

Введение в физику гидросферы

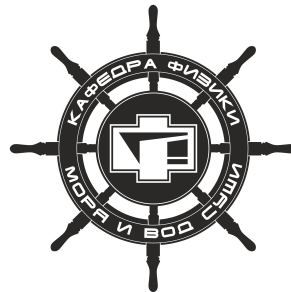
2024 Лекция №7

Носов Михаил Александрович

кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова





Турбулентность

последняя нерешенная
проблема классической
физики!

течения

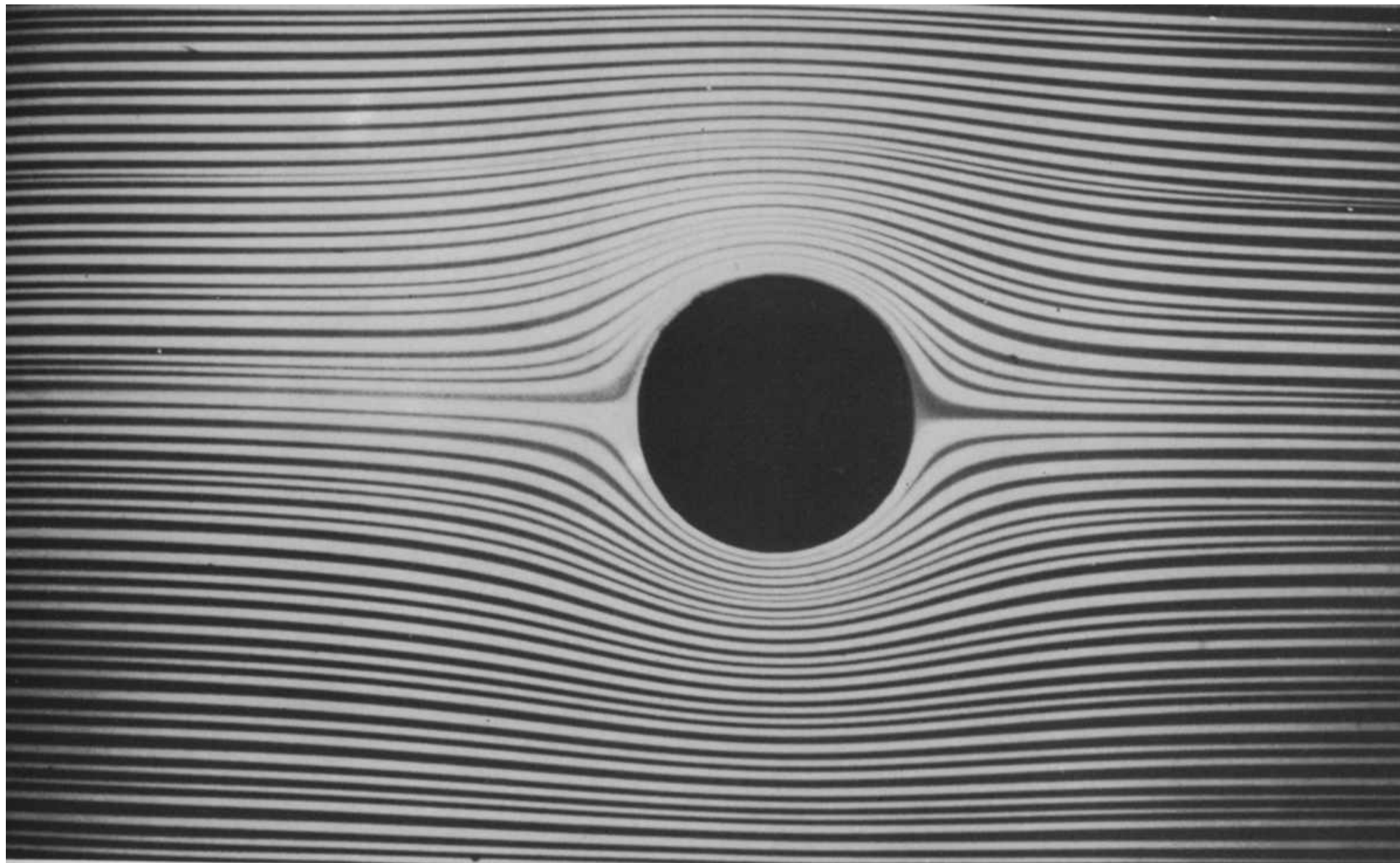
```
graph TD; A[течения] --> B[ламинарные]; A --> C[турбулентные];
```

ламинарные

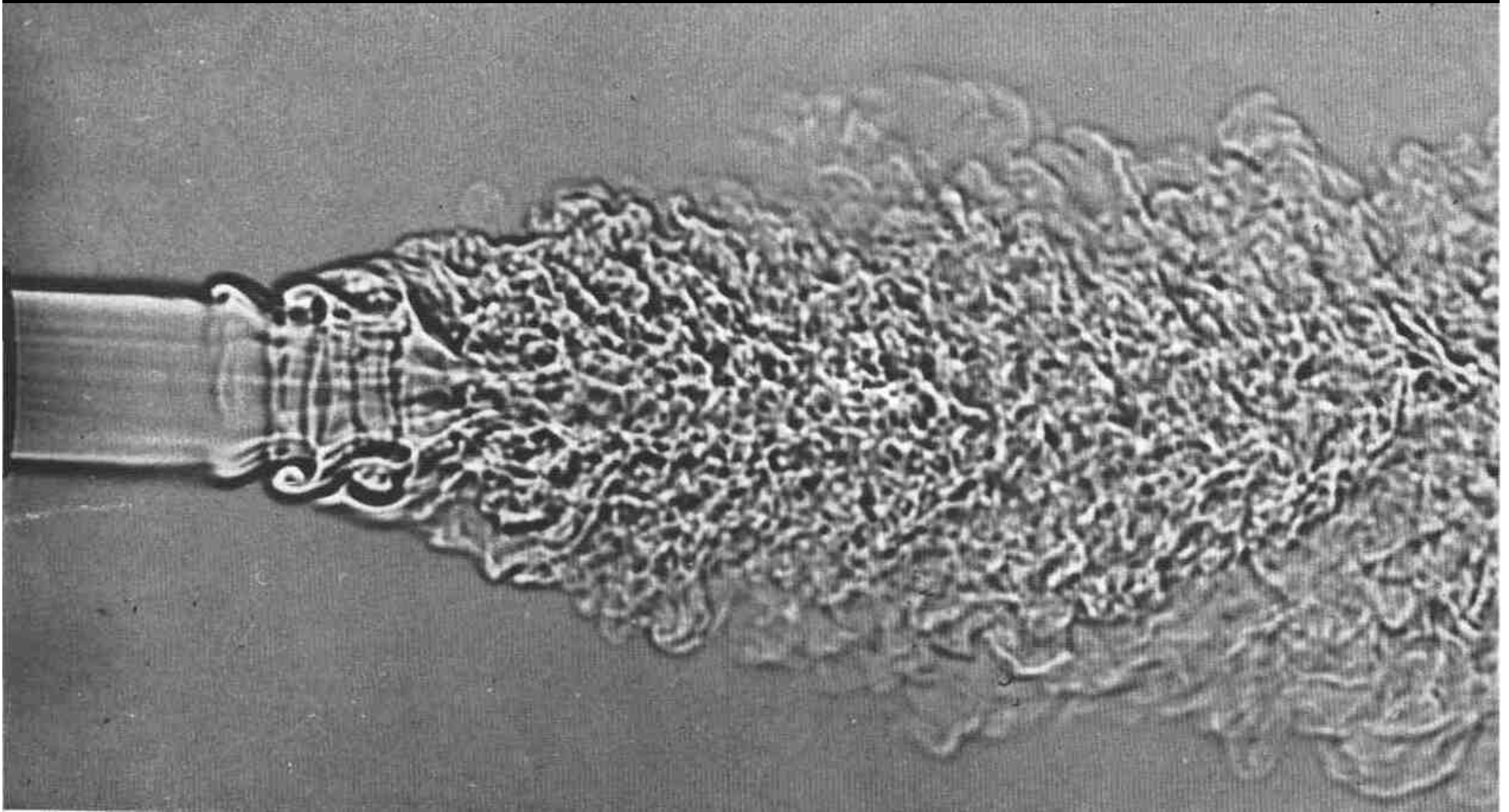
**спокойные и плавные
течения, меняющиеся
лишь в связи с
изменениями
действующих сил или
внешних условий**

турбулентные


**течения, в которых
гидродинамические
величины испытывают
хаотические
флуктуации,
создаваемые наличием
многочисленных вихрей**



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



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



Турбулентным потокам свойственно явление чередования ламинарной и турбулентной форм движения, которое именуется *перемежаемостью*

Определение Монина-Озмидова (1978 г): Турбулентностью называется явление, наблюдающееся в очень многих **завихренных** течениях жидкостей и газов в природе и в технических устройствах и заключающееся в том, что термодинамические и гидродинамические характеристики таких течений (вектор скорости, температура, давление, концентрации примесей, плотность среды, скорость звука, электропроводность, показатель преломления, и т. п.) испытывают **хаотические флуктуации**, создаваемые наличием в этих течениях многочисленных вихрей различных размеров, и вследствие этого изменяются в пространстве и с течением времени весьма нерегулярно, причем у пространственных распределений этих характеристик компонентам Фурье с фиксированными волновыми векторами соответствуют широкие интервалы частот (**т.е. однозначные дисперсионные соотношения отсутствуют**), а сдвиги по фазе между колебаниями различных характеристик в фиксированных точках пространства хаотически изменяются с частотой таких колебаний

Турбулентность (от лат. *turbulentus* – беспорядочный) неупорядоченное во времени и пространстве поведение диссипативной среды (или поля), детали которого не могут быть воспроизведены на больших интервалах времени при сколь угодно точном задании начальных и граничных условий.

Такая невоспроизводимость есть следствие сложной динамики среды, определяемой неустойчивостью индивидуальных движений, и она не связана с неполнотой описания, флуктуациями или действием внешних шумов

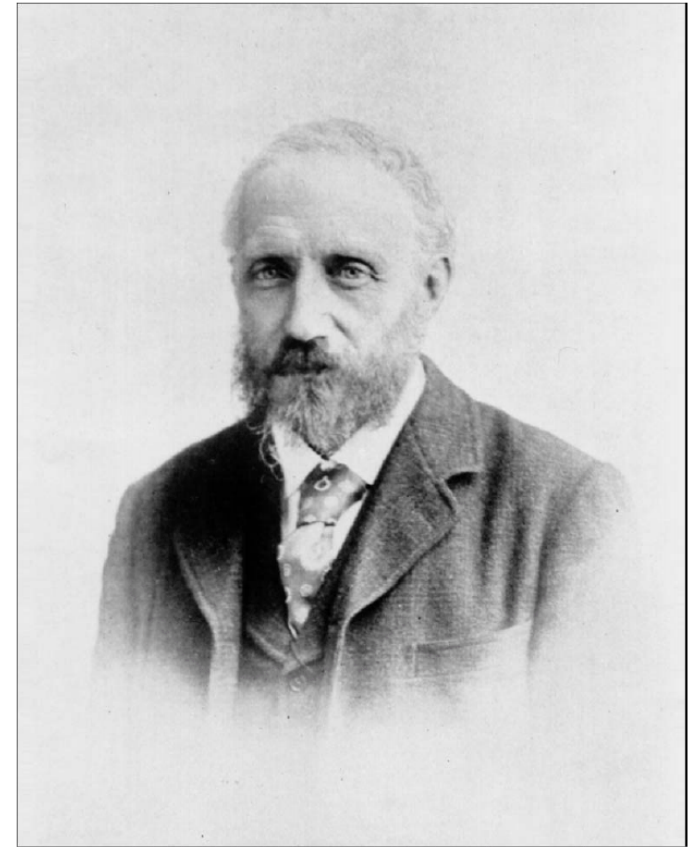
Диссипативная среда – распределенная физическая система, в которой энергия одних движений или полей (обычно упорядоченных) необратимым образом переходит в энергию других движений или полей (обычно хаотических).

