

Турбулентность

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \nu \Delta \vec{v}$$

U – масштаб скорости

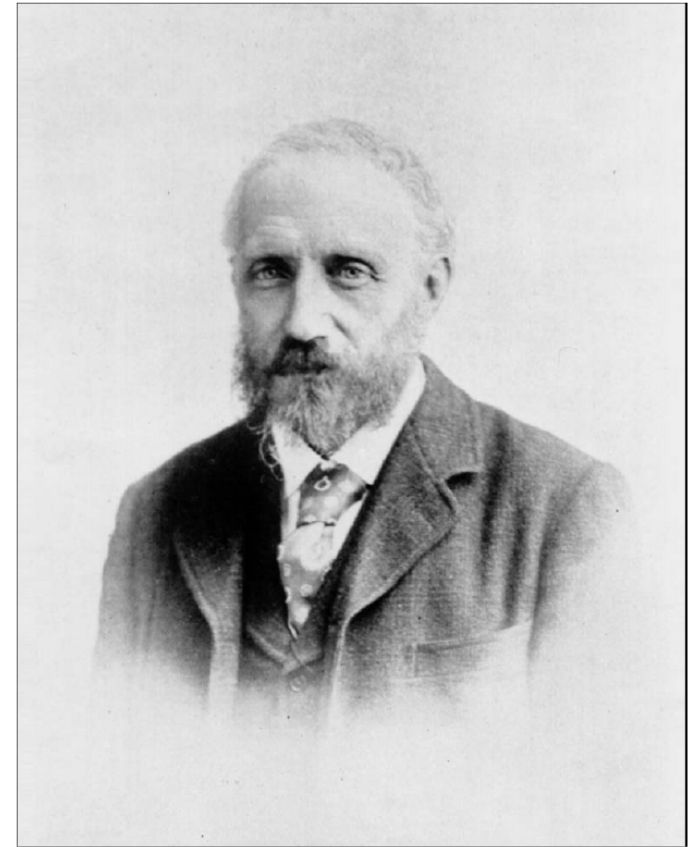
L – масштаб длины

$$\frac{(\vec{v} \nabla) \vec{v}}{\nu \Delta \vec{v}} \approx \frac{U^2 / L}{\nu U / L^2} = \frac{UL}{\nu} = Re$$

число Рейнольдса

Эксперименты Осборна Рейнольдса

Reynolds O. 1883. *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels.* Philos. Trans. R. Soc. 174:935–82



Professor Osborne Reynolds (Copyright, The University of Manchester)

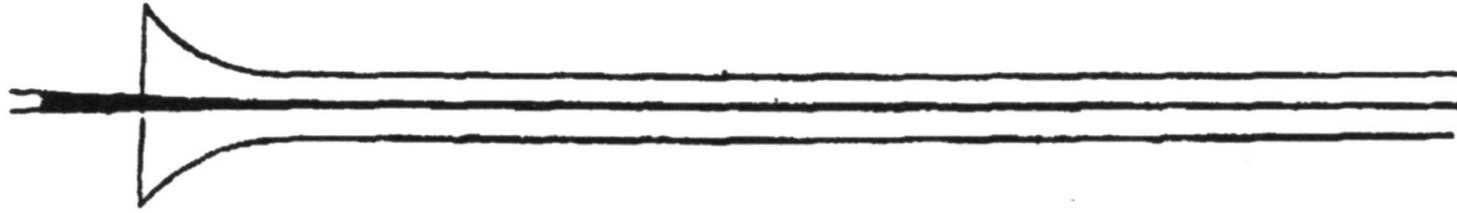
**Osborne Reynolds
(1842 – 1912)**

Reynolds' experiment, described in his paper published in 1883

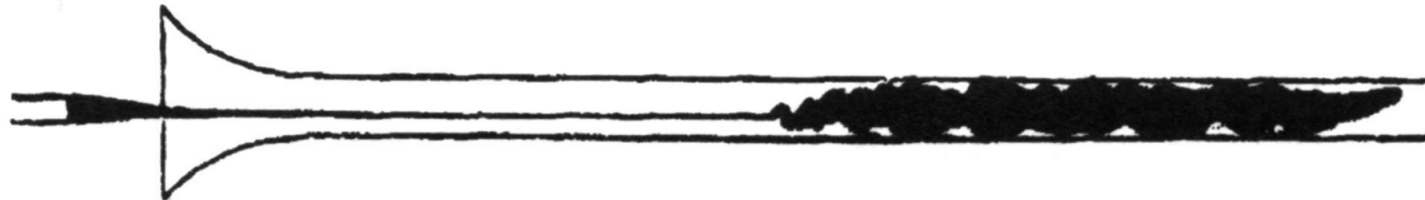


Figure 1

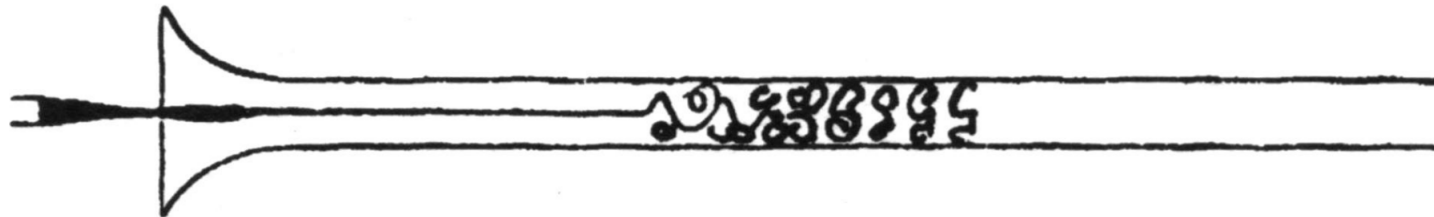
Osborne Reynolds tank today, The University of Manchester.



