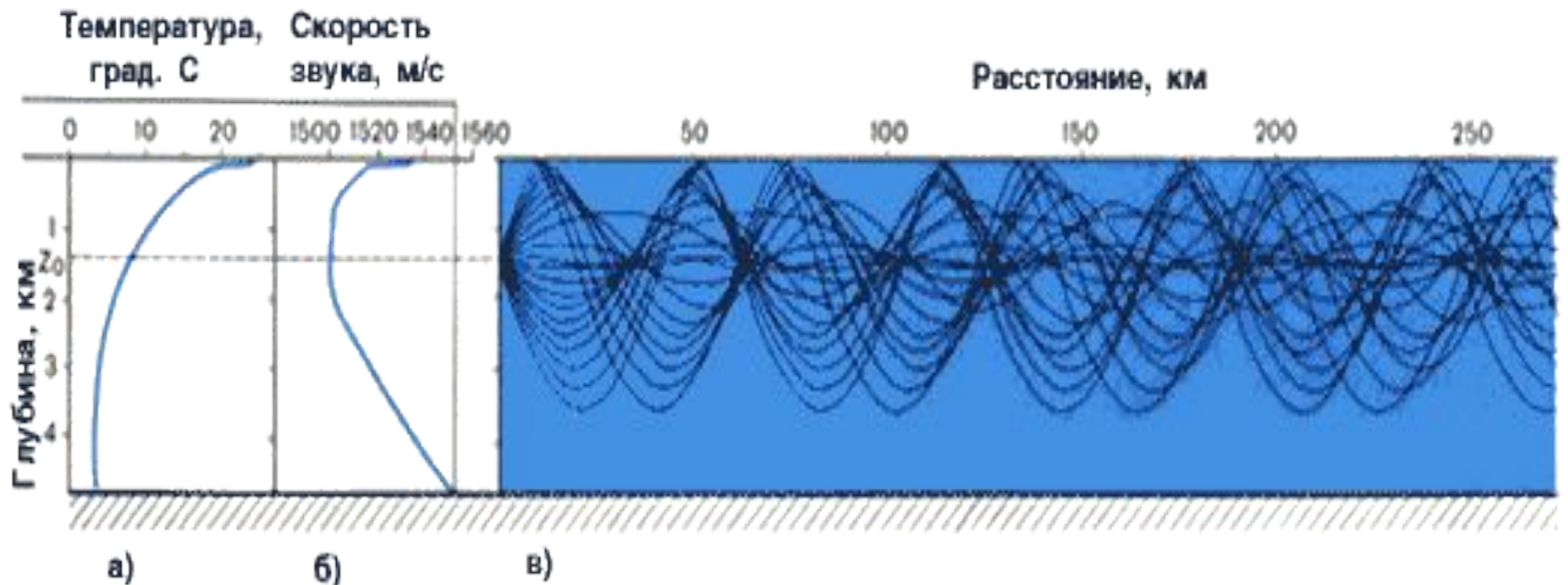
a - типичная зависимость скорости звука от глубины;