Leonardo da Vinci (1452-1519)



Reynolds' experiment, described in his paper published in 1883

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)

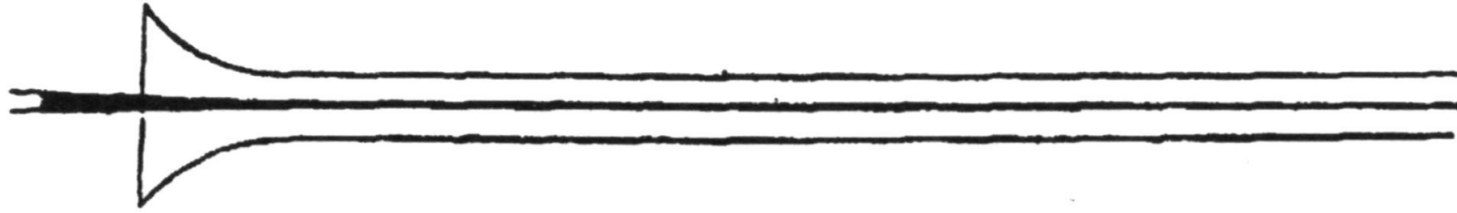
**Osborne Reynolds
(1842 – 1912)**

Reynolds' experiment, described in his paper published in 1883

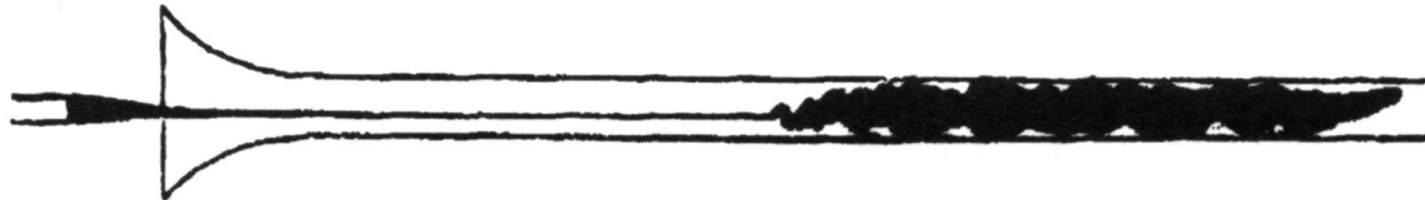


Figure 1

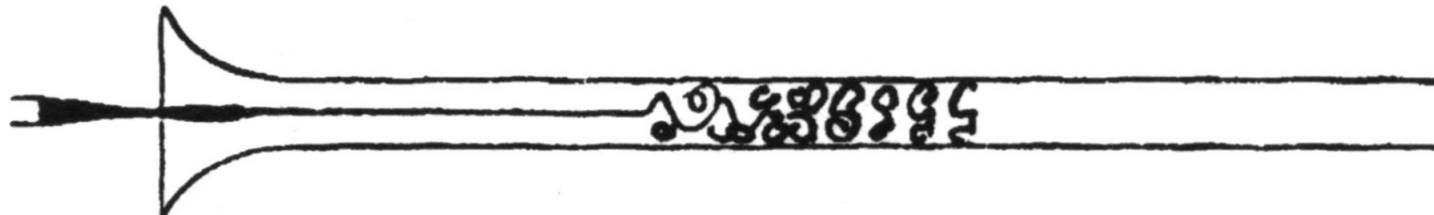
Osborne Reynolds tank today, The University of Manchester.



“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.”

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

U – масштаб скорости

L – масштаб длины

$$\begin{aligned} \frac{U}{L/U} \frac{\partial \vec{v}^*}{\partial t^*} + \frac{U^2}{L} (\vec{v}^* \vec{\nabla}^*) \vec{v}^* &= \\ &= -\frac{\rho U^2}{L} \frac{\vec{\nabla}^* p^*}{\rho} + \frac{U}{L^2} \nu \Delta^* \vec{v}^* \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \vec{v}^*}{\partial t^*} + (\vec{v}^* \cdot \vec{\nabla}^*) \vec{v}^* = -\vec{\nabla}^* p^* + \frac{1}{Re} \Delta^* \vec{v}^*$$

число Рейнольдса

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

$$Re_c \sim 10^3$$

**При $Re \gg 1$
силой вязкого
трения можно
пренебречь?**



Professor Osborne Reynolds (Copyright, The University of Manchester)

**Osborne Reynolds
(1842 – 1912)**

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

$Re < Re_c$ – течение ламинарное

$Re > Re_c$ – течение турбулентное

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

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

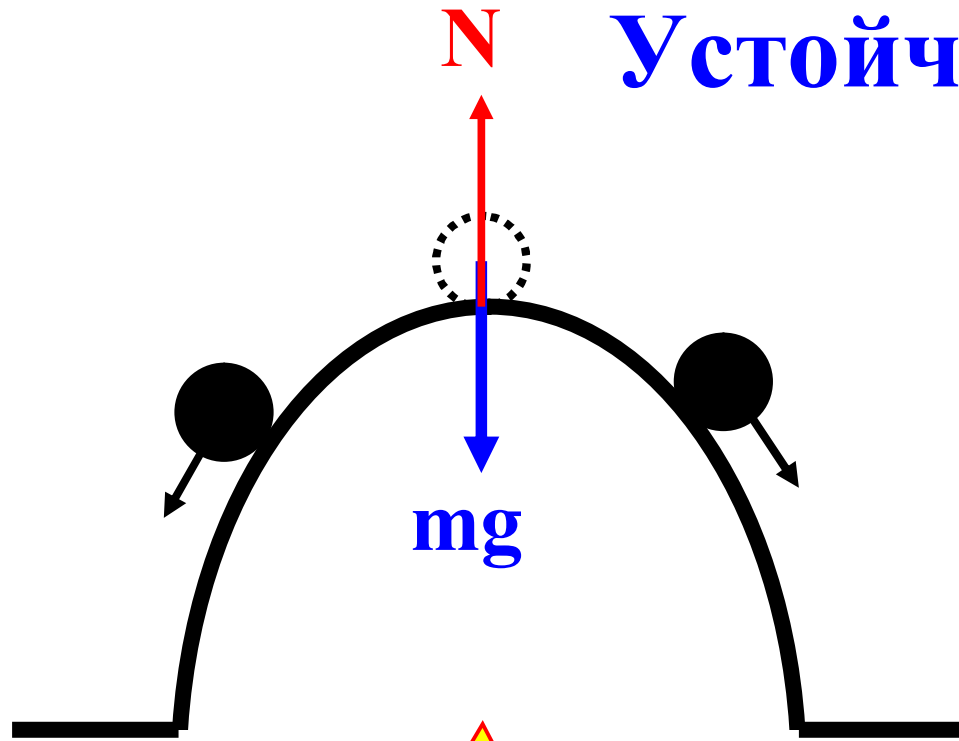
$$Re_{\text{атмосфера}} \sim \frac{10 [\text{м/с}] \times 10^3 [\text{м}]}{1.5 \cdot 10^{-5} [\text{м}^2/\text{с}]} \approx 10^9$$

Почему течение становится турбулентным?

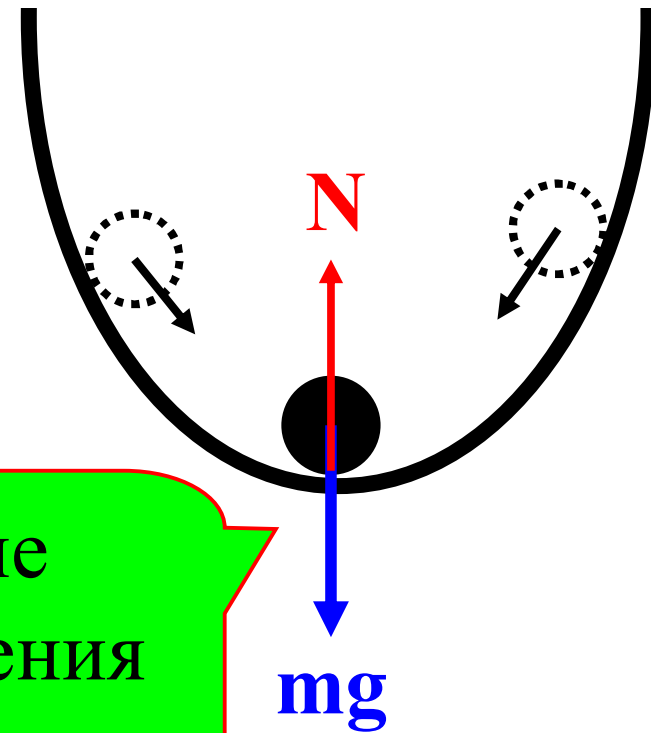
Неустойчивости:

- ❑ Сдвиговая неустойчивость (Кельвина-Гельмгольца, shear instability)
- ❑ Конвективная неустойчивость (Рэля-Бенара)
- ❑ Неустойчивость Рэля-Тейлора (Rayleigh–Taylor instability)
- ❑ Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова (Richtmyer–Meshkov instability)
- ❑ ...

Устойчивость



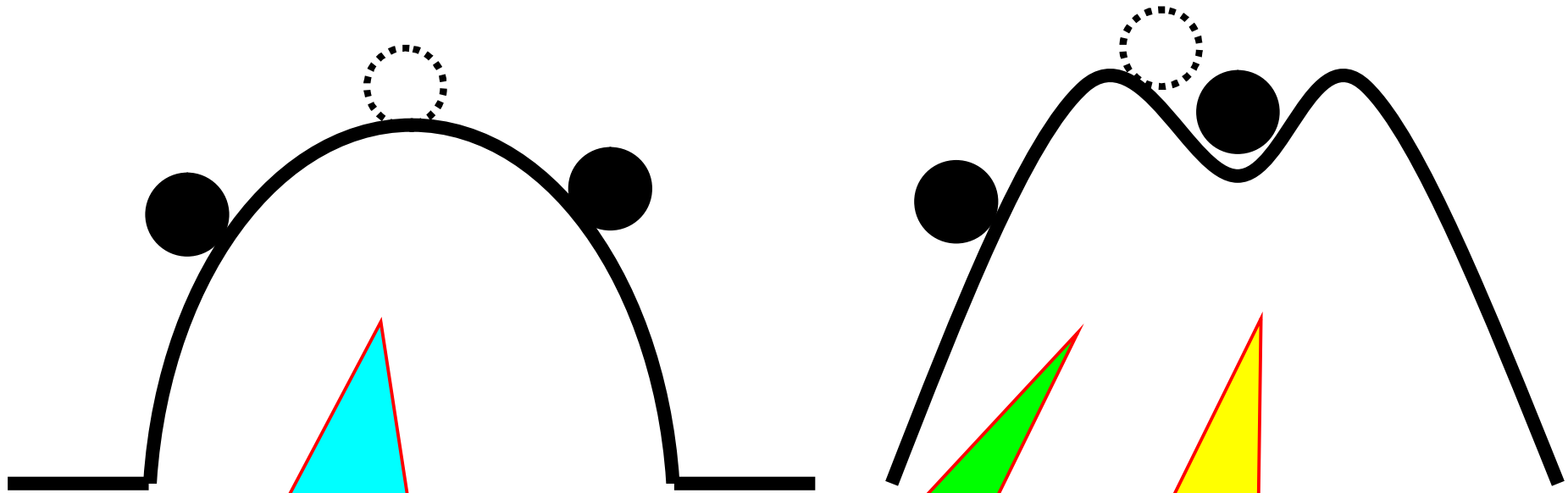
Понятие «устойчивость» применимо к положению равновесия и к режиму движения