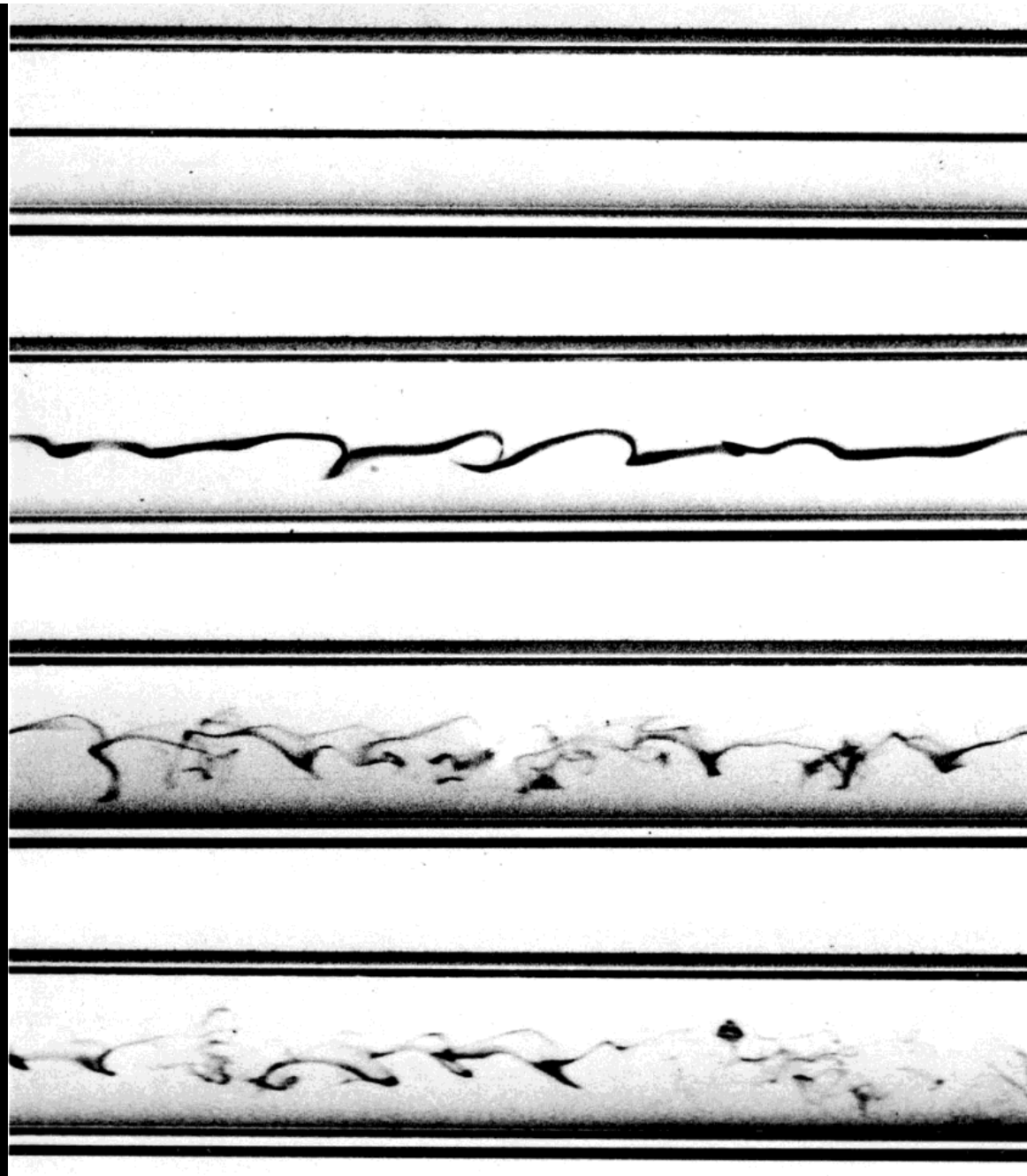
“When the velocities were sufficiently low, the streak of colour extended in a beautiful straight line through the tube.”



“As the velocity was increased by small stages, at some point in the tube, always at a considerable distance from . . . the intake, the colour band would all at once mix up with the surrounding water, and fill the tube with a mass of coloured water.”



“On viewing the tube by light of an electric spark, the mass of colour resolved itself into a mass of more or less distinct curls, showing eddies.”



Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. 1986

$$Re = \frac{Ud}{\nu}$$

в экспериментах
Осборна
Рейнольдса

$$Re_c = 1.3 \cdot 10^3$$

Современные данные (Thorpe, 2007):

$$10^3 < Re_c < 4.5 \cdot 10^4$$

Высокий
уровень
фоновых
возмущений

Минимальный
уровень
фоновых
возмущений

$Re < Re_c$ – течение ламинарное

$Re > Re_c$ – течение турбулентное

$$Re_c = \frac{UL}{\nu} \sim 10^2 - 10^3$$

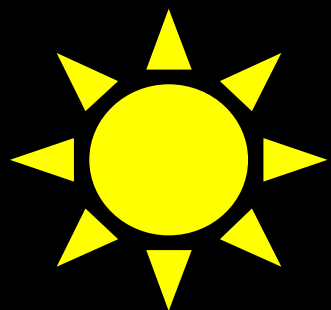
$$Re_{\text{океан}} \sim \frac{1[\text{м/с}] \times 10^3[\text{м}]}{10^{-6}[\text{м}^2/\text{с}]} = 10^9$$

$$Re_{\text{атмосфера}} \sim \frac{10[\text{м/с}] \times 10^3[\text{м}]}{1.5 \cdot 10^{-5}[\text{м}^2/\text{с}]} \approx 10^9$$

Важность изучения турбулентности
для динамики атмосферы и океана
обусловлена ее определяющей ролью в
процессах обмена импульсом, теплом и
веществом

- погода и климат**
- первичная продуктивность**
- транспорт примесей (в т.ч. загрязнений)**
- ...многие иные задачи**