z_m - глубина оси канала,

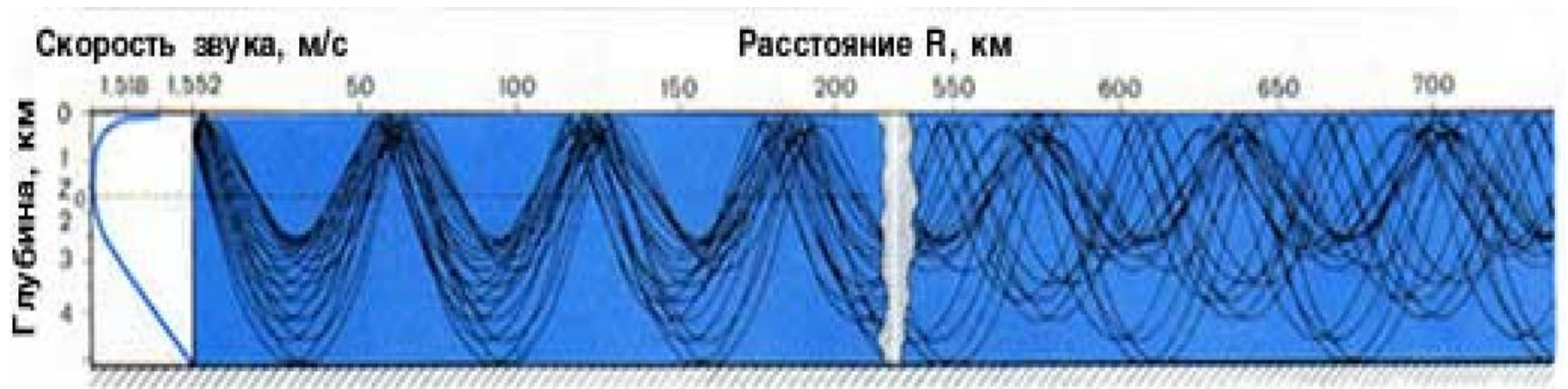
h ; - глубина океана,

z_k - глубина, на которой скорость звука равна скорости звука у поверхности;

$б$ - лучевая картина распространения звука, источник звука расположен на глубине z_m .

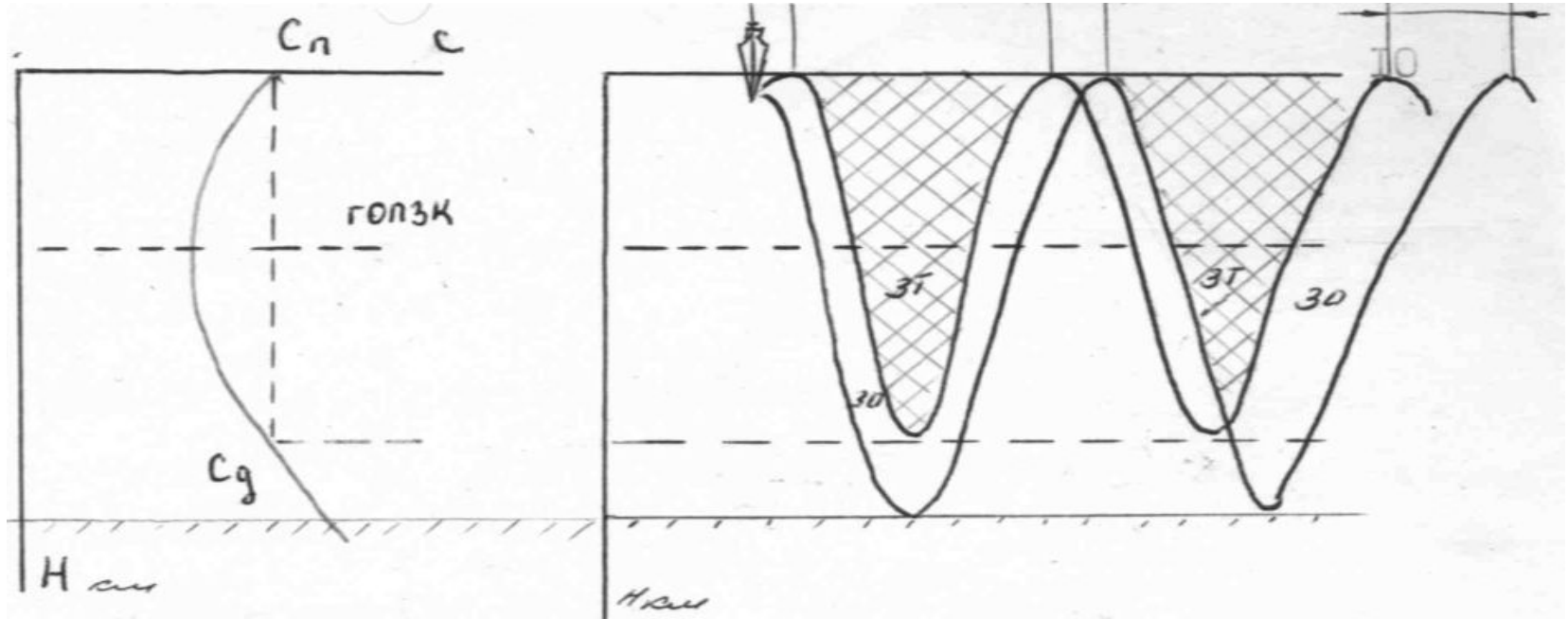


Распространение звука в подводном звуковом канале в случае, если источник звука находится на оси канала.