Малые возмущения нарастают со временем

Малые возмущения затухают

Устойчивость

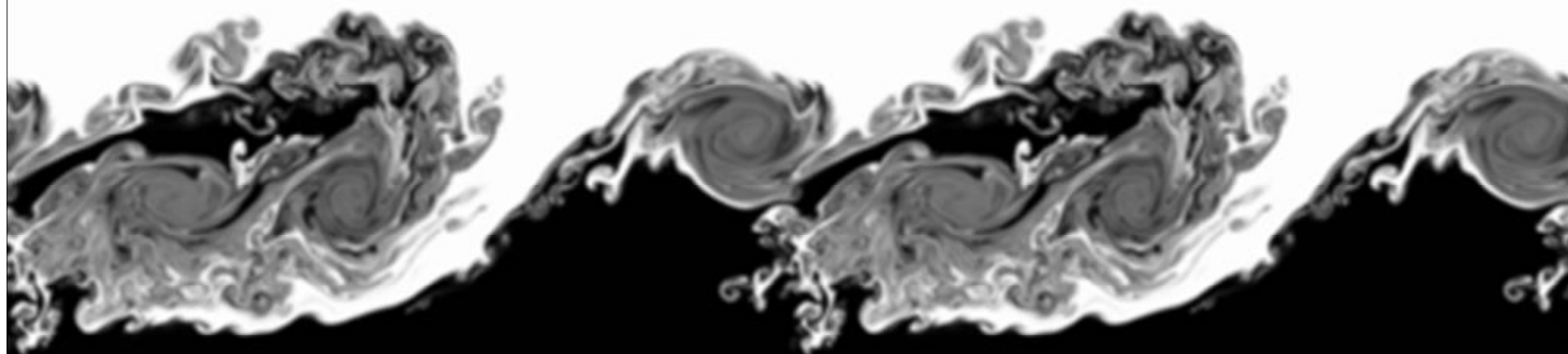


неустойчива по
отношению к
бесконечно
малым
возмущениям

малые
возмущения
затухают

большие
возмущения
нарастают со
временем

Сдвиговая неустойчивость

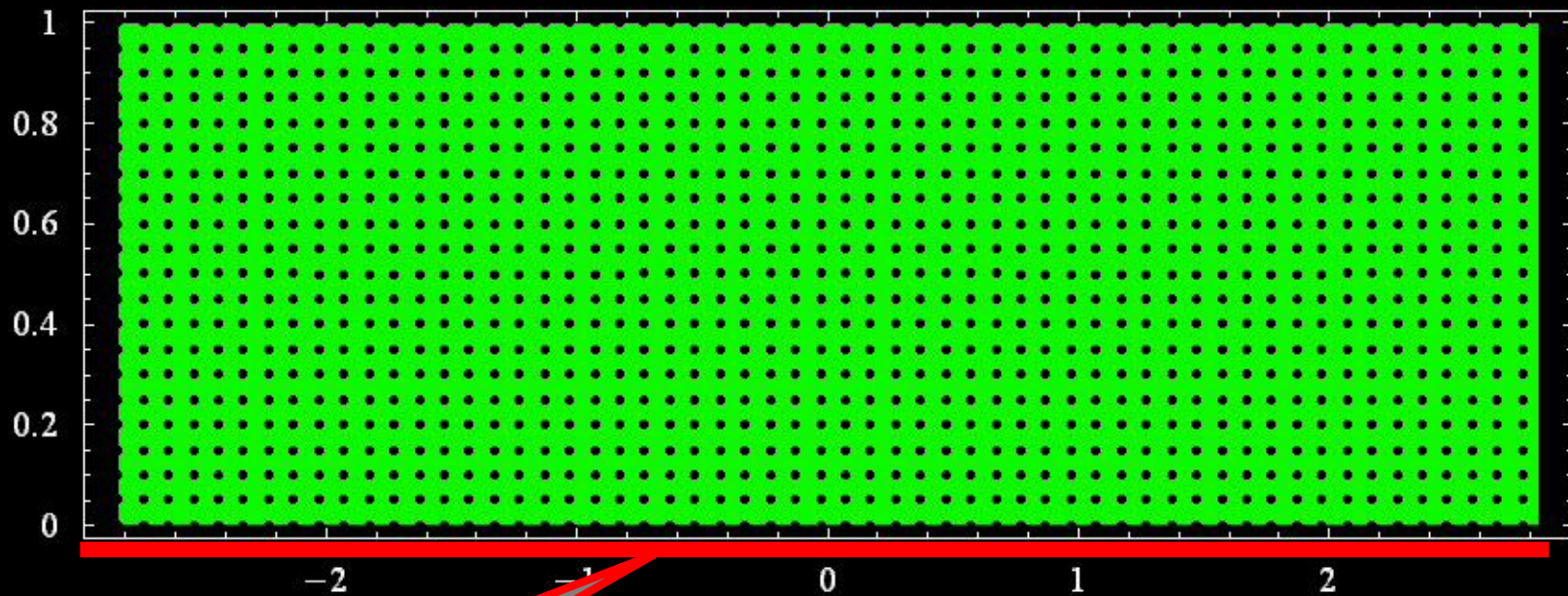


Конвективная неустойчивость

T_1

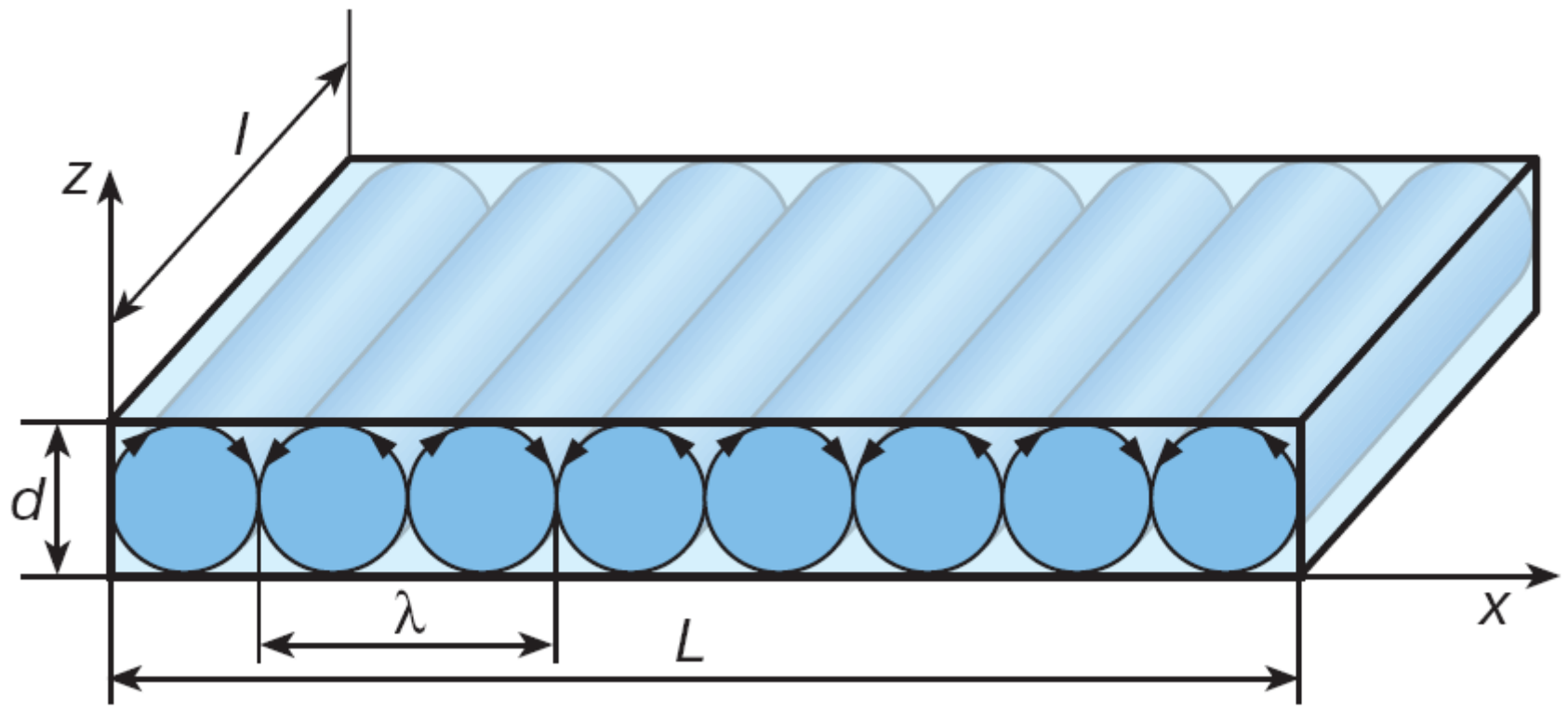
(Рэля-Бенара)