Теплообмен между океаном и атмосферой



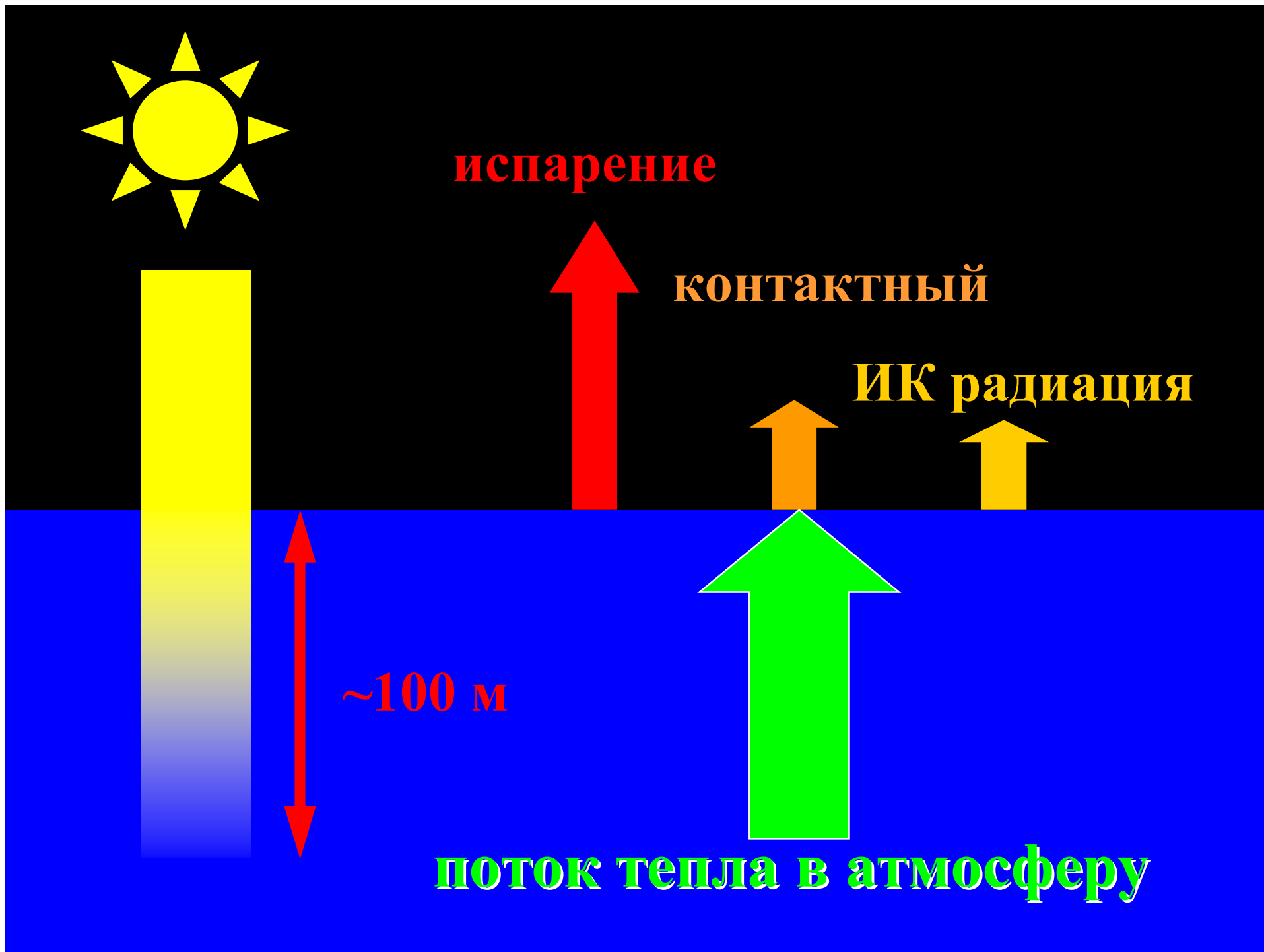
испарение

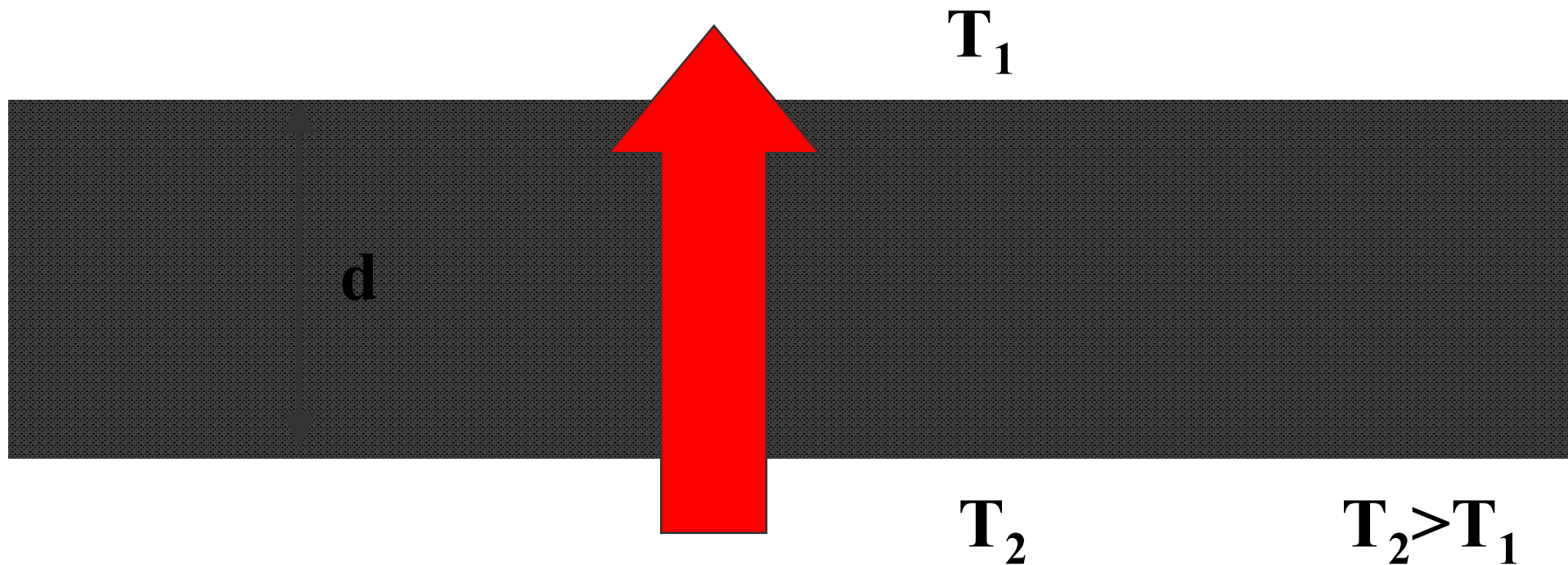
контактный

ИК радиация

~100 м

поток тепла в атмосферу





$$Q \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right] = \alpha \frac{(T_2 - T_1)}{d} = -\alpha \frac{\partial T}{\partial z}$$

**Уравнение, описывающее молекулярный
перенос тепла**

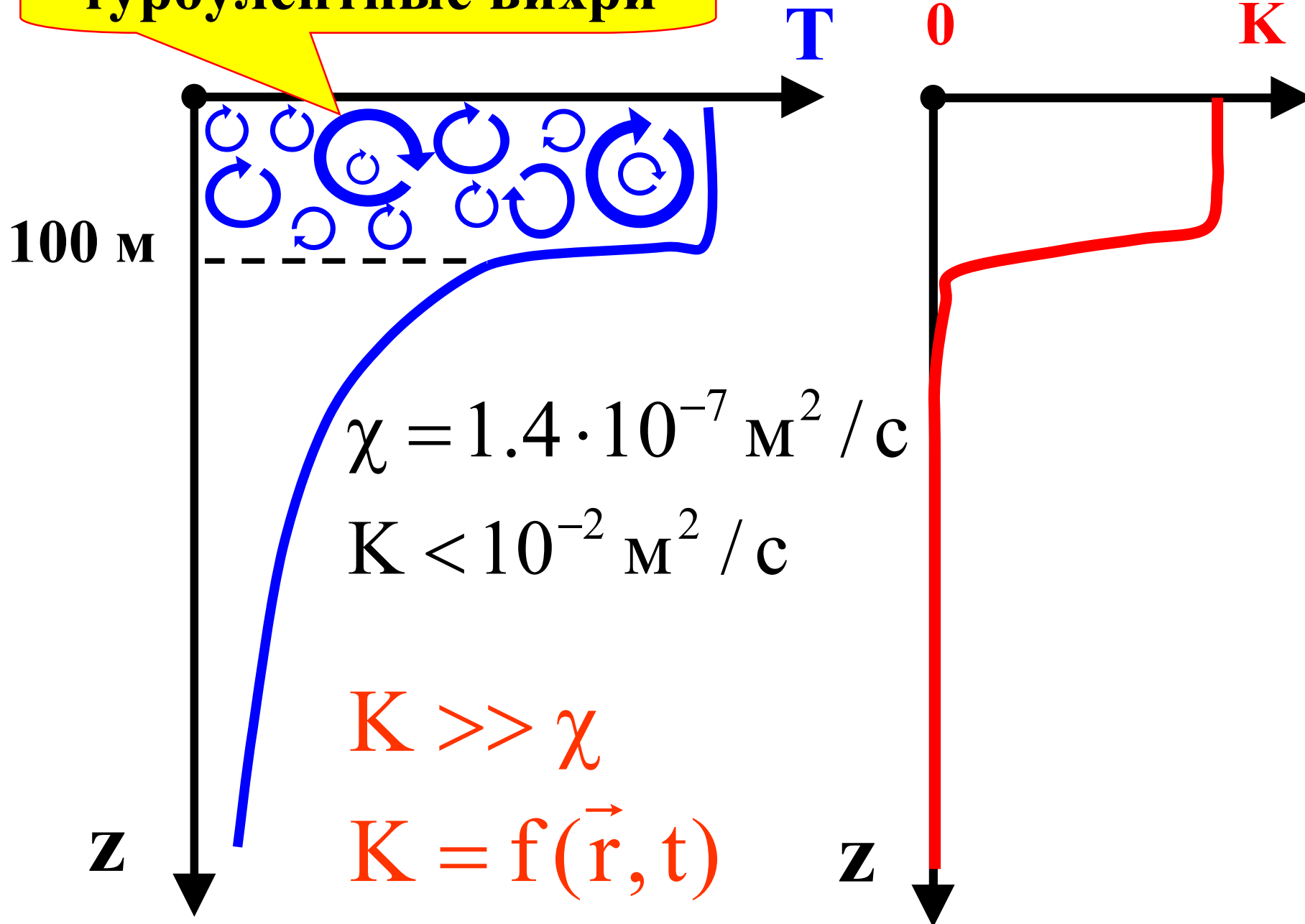
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

**Уравнение, описывающее турбулентный
перенос тепла**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left([\chi + K(z, t)] \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Коэффициент турбулентного обмена

турбулентные вихри



$$b = \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2} \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right]$$