Распространение звука в подводном звуковом канале в случае, если источник звука находится выше оси канала.

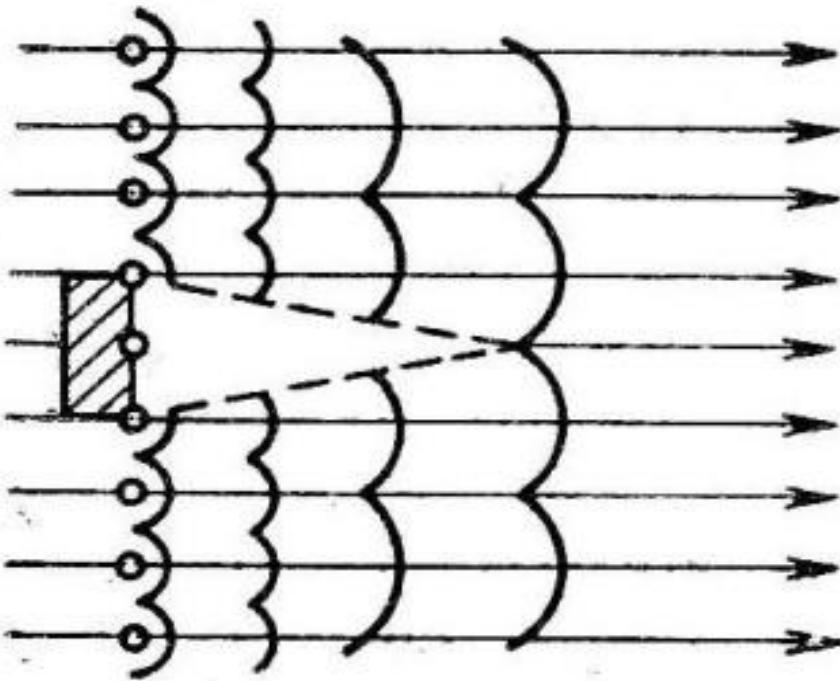
Дальние зоны акустической освещенности (ДЗАО)



Условия возникновения ДЗАО:

1. Наличие глубоководного ПЗК;
2. Скорость звука у дна C_d должна быть больше скорости звука у поверхности C_n ;
3. Образуются только от мощных источников (акустических станций).

Дифракция – это способность звуковых волн огибать СТВИЯ



Принцип Гюйгенса - Френеля

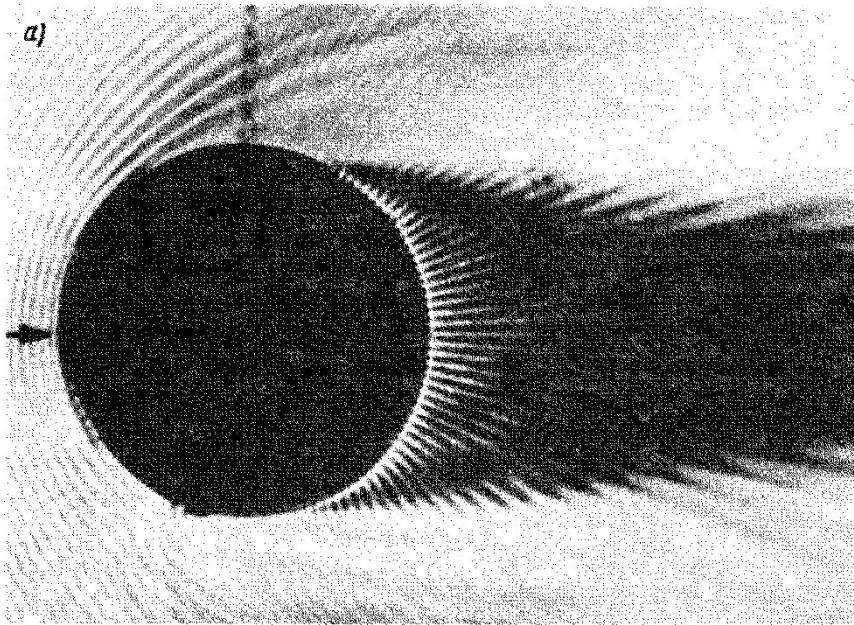
Каждая частица среды, находящаяся в звуковом поле, является источником вторичных элементарных сферических волн которые, интерферируя, образуют результирующую волну, частично проникающую и за преграду