$\text{Sigma}=10$ $b=2.66667$ $r=30$

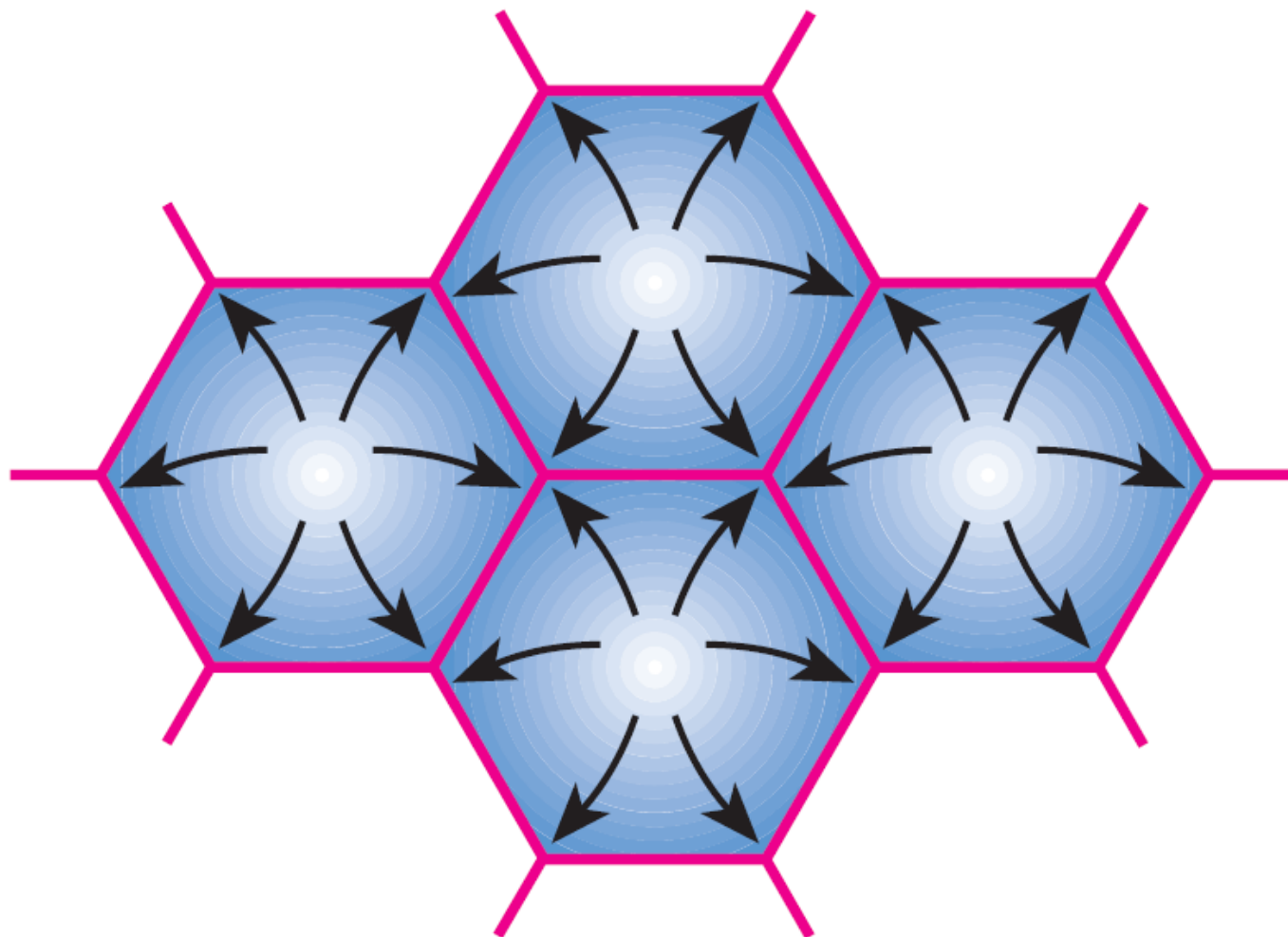


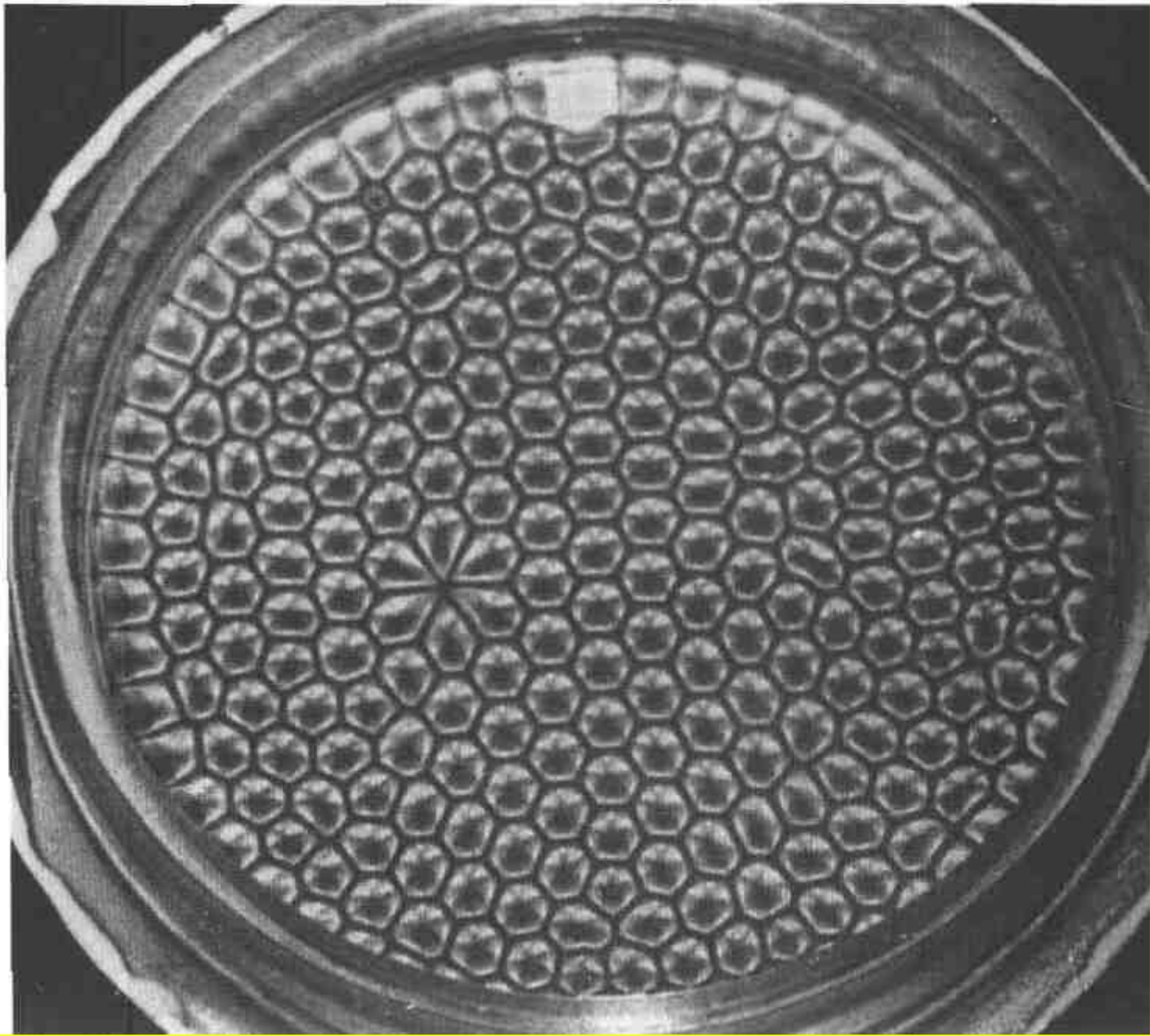
T_2

$T_2 > T_1$



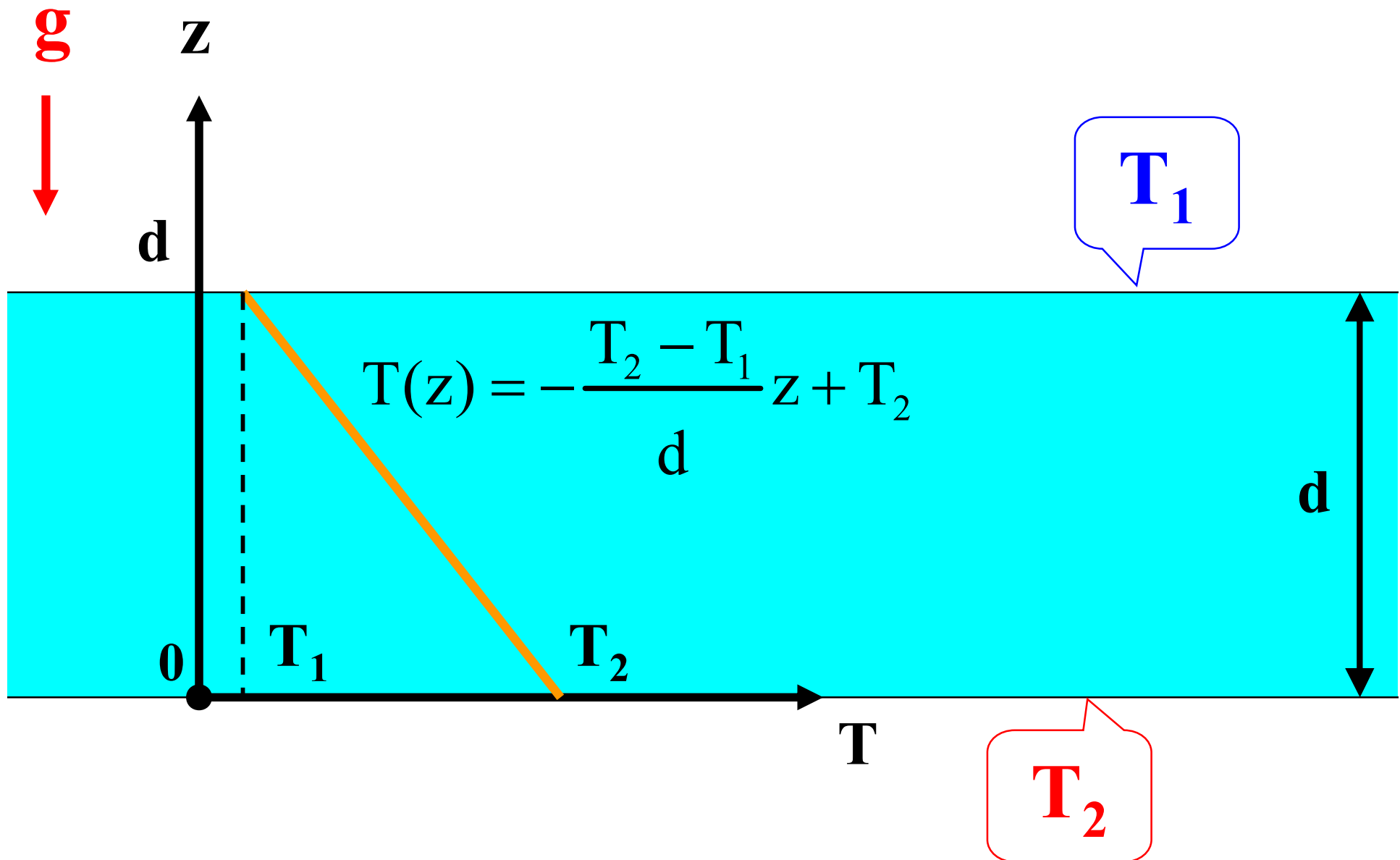
Конвективные ячейки Бенара с восходящим потоком в центре



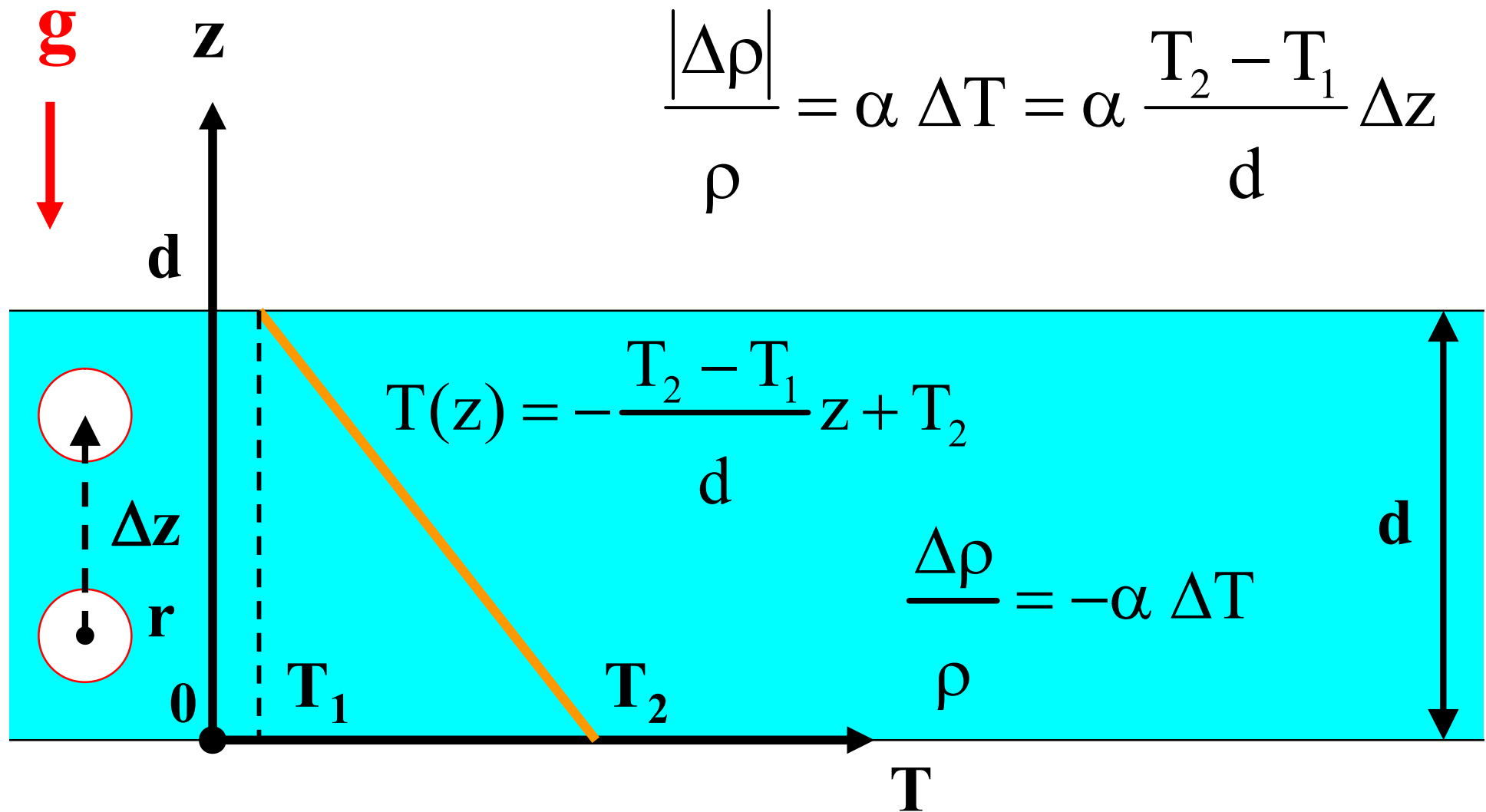


**Конвективной (Рэля-Бенара)
неустойчивостью** называется
неустойчивость в газовой или
жидкой среде, находящейся в поле
силы тяжести, которая
пронизывается потоком тепла в
направлении противоположном
вектору g