**энергия
турбулентности на
единицу массы**

$$L \quad [M]$$

**масштаб
турбулентности**

$$K \quad \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$$

**коэффициент
турбулентного
обмена**

$$K \approx L\sqrt{b} \approx LU$$

$$Re \equiv \frac{LU}{\nu} = \frac{K}{\nu}$$

Молекулярные коэффициенты

$$\chi = 1.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$$

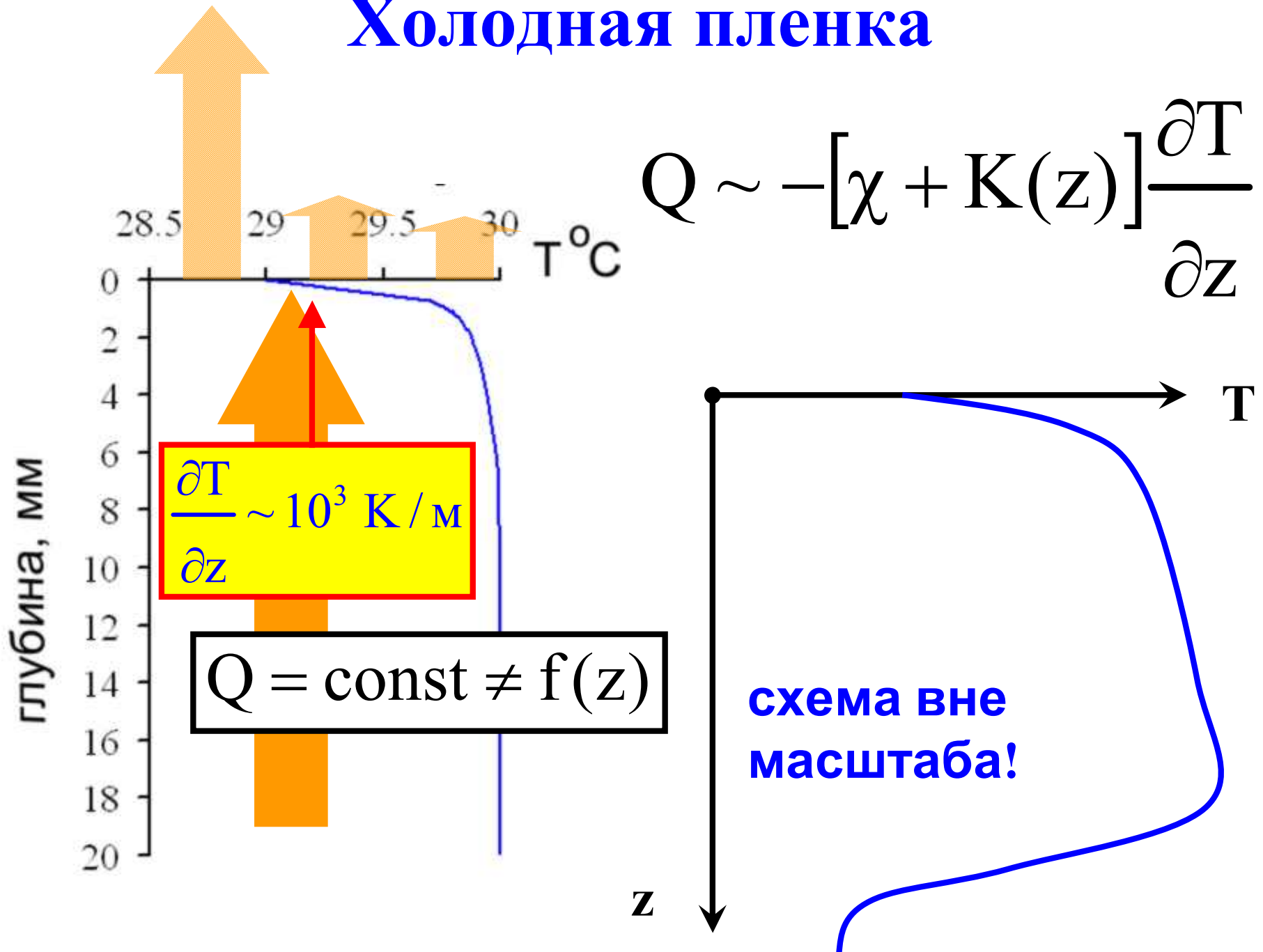
$$\nu = 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$$

Турбулентные коэффициенты

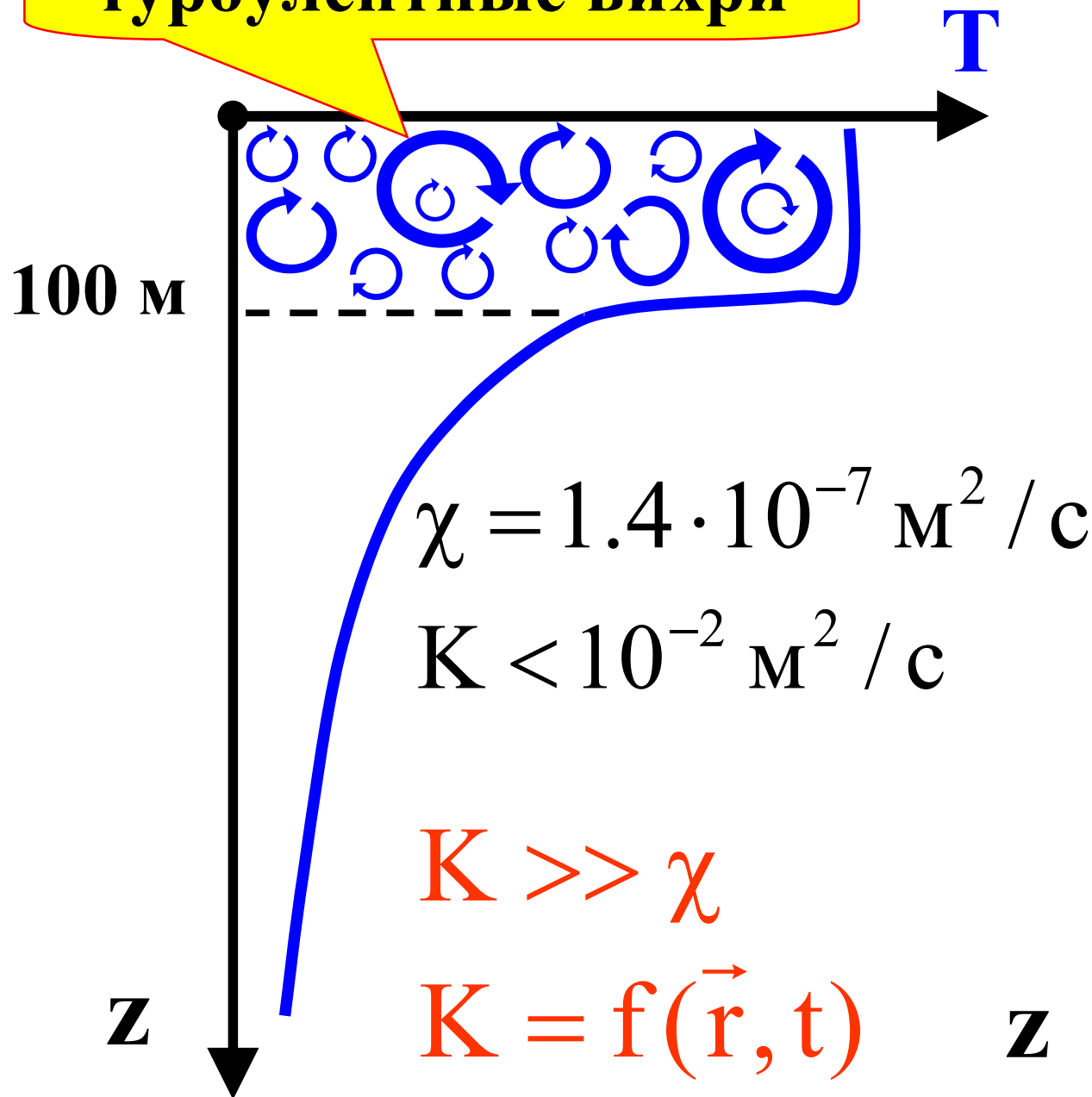
$$K^{\text{верт.}} = f^{\text{верт.}}(\vec{r}, t) < 10^{-2} \text{ м}^2 / \text{с}$$