Степень дифракции зависит от соотношения размеров препятствия d и длины волны λ :

$d \gg \lambda$ — за преградой образуется зона «акустической тени», дифракция незначительна;

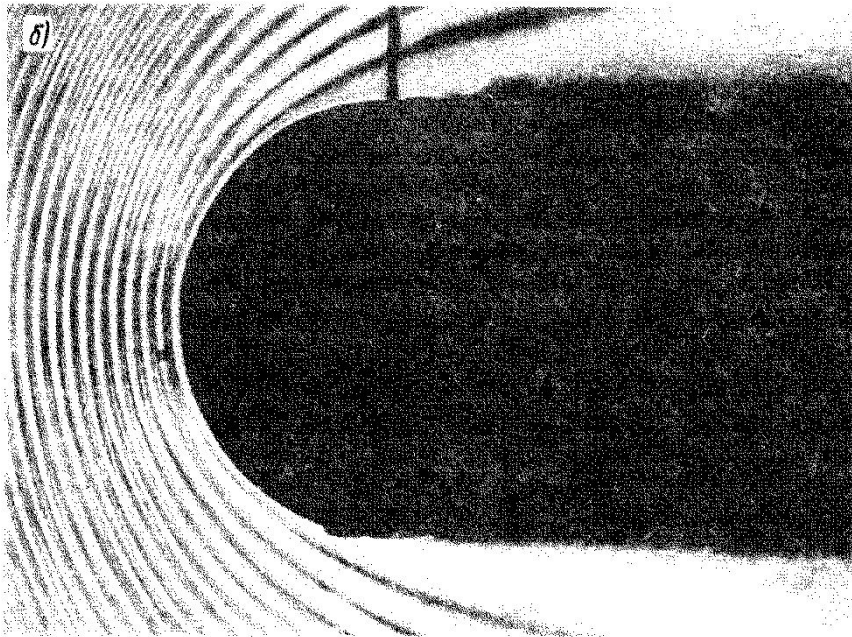
$d \approx \lambda$ — зона «акустической тени» исчезает, дифракция проявляется достаточно сильно;

$d \ll \lambda$ - акустическое поле практически не нарушается.



Дифракция звукового поля на цилиндрической оболочке:

а) $d \approx \lambda$ — зона «акустической тени» исчезает, дифракция проявляется достаточно сильно;



б) $d \gg \lambda$ — за преградой образуется зона «акустической тени», дифракция незначительна;

Интерференция – это сложение гидроакустических волн .

Многолучевость и аномалия распространения звука

Аномалией называется повышение или понижение интенсивности звукового сигнала в точке акустического поля (являющегося результатом сложения отдельных лучей), где осуществляется прием, по сравнению с акустическим полем в безграничной однородной среде, в которой отсутствует рефракция.