т.е. жидкость или газ подогреваются снизу



ρ - плотность; ν - вязкость; χ - температуропроводность;
 α - коэффициент объемного температурного расширения



ρ - плотность; ν - вязкость; χ - температуропроводность;
 α - коэффициент объемного температурного расширения

$$F_{\text{Арх}} - mg = F_{\text{Стокса}}$$

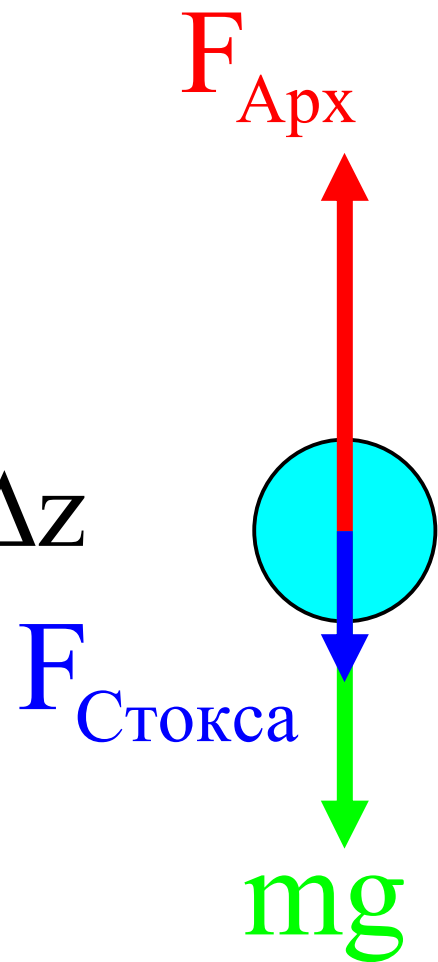
$$F_{\text{Арх}} - mg = gV \Delta\rho \sim g r^3 \Delta\rho$$

$$F_{\text{Стокса}} = 6\pi\rho\nu r U \sim \rho\nu r U$$

$$U \sim \frac{\Delta\rho g r^2}{\rho \nu} = \frac{\alpha g r^2 (T_2 - T_1)}{\nu d} \Delta z$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \alpha \frac{T_2 - T_1}{d} \Delta z$$

$$\tau_{\Delta z} \sim \frac{\Delta z}{U} = \frac{\nu d}{g \alpha (T_2 - T_1) r^2}$$



$$\tau_{\Delta z} \sim \frac{\nu d}{g \alpha (T_2 - T_1) r^2}$$

?

$$\tau_T \sim \frac{r^2}{\chi}$$

Температуро-
проводность

χ [м² / с]

$$\frac{\tau_T}{\tau_{\Delta z}} \sim \frac{g \alpha (T_2 - T_1) r^4}{\chi \nu d}$$

$r \sim d$

$$Ra = \frac{g \alpha (T_2 - T_1) d^3}{\chi \nu}$$

Число
Рэля

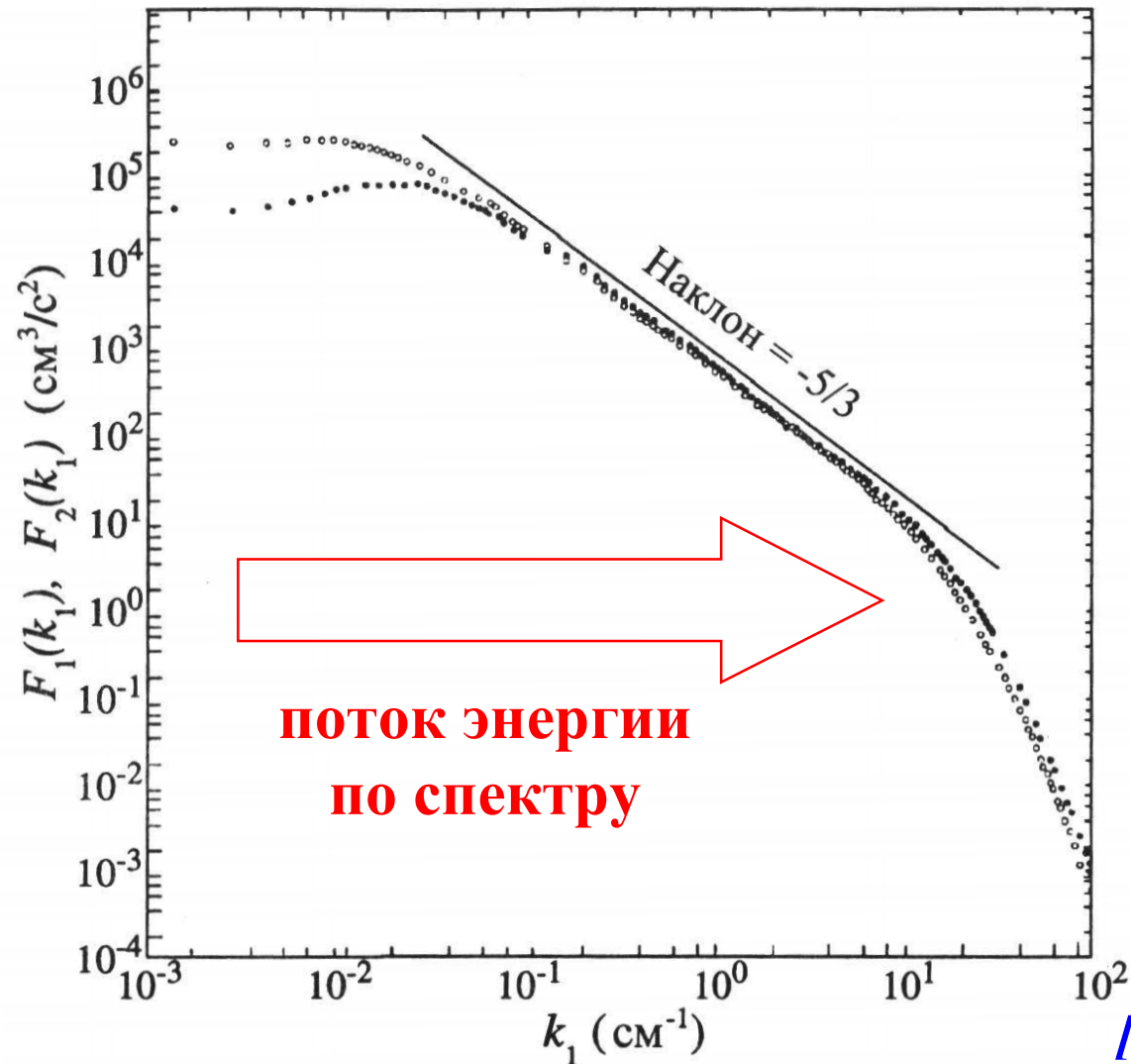
конвекция развивается при $Ra > Ra_{кр} \sim 10^3$

Спектр развитой турбулентности

область
энергии

инерционный
интервал

область
диссипации



[Frisch, 1995]

Каскад Ричардсона

*Big whirls have little whirls that feed on
their velocity,
And little whirls have lesser whirls, and
so on to viscosity.*

[Richardson, 1922]

*В поток бурлящий бросив взгляд,
Вихрей увидишь там каскад:
Меньшой энергию у большего берет,
Пока мельчайших вязкость не сотрет.*

[В.Н. Штерн, 1983]

Математическое описание турбулентности

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \vec{v} \\ \operatorname{div} \vec{v} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{уравнения Навье-} \\ \text{Стокса для} \\ \text{несжимаемой} \\ \text{жидкости} \end{array}$$

Поля скорости и давления представляются в виде суммы (статистического) среднего и пульсаций

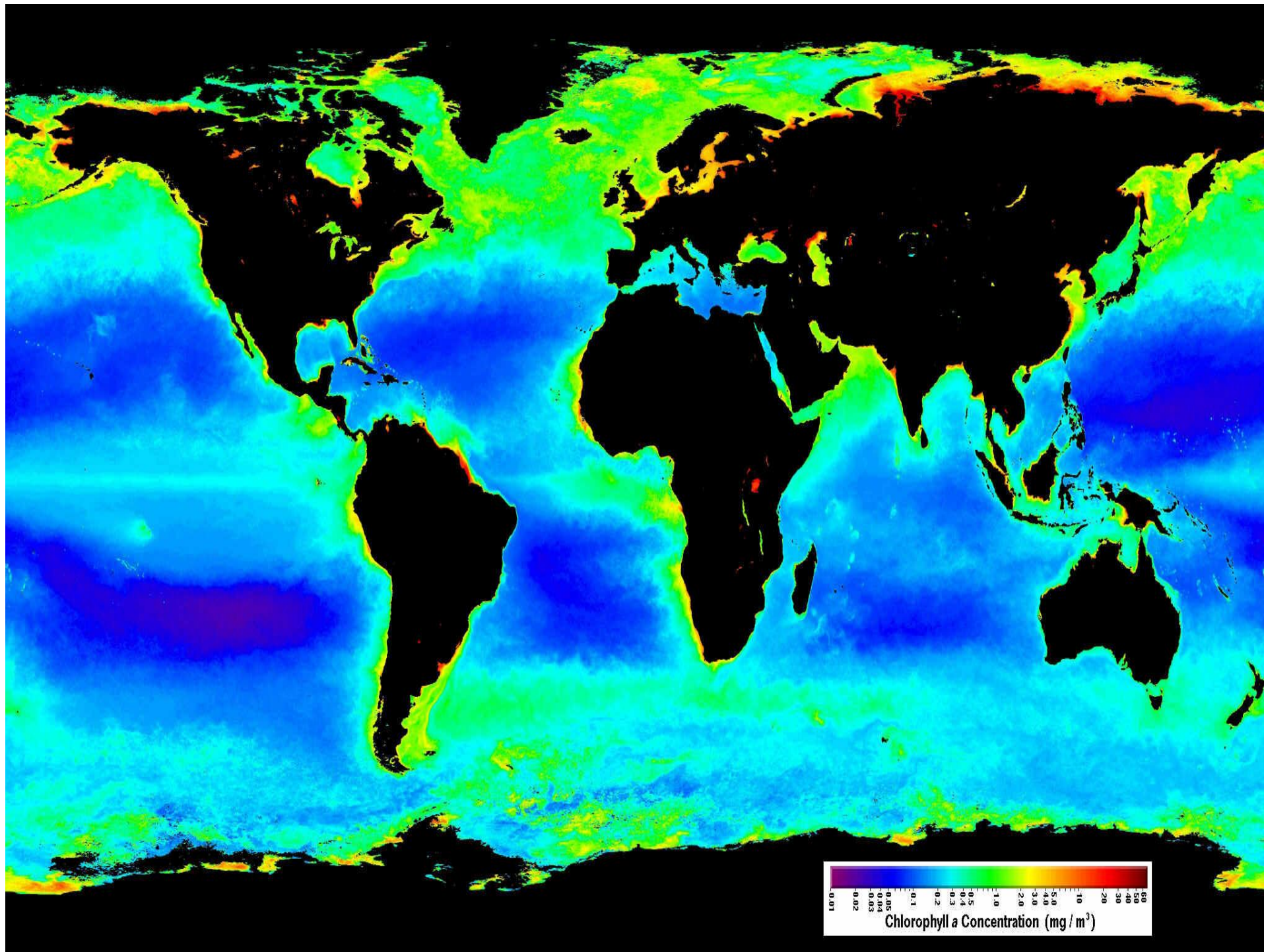
$$\vec{v} = \bar{\vec{v}} + \vec{v}' \quad p = \bar{p} + p'$$