$$K^{\text{гориз.}} = f^{\text{гориз.}}(\vec{r}, t) < 10^4 \text{ м}^2 / \text{с}$$

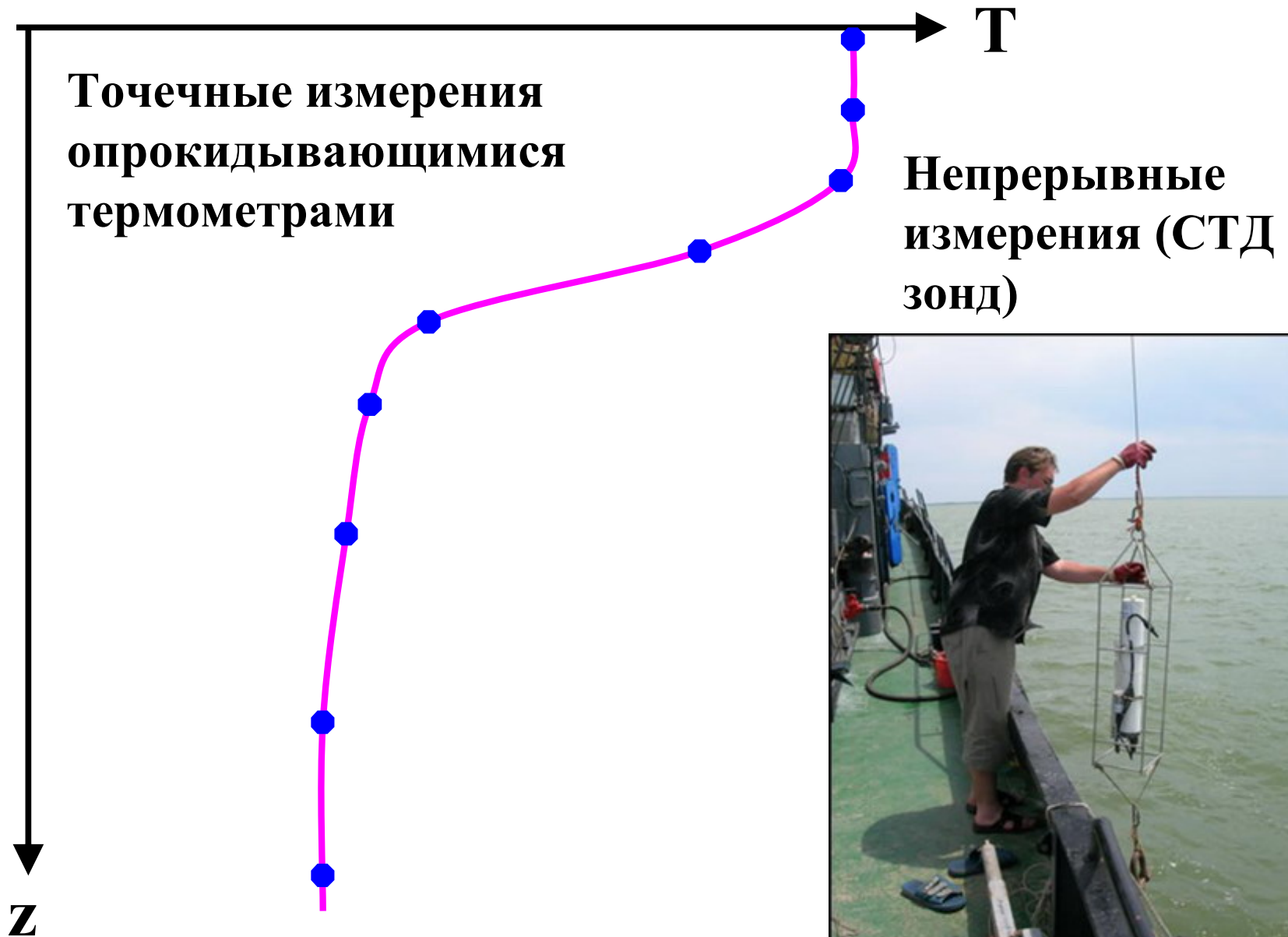
Холодная пленка



турбулентные вихри