Под фактором аномалии A (фокусировки) понимается отношение интенсивности акустических колебаний в произвольной точке неоднородной океанической среды (с отражением звука от поверхности и дна) $J(r)$ к интенсивности в однородной безграничной среде на том же расстоянии от источника $J_0(r)$.

$$A = \frac{\mathfrak{I}(r)}{\mathfrak{I}_0(r)}$$

Для вычисления аномалии в дБ. Применяется следующая формула:

$$A = 10 \lg \frac{\mathfrak{I}(r)}{\mathfrak{I}_0(r)}$$

Явление реверберации

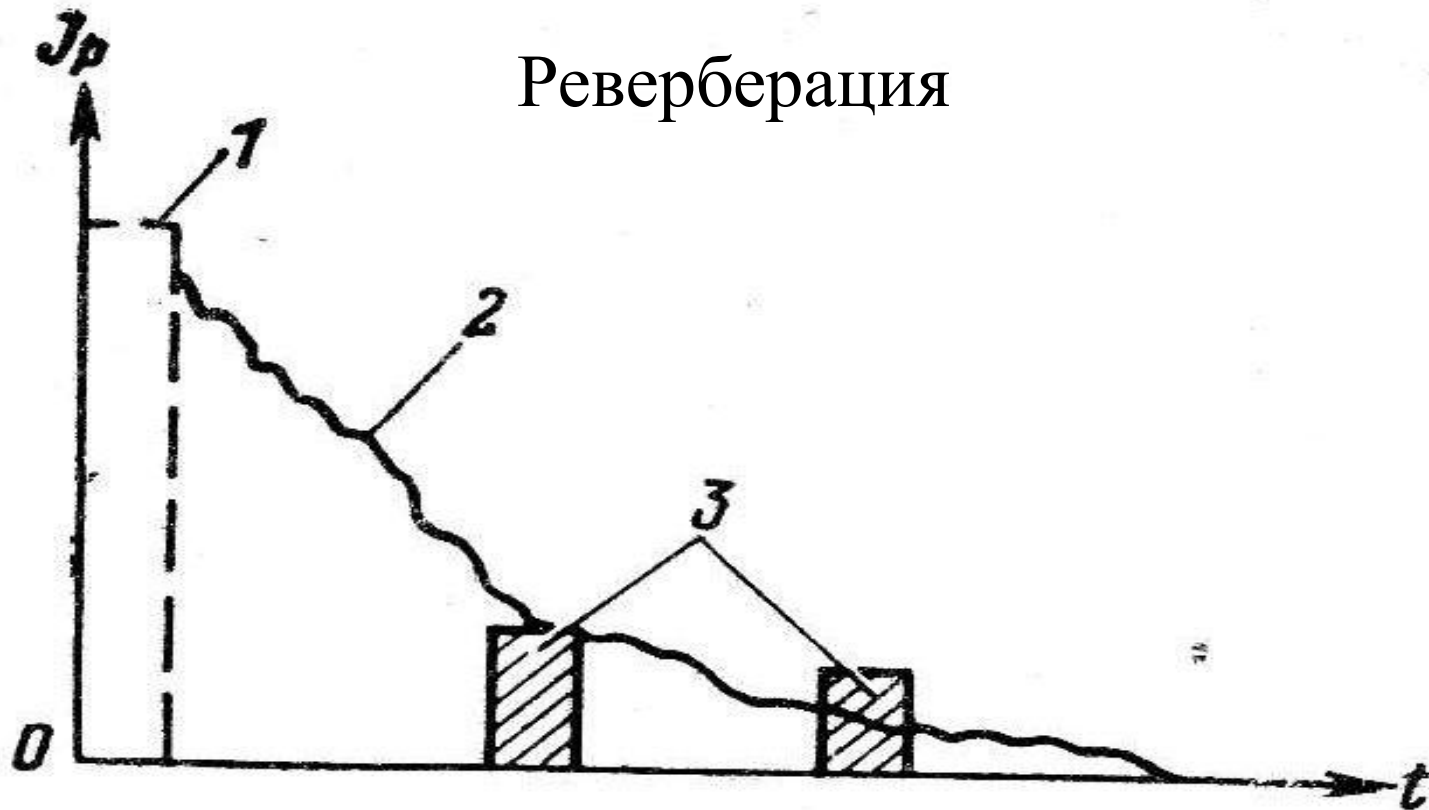
Морская реверберация - процесс, описывающий изменение во времени суммарного рассеянного звукового поля, наблюдаемого в точке приема после излучения акустической энергии.