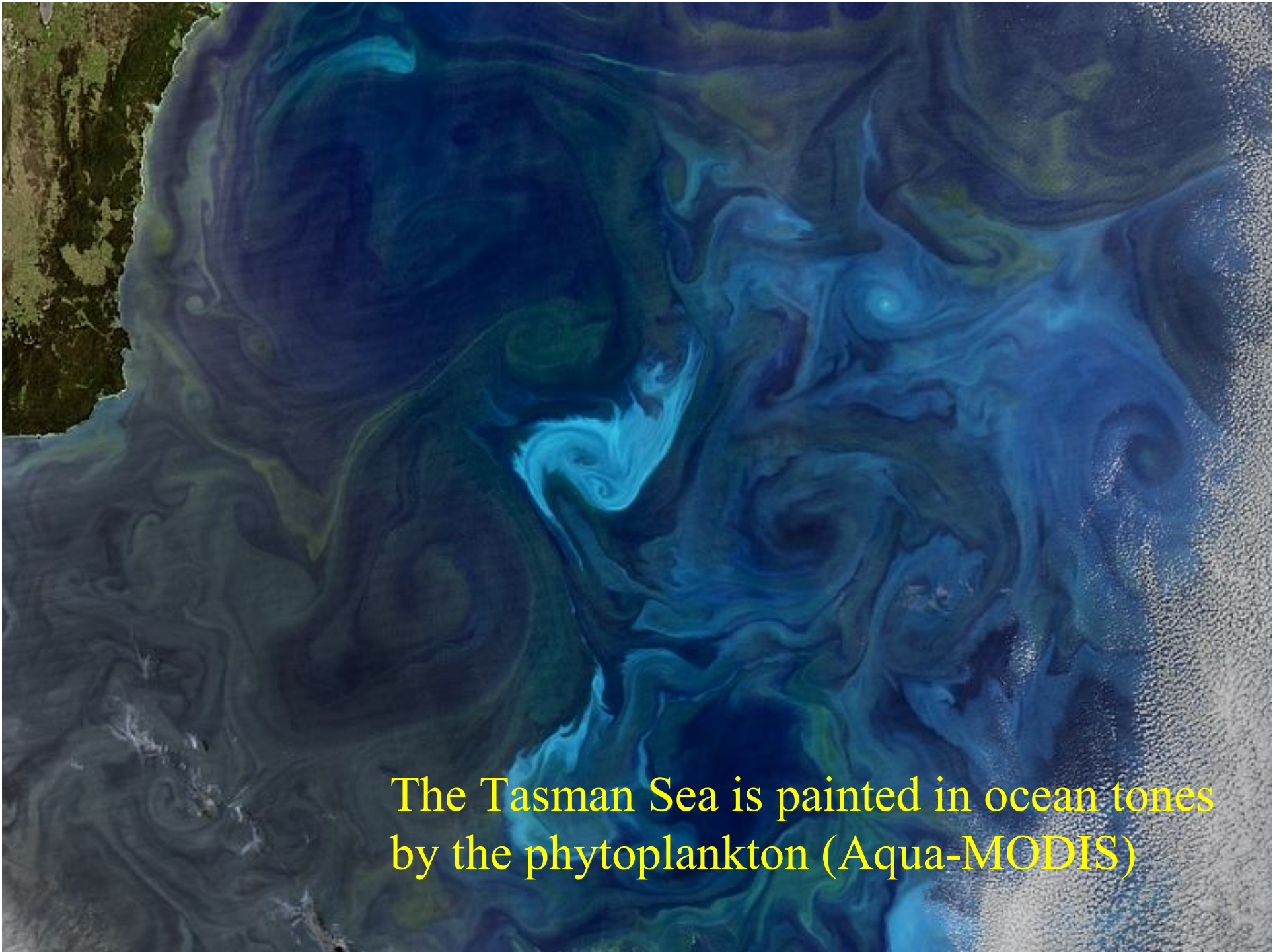
В результате осреднения уравнений Навье-Стокса получается незамкнутая система уравнений Рейнольдса, в которую входят не 4, а 10 неизвестных функций:

$$\overline{u_i} \quad \overline{p} \quad \overline{u'_i u'_j}$$

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

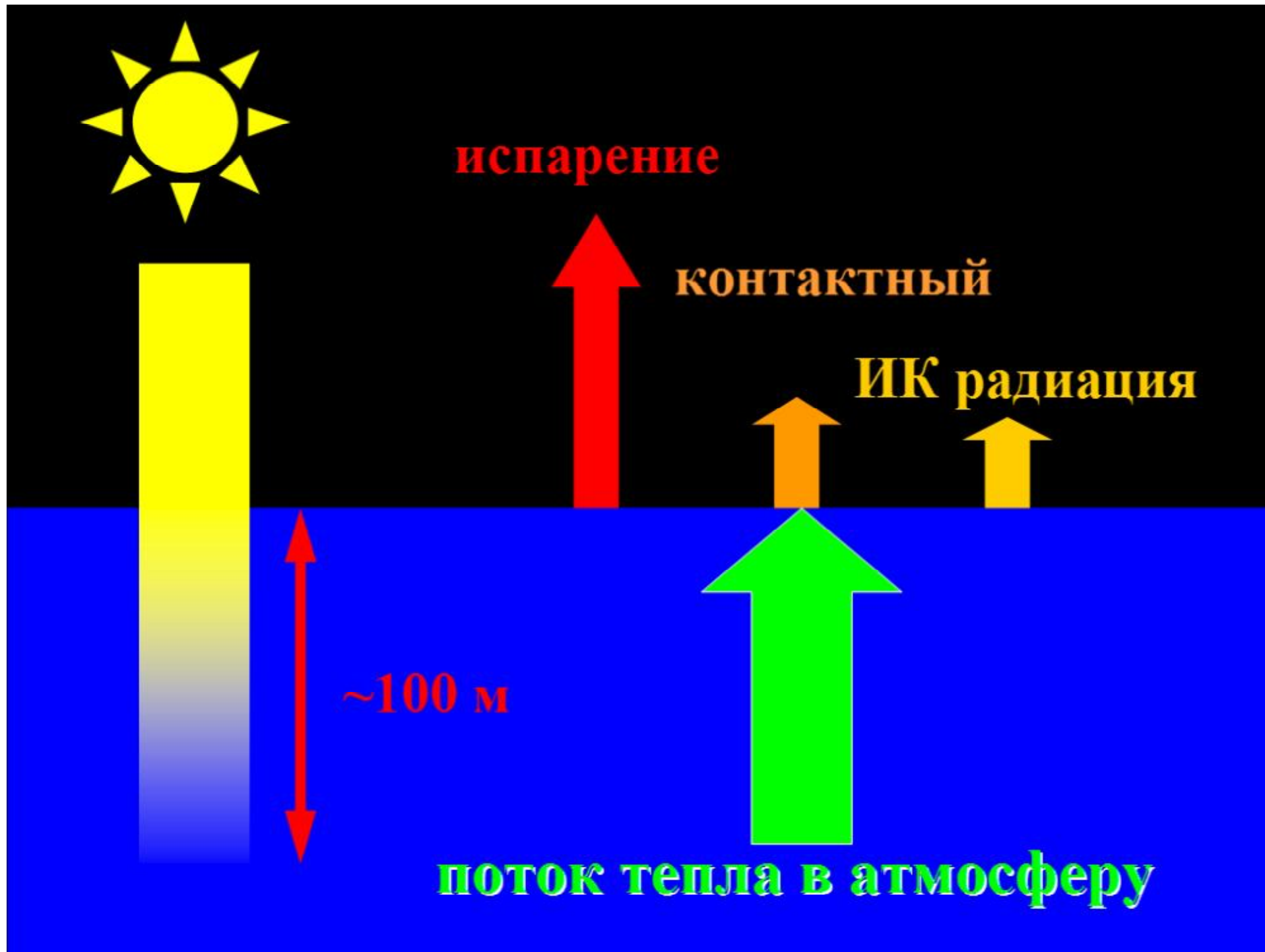
- погода и климат**
- первичная продуктивность**
- транспорт примесей (в т.ч. загрязнений)**
- ...многие иные задачи**





The Tasman Sea is painted in ocean tones
by the phytoplankton (Aqua-MODIS)