Методика измерения вертикального профиля температуры



Тонкая термохалинная структура

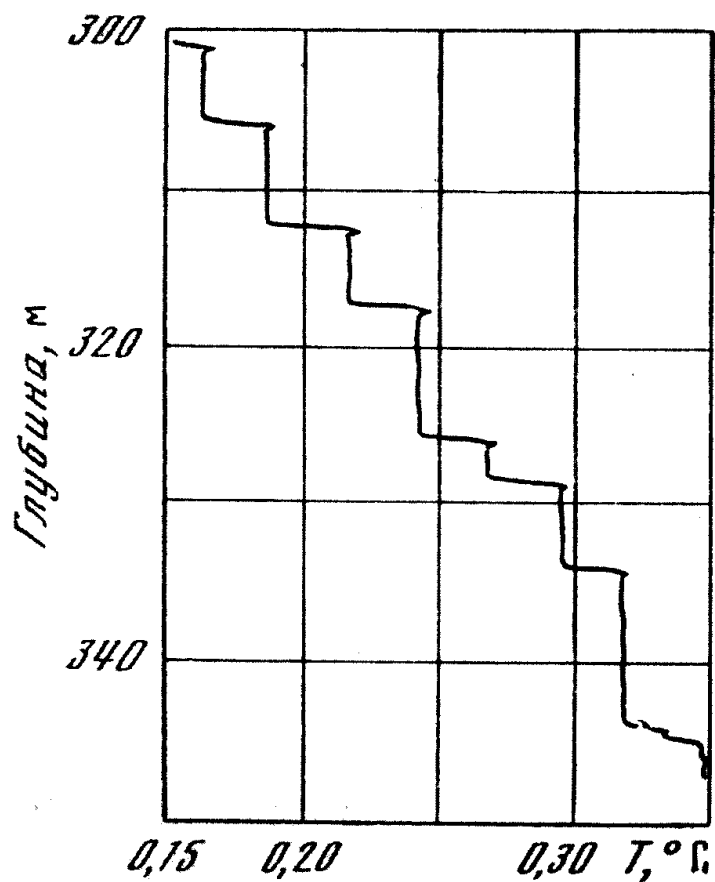
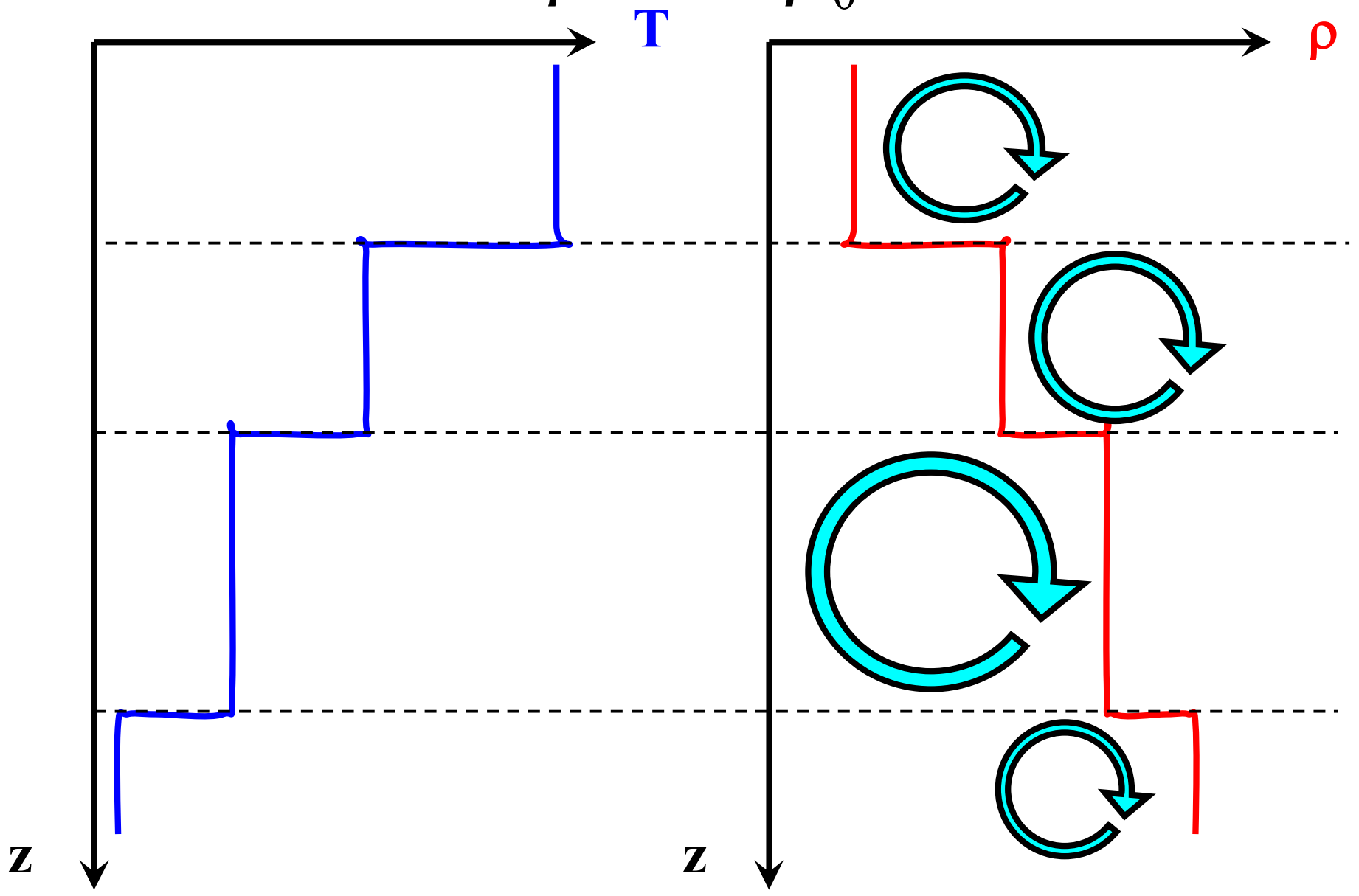