Объемная реверберация - рассеяние звука мелкими включениями в виде газовых пузырьков, твердых взвешенных частиц, термических неоднородностей (непрерывно перемешивающихся дискретных объемов воды с различными температурами) и другими рассеивателями, распределенными по всему водному пространству

Поверхностная реверберация - рассеяние звука мелкими неоднородностями и пузырьками, концентрирующимися в приповерхностном слое, а также волнующейся поверхностью моря

Донная реверберация - рассеяние звука неровностями дна

Реверберация



Изменение реверберации во времени: 1 - излучаемый импульс;
2 - реверберация; 3 - эхосигналы.

Борьба с реверберационной помехой осуществляется:

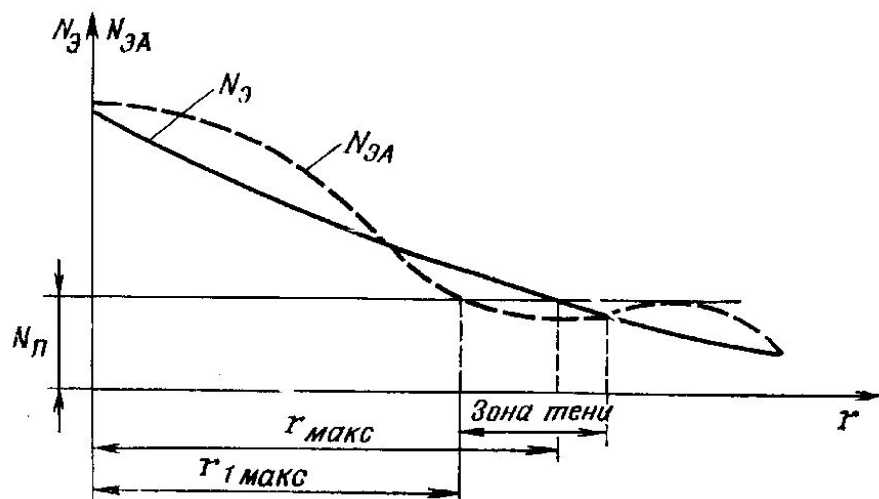
1. Применением временной и ручной регулировки усиления (ВРУ) и (РРУ) приемного тракта ГАС.
2. Применением более короткой посылки при малых глубинах;
3. Применением зондирующих импульсов с частотной модуляцией;
4. Повышением направленности акустических антенн.

Кавитация – это разрушительное воздействие очень сильных звуковых колебаний на подводные предметы, в т.ч. и на источник звука (ГА антенну)

Дальность действия гидроакустического устройства

Энергетическая дальность – это дальность, которую обеспечивает аппаратура при условии распространения звука в свободной однородной поглощающей среде.

Геометрическая, или рефракционная, дальность определяется рефракцией звуковых лучей в море, она характеризует лишь геометрическую возможность попадания звуковых лучей в ту или иную точку пространства



N_{Σ} - уровень эхосигнала без учёта фактора A ;

$N_{\Sigma A}$ - уровень эхосигнала с учётом фактора A ;

N_{Π} - уровень помех;

$r_{\text{макс}}$ - максимальная дальность ГЛ без учёта фактора A ;

$r_{1\text{макс}}$ - максимальная дальность ГЛ в ближней зоне с учётом фактора

A

В случае отрицательной рефракции, при линейном распределении скорости звука с глубиной, геометрическая дальность действия (в м) вычисляется по формуле:

$$D_r = \sqrt{2 \frac{c_0}{G_c} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})}$$

где c_0 – скорость звука на поверхности, м/с;

G_c – градиент скорости звука, 1 м/с;

h_1 и h_2 – глубины погружения источника и приёмника соответственно, м.

При отрицательной рефракции чем больше градиент скорости звука, тем меньше дальность действия гидроакустических станций.

В случае положительной рефракции геометрическая дальность:

$$D_r = \sqrt{2 \frac{c_1}{G_c} (\sqrt{H - h_1} + \sqrt{H - h_2})}$$

где c_1 – скорость звука на глубине залегания рассматриваемого слоя, м/с;

H – глубина залегания слоя, в котором нижний крайний (предельный) луч претерпевает полное внутреннее отражение, м.