Теплообмен между океаном и атмосферой



Типичный вертикальный профиль температуры в океане

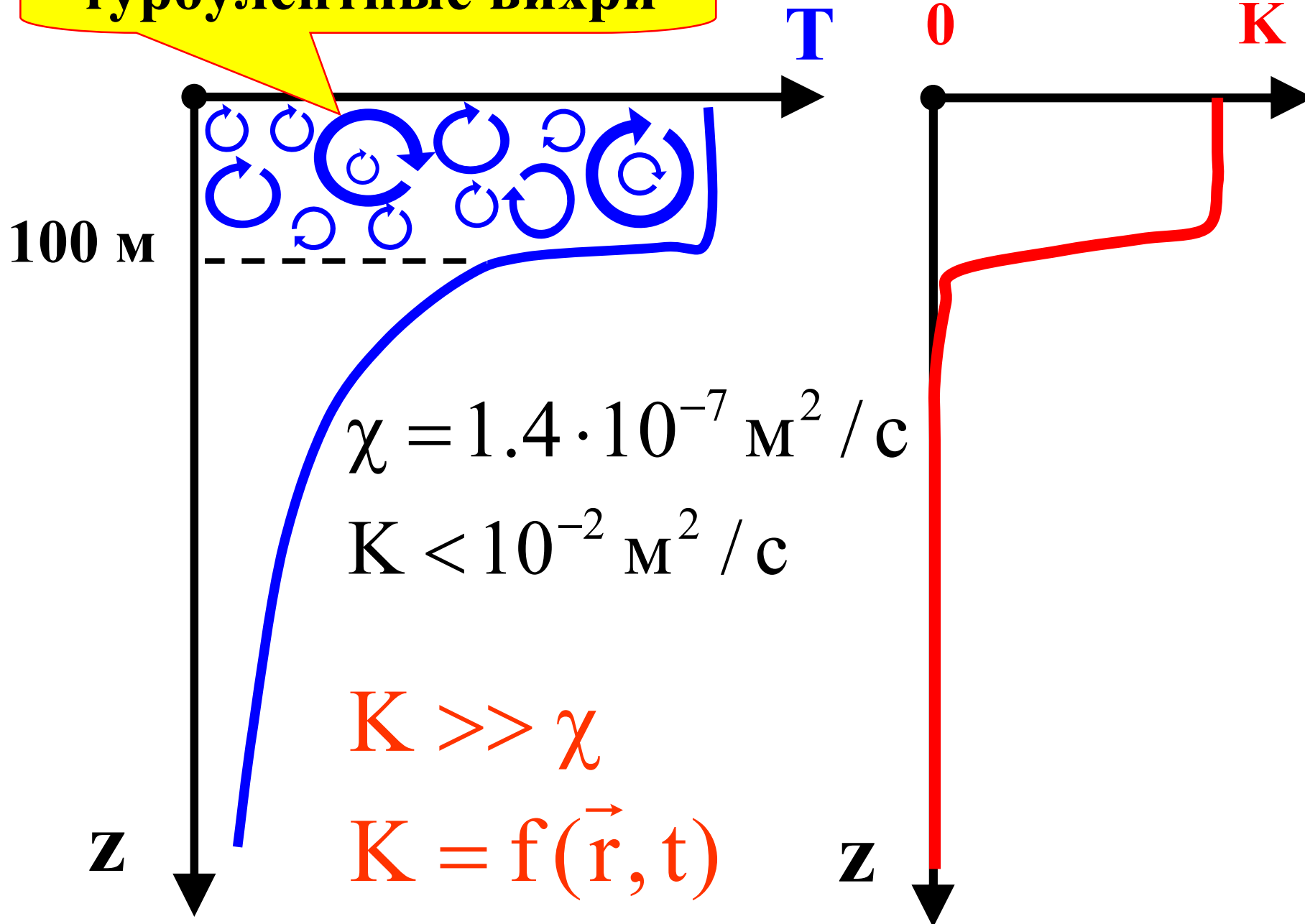


~~$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(z)$$~~

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

**Коэффициент турбулентного
обмена теплом**

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**

$$L \quad [\text{м}]$$

**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

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

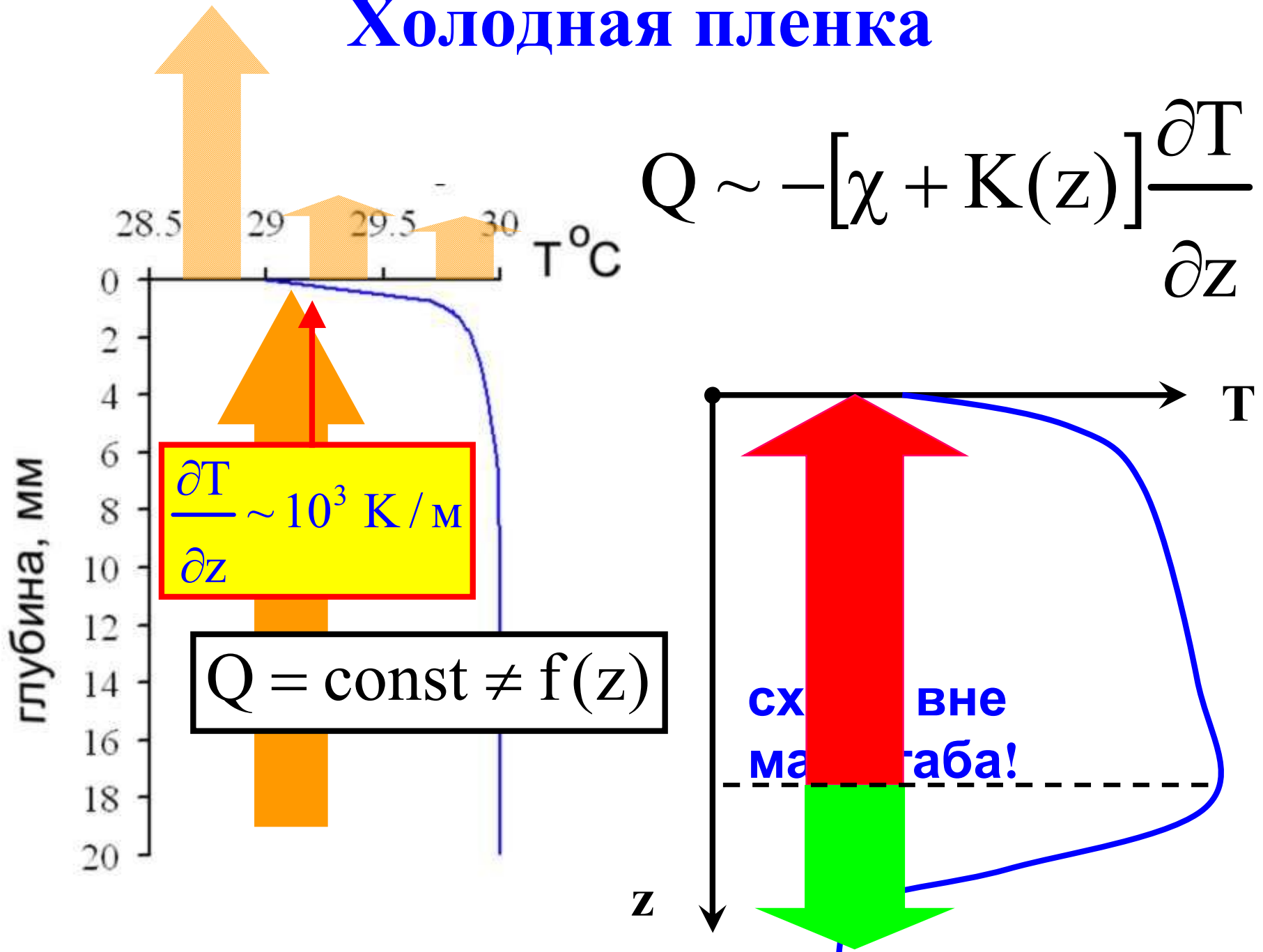
$$\nu = 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$$

Турбулентные коэффициенты

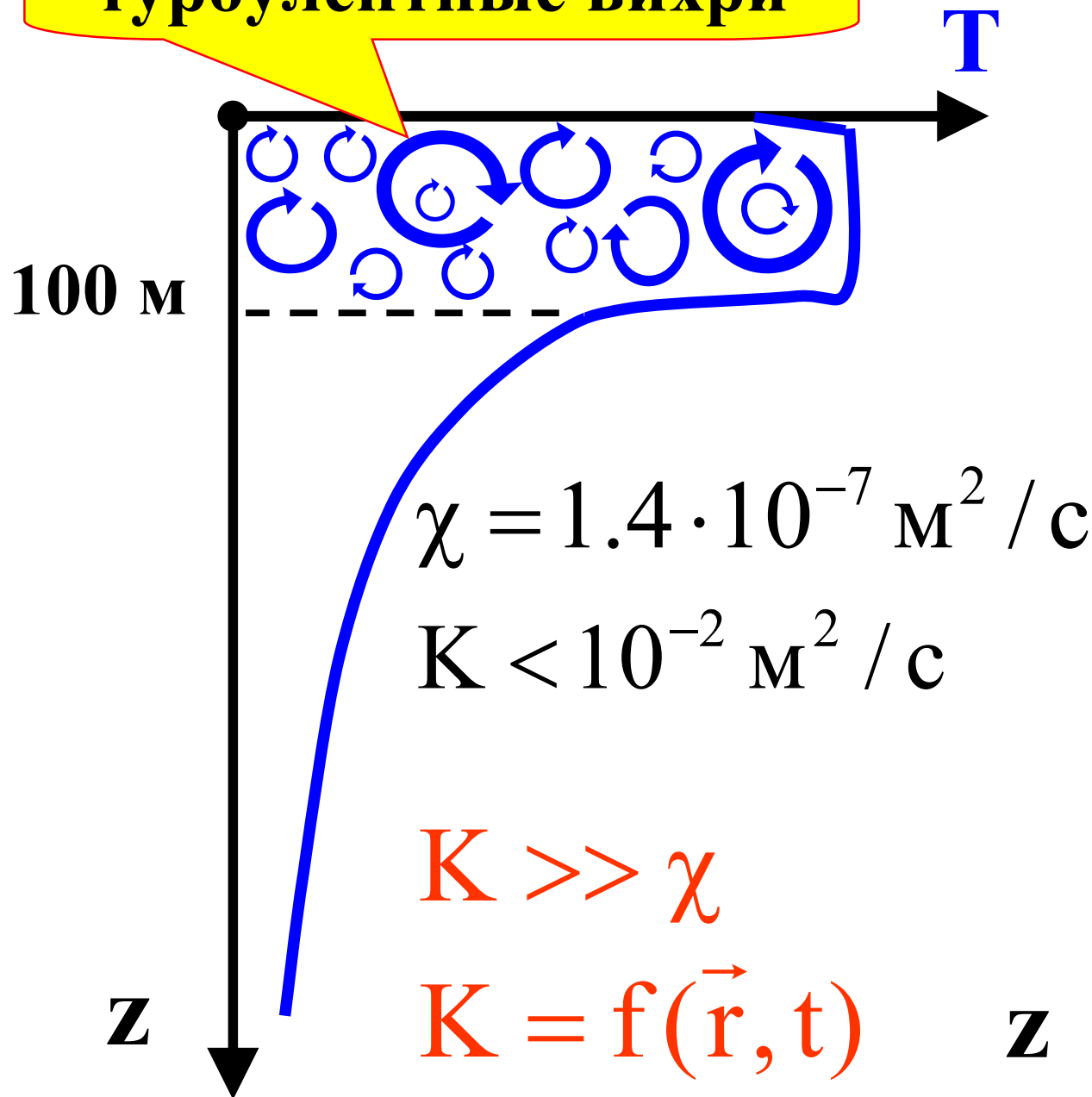
$$K^{\text{верт.}} = f^{\text{верт.}}(\vec{r}, t) < 10^{-2} \text{ м}^2 / \text{с}$$