Рис. 14. Пример ступенчатой термической структуры, связанной с послойной конвекцией в слое инверсии температуры в Арктическом бассейне, по данным Нешибы и др. (Neshyba et al., 1971). Цитируется по статье Грегга (Gregg, 1973)

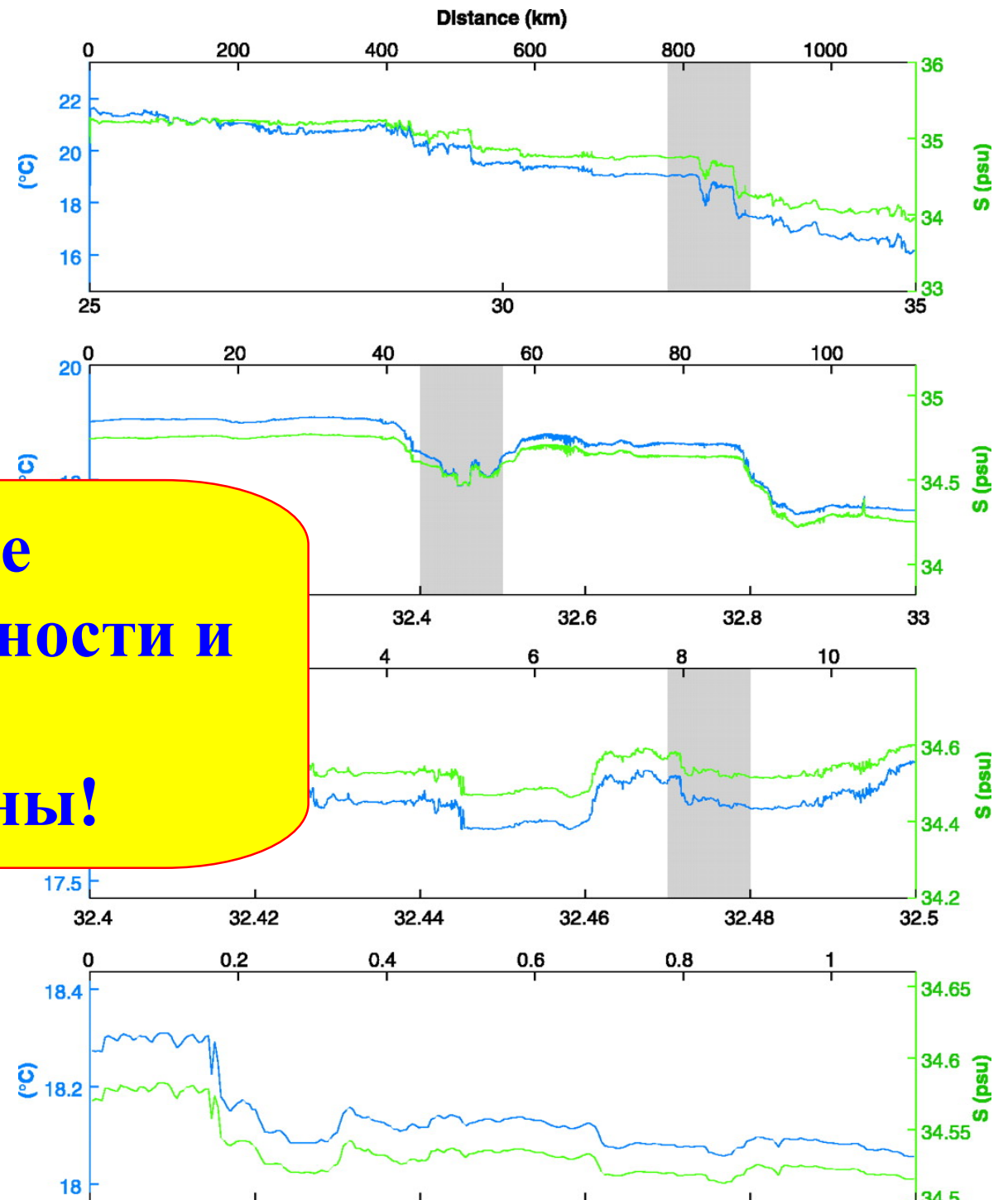
$$\Delta\rho = -\alpha\rho_0\Delta T$$



Разрез вдоль 140° З.Д.
от 25° С.Ш. до 35° С.Ш.;
глубина датчиков:
~ 1/2 толщины
перемешанного слоя

**Горизонтальные
градиенты солёности и
температуры
скомпенсированы!**

[Rudnick, Ferrari, 1999]

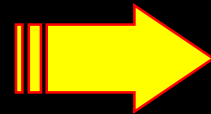


Волновые движения в океане

ТИПЫ ВОЛН В ОКЕАНЕ

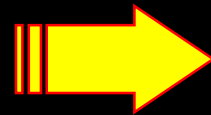
(классификация по типу возвращающей силы)

сила тяжести



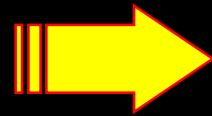
гравитационные
поверхностные и
внутренние

сила
поверхностного
натяжения



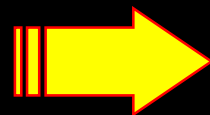
капиллярные

сила упругости



(гидро)акустические

сила Кориолиса



гироскопические
(инерционные)

ТИПЫ ВОЛН В ОКЕАНЕ

(классификация по причине возникновения)

- ветровые
- приливные
- анемобарические
- сейсмические (цунами)
- оползневые (цунами)
- штормовые нагоны
- корабельные
- ...

ТИПЫ ВОЛН В ОКЕАНЕ

(названия волновых явлений)

- Поророка (Амазонка)
- Риссага (о.Менорка)
- Абики (о.Кюсю)
- сейши
- волны-убийцы
- СОЛИТОНЫ
- захваченные волны
- зыбь
- ...