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

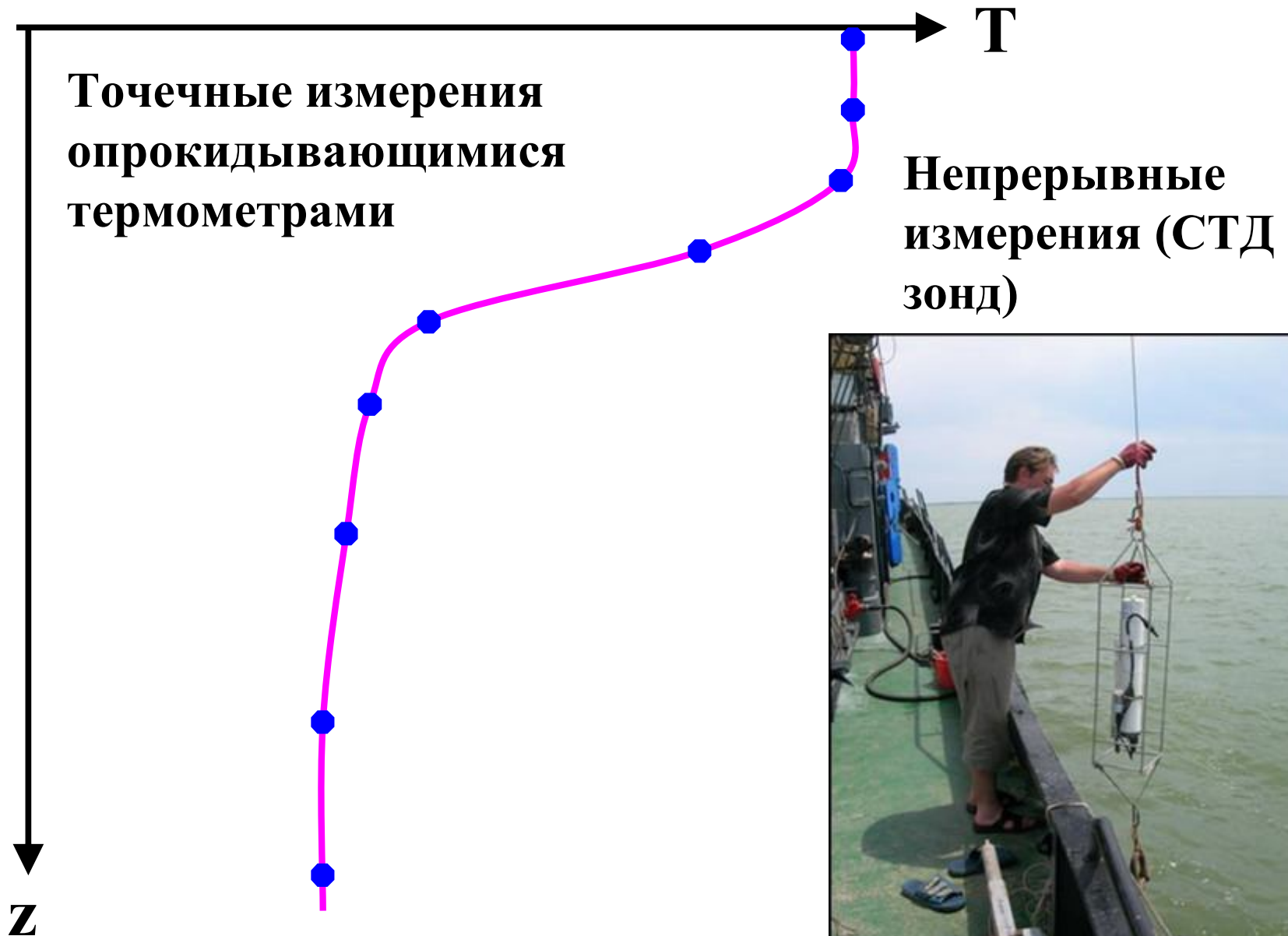
Холодная пленка



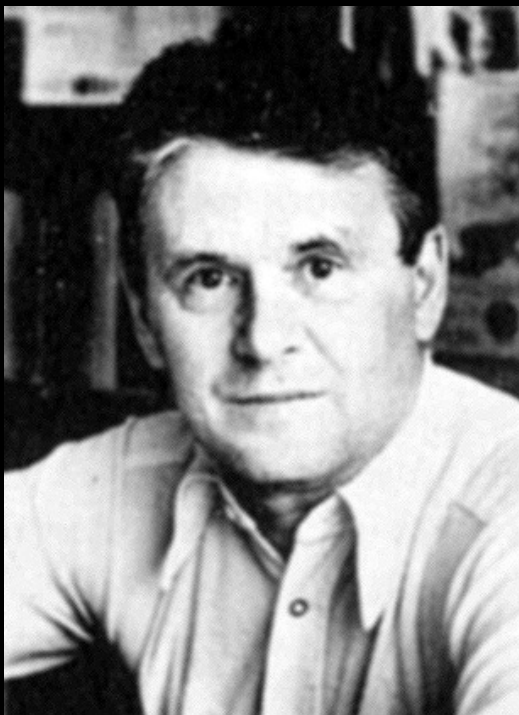
турбулентные вихри



Методика измерения вертикального профиля температуры



Тонкая термохалинная структура



Константин Николаевич

Федоров

1927-1988

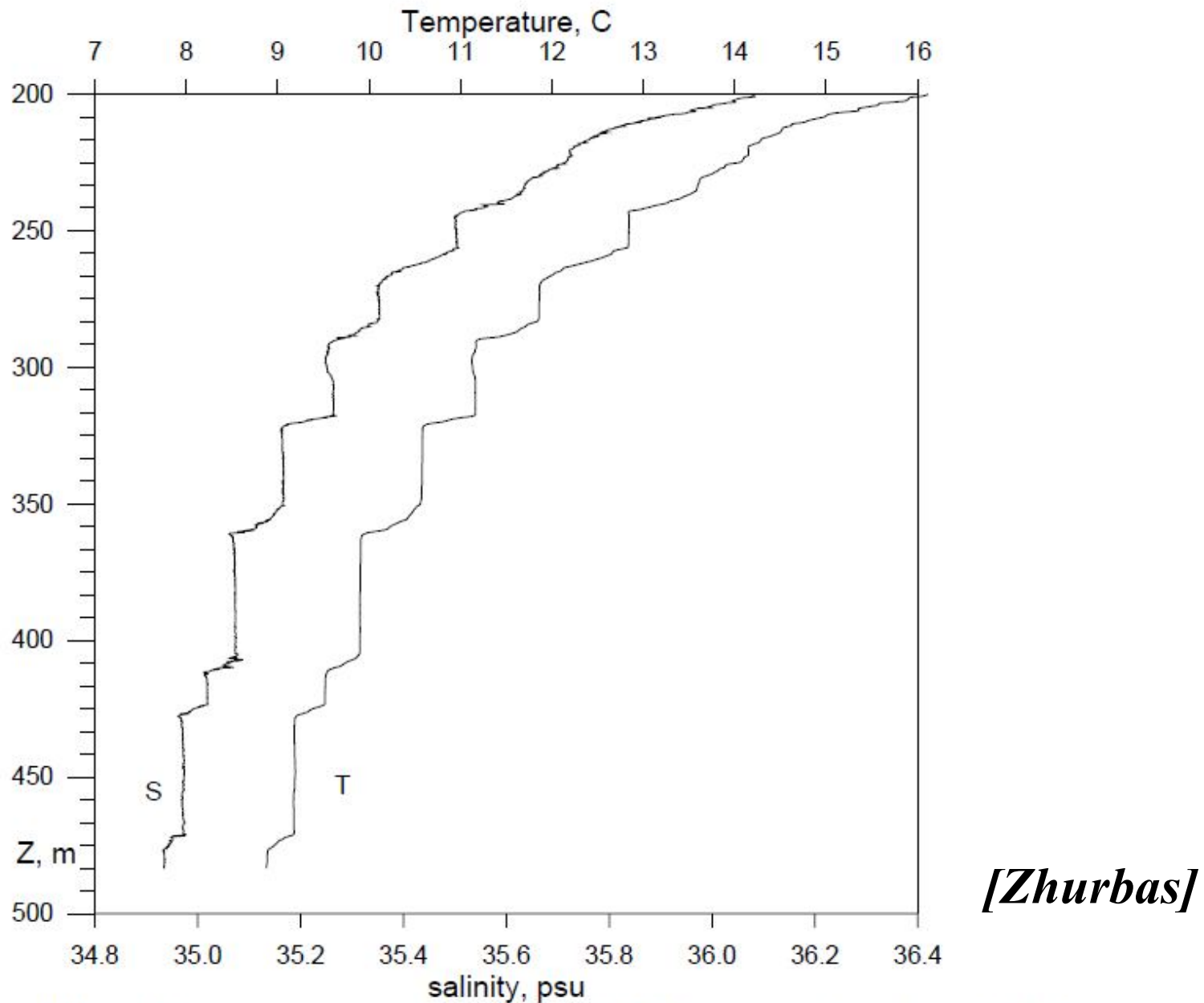
российский океанолог, член корр.

АН СССР

**Федоров К.Н. Тонкая
термохалинная структура вод
океана, 1976, Л.: Гидрометеиздат**

**...океан повсеместно —
тонкослоистая среда, в
которой существуют
сравнительно однородные по
свойствам тонкие слои
толщиной от десятков
метров до десятков
сантиметров, разделенные
более тонкими граничными
прослойками с резкими
скачками характеристик:
температуры,
электропроводности,
солености, скорости звука,
плотности, скорости
течения...**

Тонкая структура в океане



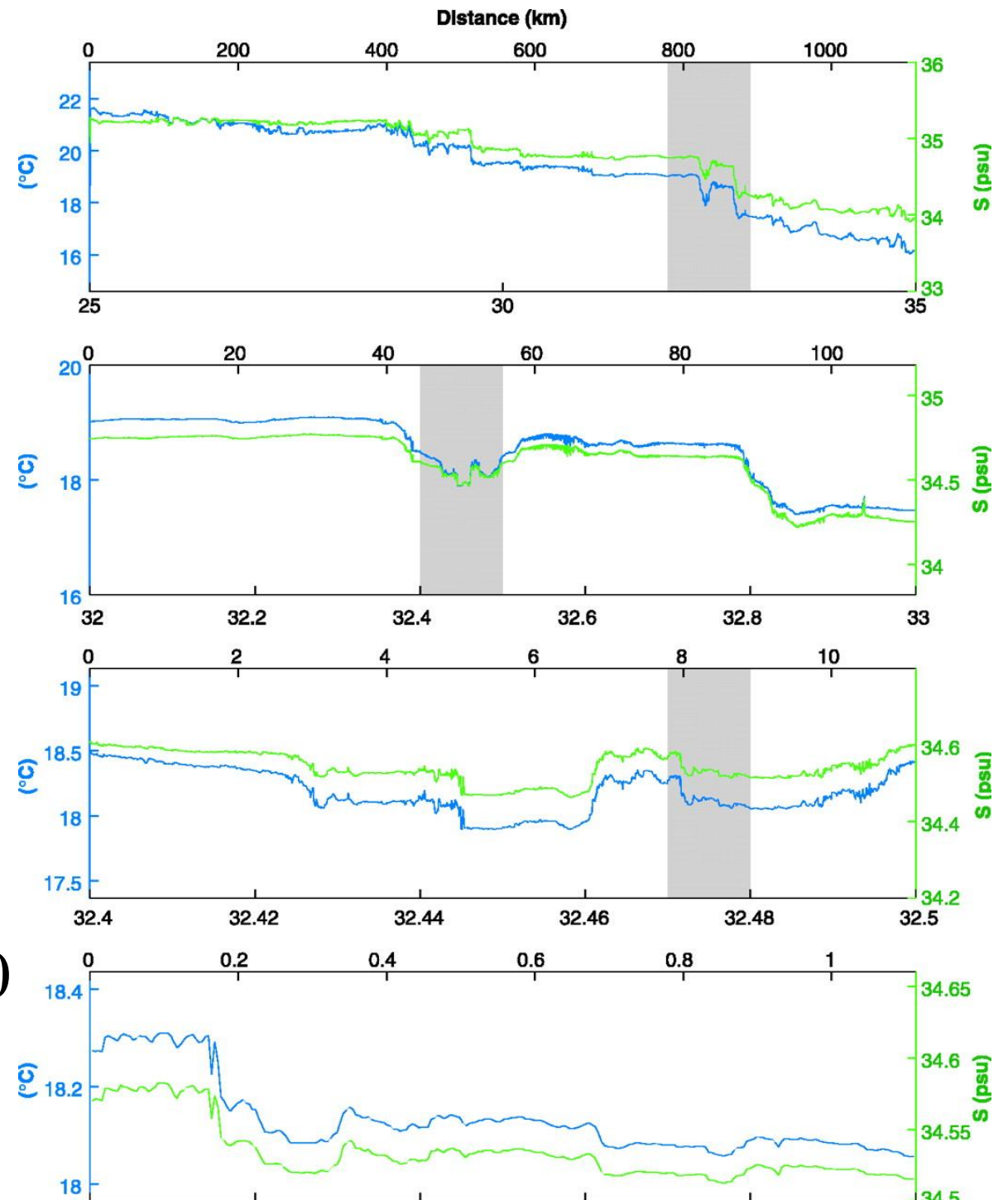
Step-like finestructure in the Northwest Tropical Atlantic

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!

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = -\alpha \Delta T + \beta \Delta s \approx 0$$

[Rudnick, Ferrari, 1999]



$$\rho(T_1, s_1) = \rho(T_2, s_2) = \rho(T_3, s_3) \dots$$

